

**Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»  
Частное учреждение «ИТЭР-Центр»  
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-  
исследовательский институт экспериментальной физики  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения  
Российской академии наук  
Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской  
академии наук**

## **ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

**18 сентября – 22 сентября 2023г.  
Гостинично-оздоровительный комплекс  
«Сочи Парк Отель»  
г. Сочи**

**Регистрация участников  
18 сентября 2023 с 09:00**

## **ОРГКОМИТЕТ**

А.В. Красильников (Частное учреждение «ИТЭР-Центр») - д.ф.-м.н., **председатель**

Е.П. Велихов (НИЦ «Курчатовский институт») – академик РАН

С.Г. Гаранин (ФГУП "РФЯЦ - ВНИИЭФ") – академик РАН

П.А. Багрянский (ИЯФ СО РАН) - д.ф.-м.н.

К.И. Ильин (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ») - к.т.н.

Ю.А. Кашук (ЧУ «ИТЭР-Центр») - к.ф.-м.н., **зам. председателя**

Ю.М. Гаспарян (НИЯУ МИФИ) - к.ф.-м.н.

О.Г. Филатов (АО «НИИЭФА») - д.ф.-м.н.

С.В. Лебедев (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН) - д.ф.-м.н.

П.П. Хвостенко (НИЦ «Курчатовский институт») - д.т.н.

А.С. Джурик (Частное учреждение «ИТЭР-Центр») - **секретарь**

## **ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ**

В.И. Ильгисонис (Росатом) - д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН

М.П. Петров (ФТИ РАН) - д.ф.-м.н.

А.Н. Романников (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ») - д.ф.-м.н.

И.В. Мазуль (АО «НИИЭФА») - д.т.н.

С. А. Бельков (ФГУП "РФЯЦ - ВНИИЭФ") - д.ф.-м.н.

А.В. Бурдаков (ИЯФ СО РАН) - д.ф.-м.н.

А.Г. Алексеев (НИЦ «Курчатовский институт») - к.ф.-м.н.

С.В. Коновалов (НИЦ «Курчатовский институт») - к.ф.-м.н.,  
**председатель**

Ю.А. Кашук (Частное учреждение «ИТЭР-Центр») - к.ф.-м.н.

А.П. Кузнецов (НИЯУ МИФИ) - д.ф.-м.н.

В.И. Афанасьев (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН) - д.ф.-м.н.,  
**зам. председателя**

А.И. Мещеряков (ИОФ РАН) - к.ф.-м.н.

М.Ю. Глявин (ИПФ РАН) - д.ф.-м.н.

## **ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ**

О.И. Семенов (Частное учреждение «ИТЭР-Центр»)

В.В. Алифанова (Частное учреждение «ИТЭР-Центр»)

## ***ТЕМАТИКИ КОНФЕРЕНЦИИ***

- С 1. Диагностика плазмы ИТЭР**
- С 2. Диагностика плазмы Токамака с Реакторными  
Технологиями (РТТ)**
- С 3. Инженерные вопросы диагностики плазмы**
- С 4. Спектроскопия плазмы и лазерные методы диагностики**
- С 5. Корпускулярные методы диагностики**
- С 6. Микроволновые и субмиллиметровые методы  
диагностики**
- С 7. Системы сбора и обработка экспериментальных данных**
- С 8. «Первая стенка» и взаимодействие с плазмой**

# ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

<b>Понедельник 18.09.2023</b>			
Зал Маяк (большой)		Зал Маяк (малый)	
9:00	<b>РЕГИСТРАЦИЯ УЧАСТНИКОВ</b>		
10:00	Красильников Анатолий Витальевич <b>ITER и TRT – технологические платформы управляемого термоядерного синтеза</b>		
10:20	Химченко Леонид Николаевич <b>ИТЭР. Время перемен</b>		
10:40	Мазуль Игорь Всеволодович <b>Проблема "первой стенки" в токамаках различного назначения и возможные подходы к ее решению</b>		
11:20	Звонков Александр Владимирович <b>Статус разработки диагностик ИТЭР в 2023 г.</b>		
11:40	Кофе-брейк		
<b>Секция 1 Диагностика плазмы ИТЭР</b> Председатель: Звонков А.В.		<b>Секция 8. «Первая стенка» и взаимодействие с плазмой</b> <i>Сессия 1. Ответственные проекты.</i> <i>Физика</i> Сопредседатели: Гаспарян Ю.М, Сергеев В.Ю.	
12:20	Алексеев Андрей Геннадьевич <b>Статус диагностики "спектроскопия водородных линий и примесей" для ИТЭР</b>	12:20	<b>Первая стенка в ТРТ. Задачи проекта.</b>  Климов Николай Сергеевич <b>Эрозия обращенных к плазме материалов ТЯР при воздействии интенсивных плазменных потоков, характерных для переходных плазменных процессов</b>
12:45	Шевелев Александр Евгеньевич. <b>Гамма-спектрометр в составе системы анализаторов атомов перезарядки ИТЭР</b>	12:40	<b>Первая стенка в Т-15МД. Задачи проекта.</b>  Будаев Вячеслав Петрович <b>Вопросы использования вольфрама в теплозащитной облицовке первой стенки и дивертора термоядерного реактора</b>
13:10	Немцев Григорий Евгеньевич <b>Разработка финального проекта вертикальной нейтронной камеры ИТЭР</b>	13:00	Пискарев Павел Юрьевич <b>Компоненты, обращенные к плазме (КОП), токамака ТРТ. НИР в поддержку проектирования.</b>

13:30	Ревякин Павел Андреевич <b>Нейтронно-физический анализ вертикальной нейтронной камеры ИТЭР</b>	13:20	Химченко Леонид Николаевич <b>Отдельные вопросы физики центральной и периферийной плазмы и выбор материала «первой стенки».</b>
13:50	Павлова Галина Сергеевна <b>Сравнение применяемых в кодах SOS и FIDASIM методов моделирования эффекта гало для активной спектроскопической диагностики</b>	13:40	Шошин Андрей Алексеевич <b>Обзор работ в ИЯФ СО РАН по тематике плазма-поверхность</b>
		14:00	Дискуссия
14:10	<b>ОБЕД</b>		
<b>Секция 5 Корпускулярные методы диагностики</b> Председатель: Мухин Е.Е.		<b>Секция 8. «Первая стенка» и взаимодействие с плазмой</b> <i>Сессия 2. Материалы облицовки. Покрытия</i> Сопредседатели: Будаев В.П., Химченко Л.Н.	
15:00	Чернышев Федор Всеволодович (дистанционно) <b>Статус корпускулярных методов диагностики в ФТИ им. А.Ф. Иоффе</b>	15:00	Беграмбеков Леон Богданович <b>Карбид бора как защитный материал контактирующих с плазмой элементов термоядерной установки</b>
15:20	Несеневич Владислав Георгиевич (дистанционно) <b>Компактный монитор для контроля изотопного отношения термоядерной плазмы</b>	15:20	Гаспарян Юрий Микаэлович <b>Выбор материала облицовки и возобновляемые покрытия</b>
15:40	Бахарев Николай Николаевич <b>Диагностика быстрых ионов на токамаке Глобус-М2</b>	15:40	Пискарев Павел Юрьевич Сучков Алексей Николаевич <b>Многослойные конструкции и материалы теплоотводящей структуры</b>
16:00	Пинженин Егор Игоревич <b>Изучение быстрых процессов в плазме ГДЛ с помощью диагностики продуктов реакции синтеза дейтерия</b>	16:00	Рыжков Георгий Андреевич <b>Подготовка к исследованию возможности применения высокотемпературных керамических материалов для покрытия первой стенки ТЯР</b>

16:20	Скрекель Ольга Михайловна <b>Диагностика нейтронных потоков и жесткого рентгеновского излучения на токамаке Глобус-М2</b>	16:20	Ульяницкий Владимир Юрьевич (дистанционно) <b>Защитные покрытия для термоядерных реакторов, получаемые методом детонационного напыления</b>
16:40	Панкратенко Алексей Владимирович <b>Анализ поля излучения генератора DD-нейтронов НГ-24 с помощью сцинтилляторов LaCl<sub>3</sub>(Ce) и паратерфенила</b>	16:40	Крат Степан Андреевич <b>Бор-литиевые материалы для обращенных к плазме элементов</b>
17:00	Фридрихсен Дмитрий Сергеевич <b>Измерительные характеристики ИКД ДМНП ИТЭР в условиях одновременного облучения DD- и DT-нейтронами</b>	17:00	Раздобарин Алексей Геннадьевич <b>Программа НИР по разработке диагностик первой стенки на токамаке Глобус-М2</b>
17:20	Бобырь Николай Павлович <b>Концепция диагностической системы стенда Перст для отработки БПРД</b>	17:20	Дискуссия

<b>Вторник 19.09.2023</b>	
Зал Маяк (большой)	Зал Маяк (малый)
<b>Секция 2 Диагностика плазмы Токамака с Реакторными Технологиями (TRT)</b> Председатель: Кашук Ю.А.	
9:00	Кашук Юрий Анатольевич <b>Диагностический комплекс токамака с реакторными технологиями</b>
9:25	Сушков Алексей Васильевич <b>Концепция системы электромагнитной диагностики токамака TRT</b>
9:50	Тугаринов Сергей Николаевич <b>Развитие концепции диагностики «активная спектроскопия» для установки TRT</b>
10:15	Мухин Евгений Евгеньевич <b>Комплекс диагностик томсоновского рассеяния на токамаке TRT</b>
10:40	Миронов Максим Игоревич (дистанционно) <b>Возможности применения активной корпускулярной диагностики на токамаке TRT</b>
11:00	Земцов Иван Александрович <b>Концепция диагностики MSE для установки TRT</b>
11:20	Раздобарин Алексей Геннадьевич <b>Варианты реализации диагностики первой стенки и дивертора токамака с реакторными технологиями (TRT)</b>
11:40	Кофе-брейк

<p align="center"><b>Секция 2 Диагностика плазмы Токамака с Реакторными Технологиями (ТРТ)</b> Председатель: Кашук Ю.А.</p>		<p align="center"><b>Секция 8. «Первая стенка» и взаимодействие с плазмой</b> <i>Сессия 3. Альтернативные решения. Водород</i> Сопредседатели: Шошин А.А., Писарев А.А.</p>	
12:10	<p>Айрапетов Алексей Александрович <b>Зонды для изучения взаимодействия плазмы с дивертором и первой стенкой токамака ТРТ</b></p>	12:10	<p>Писарев Александр Александрович <b>Текущий жидкий литий как материал, обращенный к плазме</b></p>
12:30	<p>Диас Михайлова Джоанна Екатерина <b>Концепция диагностической системы измерения профиля электронной температуры плазмы по интенсивности электронно-циклотронного излучения для установки ТРТ</b></p>	12:30	<p>Сергеев Владимир Юрьевич <b>Статус и перспективы развития литиевых технологий стационарного разряда в токамаках с дивертором</b></p>
12:50	<p>Яшин Александр Юрьевич <b>Концепция системы доплеровского обратного рассеяния на токамаке с реакторными технологиями</b></p>	12:50	<p>Вертков Алексей Викторович <b>Перспективные композиционные материалы жидкометаллических внутрикамерных элементов</b></p>
13:10	<p>Попов Сергей Сергеевич <b>Исследование метода фотонной нейтрализации мощных пучков отрицательных ионов в ИЯФ СО РАН</b></p>	13:10	<p>Мазуль Игорь Всеволодович <b>Легкозаменяемые и подвижные конструкции "первой стенки"</b></p>
13:30	<p>Леонтьев Дмитрий Сергеевич (дистанционно) <b>Параболический метод расчета интенсивностей линий в MSE-диагностике плазмы</b></p>	13:30	<p>Ананьев Сергей Станиславович <b>Вопросы рециклинга топлива применительно к проектированию термоядерной установки и выбору материалов</b></p>
13:50	ОБЕД		



<p><b>Секция 6 Микроволновые и субмиллиметровые методы диагностики</b>          Председатель:          Глявин М.Ю.</p>		<p><b>Секция 8. «Первая стенка» и взаимодействие с плазмой</b>  <i>Сессия 3 (продолжение).</i>  <i>Альтернативные решения. Водород</i>          Сопредседатели:          Шошин А.А., Писарев А.А.</p>	
14:40	<p>Глявин Михаил Юрьевич  <b>Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона</b></p>	14:40	<p>Медведев Олег Сергеевич  <b>Апробация лазерной диагностики накопления изотопов водорода в материалах облицовки токамак-реакторов</b></p>
15:00	<p>Зотова Ирина Валерьевна  <b>Гиротроны средней мощности с широкополосной перестройкой по частоте</b></p>	15:00	<p>Бобырь Николай Павлович  <b>К вопросу об исследованиях взаимодействия изотопов водорода с материалами ТЯР при длительных высокопоточных плазменных и нейтронных облучениях</b></p>
		<p><b>Секция 8. «Первая стенка» и взаимодействие с плазмой</b>  <i>Сессия 4. Переходные процессы.</i>  <i>Эрозия. Установки</i>          Сопредседатели:          Климов Н.С., Ананьев С. С.</p>	
15:20	<p>Самсонов Сергей Викторович  <b>Возможности гиротронной лампы бегущей волны в качестве источника мощного широкополосного миллиметрового излучения для диагностики плазмы</b></p>	15:20	<p>Касатов Александр Александрович  <b>Установка ВЕТА: возможности и перспективы</b></p>
15:40	<p>Адилова Асель Булатовна  <b>Численное моделирование синхронизации в системе двух связанных мощных гиротронов диапазона 170 ГГц</b></p>	15:40	<p>Попов Владимир Андреевич  <b>Качественная теоретическая модель образования трещин при разрушении хрупких материалов импульсным поверхностным нагревом</b></p>
16:00	<p>Дрозд Алексей Станиславович  <b>СВЧ-интерферометр токамака Т-15МД для измерения средней электронной концентрации плазмы</b></p>	16:00	<p>Рулёв Роман Валерьевич  <b>Тепловые испытания различных облицовочных материалов элементов, обращенных к плазме.</b></p>

16:20	Минашин Павел Вадимович <b>Развитие комплексной диагностики надтепловых электронов по спектрам электронного циклотронного излучения плазмы и томсоновского рассеяния лазерного излучения в токамаках реакторах</b>	16:20	Алябьев Илья Александрович <b>Моделирование движения расплава в условиях, характерных для переходных процессов в ИТЭР</b>
16:40	Токарев Арсений Юрьевич <b>Применение многочастотного доплеровского обратного рассеяния для исследования периферийных локализованных мод на токамаке Глобус-М2</b>	16:40	Карташева Александра Александровна Муравьева Евгения Андреевна <b>Экспериментальное исследование эрозии вольфрама, покрытого тонким слоем металла, при воздействии концентрированных потоков энергии</b>
17:00	Сандалов Евгений Сергеевич <b>Диагностика миллиметрового излучения в пучково-плазменных генераторах и ЛСЭ терагерцового генератора</b>	17:00	Черепанов Дмитрий Евгеньевич <b>Исследование эрозии поверхности высокотемпературных керамик в результате импульсного нагрева, возможного в термоядерных установках во время магнитного удержания плазмы</b>
		17:20	Пушина Анита Викторовна <b>Исследование динамики теплового воздействия мощных потоков плазмы на поверхность вольфрамовой мишени</b>

**Среда 20.09.2023**

Зал Маяк (большой)		Зал Маяк (малый)
<b>Секция 4 Спектроскопия плазмы и лазерные методы диагностики</b> Председатель: Тугаринов С.Н.		<b>Постерная сессия</b> <b>Секции 1, 2</b> (10 постеров) 9:00-13:40
9:00	Тюхменева Екатерина Алексеевна <b>Развитие комплекса спектроскопических диагностик для исследования переноса примесей на токамаке Глобус-M2</b>	1. Кормилицын Т. М. <b>Анализ характеристик генераторов быстрых нейтронов для калибровки нейтронных диагностик ИТЭР</b> 2. Кузьмин Н. В. <b>Светосильный спектрометр-полихроматор высокого разрешения для активной спектроскопической диагностики плазмы токамаков</b> 3. Таскаев А. С. <b>Интеграция вертикальной нейтронной камеры ИТЭР</b> 4. Жаров А.С. <b>Восстановление профиля интенсивности нейтронного излучения плазмы в токамаке ИТЭР методами машинного обучения</b> 5. Кириченко А.Н. <b>Синтез CVD алмазных монокристаллических пленок и создание на их основе детекторов для диагностики быстрых атомов и нейтронов горячей плазмы токамаков</b> 6. Модестов В.С., Шаделко Ф.В. <b>Численный анализ прочности первого зеркала диагностики «активная спектроскопия» токамака ИТЭР под действием циклических тепловых нагрузок</b> 7. Миронова Е.Ю. <b>Проектирование автоматизированных информационно-управляющих систем ТРТ</b> 8. Афанасенко Е.С. <b>Применение кода OPENMC для моделирования переноса нейтронного излучения в токамаке ТРТ</b>
9:25	Белокуров Александр Александрович (дистанционно) <b>Исследование переменного радиального электрического поля и его влияния на L-N переход в компактном токамаке</b>	
9:50	Ермаков Никита Владимирович (дистанционно) <b>Диагностика томсоновского рассеяния дивертора токамака Глобус-M2</b>	
10:15	Тимохин Владимир Михайлович <b>Модель расчета излучения нейтрального гелия для спектроскопической диагностики периферийной плазмы токамака Глобус-M2</b>	
10:40	Жильцов Никита Сергеевич <b>Статус диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-M2</b>	

11:05	Романников Александр Николаевич <b>Полоидальная неоднородность тороидального вращения плазмы токамака при измерении методом CXRS и возможный релятивистский механизм неоднородности</b>	9. Атлуханов М.Г. <b>Исследование удержания лазерного излучения в нерезонансном накопителе</b> 10. Портнов Д.В. <b>Модель TRT 2022, ядерно-радиационные характеристики. (Модель 22 8Т, 5МА)</b>
11:30	Кофе-брейк	
<b>Секция 4 Спектроскопия плазмы и лазерные методы диагностики</b> Председатель: Тугаринов С.Н.		
12:00	Губский К.Л. <b>Лазерная гетеродинная интерферометрия в диагностике импульсной плазмы</b>	
12:25	Вуколов К.Ю. <b>Спектроскопия плазмы в диверторе Т-15МД – задачи, проблемы и возможности реализации</b>	
12:50	Сдвиженский П.А. <b>Обработка данных томсоновской диагностики для анализа скорости отклика температуры плазмы на включение мощного дополнительного нагрева в токамаках</b>	
13:15	Гаспарян Ю.М. <b>Лазерно-ассистированные методы определения содержания изотопов водорода в стенках термоядерных установок</b>	
13:40	ОБЕД	

Секция 3 Инженерные вопросы диагностики плазмы Председатель: Вуколов К.Ю.		Постерная сессия Секции 5, 6 (13 постеров) 14:30-17:30
14:30	Соловьева Олеся Викторовна <b>Особенности изготовления подсистем ИТЭР на примере стенда испытаний порт плавов (PPTF)</b>	1. Гусева П.А. <b>Импульсная лазерная диагностика атомов в термоядерной плазме</b>
15:00	Гавриленко Дмитрий Евгеньевич <b>Технологии изготовления и методы испытаний элементов диагностических систем ИТЭР</b>	2. Брагин Е.Ю. <b>Разработка диагностического комплекса для исследования плазменных процессов в магнитном сопле макета безэлектродного плазменного ракетного двигателя</b>
15:20	Семенов Евгений Владимирович <b>Разработка методов и требований к совместному проектированию установки ТРТ и управлению конструкторской и инженерной документацией в единой распределенной среде</b>	3. Шулятьев К.Д. <b>Анализатор CNRA-09 на токамаке Глобус-М2</b>
15:40	Самсонов Дмитрий Сергеевич <b>Питание системы ВЧ очистки первых зеркал оптических диагностик ИТЭР</b>	4. Полосаткин С.В. <b>Измерение динамики популяции быстрых ионов в плазме на установке ГОЛ-НВ</b>
16:00	Терещенко Иван Борисович <b>Крупногабаритные высокоотражающие зеркала на нержавеющей стали 316L(N)-IG для использования в ИТЭР</b>	5. Крохалев О.Д. <b>Оптимизация положения вторичного ионопровода диагностики плазмы пучком тяжёлых ионов на токамаке T-15МД</b>
16:20	Елец Денис Игоревич <b>Циклическая очистка защитного окна и первого зеркала диагностики томсоновского рассеяния от бериллийсодержащих осадков</b>	6. Пурьга Е.А. <b>Измерительный комплекс корпускулярной диагностики на основе полупроводникового детектора</b>
		7. Гаштури А.П. <b>Разработка квазиоптического преобразователя многочастотного гиротрона в диапазоне 175–250 ГГц</b>
		8. Григорьева Н.В. <b>Теоретический анализ синхронизации гиротрона в режиме жесткого возбуждения под действием внешнего сигнала</b>
		9. Заславский В.Ю. <b>Мощные источники излучения W – диапазона на основе релятивистских планарных генераторов поверхностной волны</b>
		10. Миронов А.Ю. <b>Модернизация программно-аппаратной архитектуры автоматизированной системы управления и защиты гиротронного комплекса на установке ИТЭР</b>

16:40	<p>Вуколов Дмитрий Константинович (дистанционно)  <b>Разработка и изготовление внутрикамерных узлов пневмоприводов защитной шторки для диагностики спектроскопия водородных линий ИТЭР</b></p>	<p>11. Палицин А.В.  <b>Волноводный режекторный фильтр для микроволновой диагностики плазмы</b></p>
17:00	<p>Панкратьев Павел Александрович  <b>Актуаторы для применения в вакуумном объеме ИТЭР</b></p>	<p>12. Песков Н.Ю.  <b>Сверхмощные черенковские генераторы субтерагерцового диапазона с двумерной распределенной обратной связью</b></p> <p>13. Савилов А.В.  <b>Резонаторы с фазовыми корректорами для мощных гиротронов</b></p>

<b>Четверг 21.09.2023</b>			
Зал Маяк (большой)		Зал Маяк (малый)	
<b>Секция 7 Системы сбора и обработка экспериментальных данных</b> Председатель: Портоне С.С.		<b>Секция 8. «Первая стенка» и взаимодействие с плазмой</b>	
9:00	Нагорный Никита Васильевич <b>Разработка цифровых систем сбора и обработки данных для диагностических систем</b>	9:00-14:00	<p>Круглый стол. Дискуссия по темам:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Замена бериллиевой облицовки на вольфрамовую в ИТЭР</li> <li>2. Оптимальная облицовка для ТРТ</li> </ol> <p>Первоочередные НИР по теме в рамках ФП№3 КП РТТН</p>
9:15	Парышкин Юрий Алексеевич <b>Особенности проектирования программного обеспечения диагностики ДМНП</b>		
9:30	Хильченко Александр Дмитриевич <b>Адаптивные средства регистрации и предварительной обработки экспериментальных данных</b>		
9:45	Солоха Владимир Владимирович <b>Система интегрального анализа данных на основе байесовского вывода для токамака Глобус-М2</b>		
10:00	Ефимов Никита Евгеньевич <b>Программно-аппаратный комплекс автоматизированного сбора, обработки, хранения и визуализации данных токамака “МИФИСТ-0”</b>		
10:15	Воробьев Вячеслав Анатолиевич <b>Гибридный канал обработки сигнала ИКД диагностики ДМНП</b>		
10:30	Федоров Владимир Алексеевич (дистанционно) <b>Относительная калибровка измерительных трактов канала контроля нейтронного потока</b>		

10:45	Иваненко Светлана Владимировна <b>Система регистрации и управления плотностью плазмы для дисперсионного интерферометра на токамаке Глобус-М2</b>		
11:00	Баркалов Кирилл Евгеньевич <b>Апробация системы сбора и обработки диагностических данных инжекторов токамака Т-15МД на тест стенде ИРЕК</b>		
11:15	Кофе-брейк		
11:40	Янченков Сергей Викторович <b>Система управления, регистрации и обработки экспериментальных данных стенда ПС1</b>		
11:55	Авдюшкин Данила Александрович <b>Математическое моделирование изменения амплитудного спектра сигналов алмазных детекторов при различных нагрузках</b>		
12:10	Николаев Антон Игоревич <b>Моделирование сигналов алмазного детектора диагностики ВНК с использованием графических процессоров</b>		
12:25	Михалев Илья Михайлович <b>Цифровая обработка выходного импульса детекторного модуля вертикальной нейтронной камеры ИТЭР с помощью FPGA</b>		
12:40	Лешов Николай Валерьевич <b>Распознавание ошибочных данных диагностик с помощью искусственных нейронных сетей</b>		
12:55	Ларионов Алексей Сергеевич <b>Единый расчётный сегмент для УТС-исследований</b>		



13:10	Семёнов Олег Игоревич <b>Создание международной сети центров дистанционного участия в эксперименте ИТЭР</b>		
13:25	Вишня Артём Сергеевич <b>Подходы к сбору, хранению и визуализации экспериментальных данных УТС-установок РФ в АИП ИКП</b>		
13:40	Дискуссия		
14:00	<b>ОБЕД</b>		
14:50-17:00	<b>Круглый стол «Цифровое будущее термоядерных исследований в Российской Федерации».</b>	<b>Постерная сессия Секция 7 (12 постеров) 14:50 - 17:30</b>	
14:50	Семёнов Игорь Борисович <b>Развитие единого информационного пространства УТС исследований – от RUSSIAN FUSION GRID к FUSIONSPACE.RU</b>	1. Джурик А. С. <b>Имитатор сигналов камер деления диверторного монитора нейтронного потока ИТЭР</b>	
15:05	Портоне Сергей Сергеевич <b>Вступительное слово</b>	2. Голачев В. М. <b>Тестирование компонентов системы регистрации ВНК с применением оптической гальванической развязки</b>	
15:20-17:00	Обсуждение вопросов работы с экспериментальными, проектными и модельными данными в УТС, определение перспектив и задач развития единого информационного пространства УТС исследований в России. К обсуждению предлагаются следующие темы: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Совместное проектирование новых установок, задачи моделирования и требуемая инфраструктура;</li> <li>• Использование инструментов машинного обучения и анализа данных для подготовки и анализа эксперимента;</li> <li>• Запросы научного</li> </ul>	3. Гужев Д. И. <b>Программное обеспечение для обработки данных диагностической системы вертикальная нейтронная камера</b>	
		4. Хилькевич Е. М. <b>DeGaSum – программа сбора и обработки данных нейтронной, рентгеновской и гамма диагностик плазмы токамаков</b>	
		5. Мартазов Е. С. <b>Синхронизация измерений диагностики ДМНП со временем ИТЭР</b>	
		6. Тушин Д. С. <b>Разработка независимых человеко-машинных интерфейсов итэр на базе переменных CODAS для удаленных участников экспериментов</b>	
		7. Хильченко В. А. <b>Гальванически изолированные регистраторы</b>	

	<p>сообщества к программно-аппаратным и аналитическим комплексам, средствам визуализации, обработки данных;</p> <p>Переход на отечественное программное и аппаратное обеспечение.</p>	<p>8. Зубарев П. В. <b>Автономные программные средства модулей управления и сбора данных для плазменных установок</b></p> <p>9. Нестеренко В. М. <b>Разработка комплекса аппаратных решений для системы сбора данных и управления диагностической системы активной спектроскопии</b></p> <p>10. Арбузова Т. В. <b>Представление измерительных процедур в техническом проекте системы сбора и обработки данных диагностики плазмы «активная спектроскопия»</b></p> <p>11. Ежова З.В. <b>Концепция проведения научных исследований на диагностическом комплексе установки TRT с использованием единого информационного пространства</b></p> <p>12. Григорян Л.А. <b>Обработка данных научного УТС эксперимента с применением алгоритмов машинного обучения</b></p>
--	---	--

<b>Пятница 22.09.2023</b>		
Зал Маяк (большой)	Зал Маяк (малый)	
<b>Секция 3 Инженерные вопросы диагностики плазмы</b> Председатель: Вуколов К.Ю.	<b>Постерная сессия Секции 3, 4</b> (15 постеров) 9:00 - 13:00	
9:00	Иванцовский Максим Владимирович <b>Чистое сборочное помещение для диагностического оборудования ИТЭР в ИЯФ СО РАН</b>	<p>1. Нагель Н.Н. <b>Применение гелиевого термометра в качестве метода определения температуры рабочего газа в макете БПРД</b></p> <p>2. Шуровский Д.О. <b>Доплеровские измерения параметров плазменных потоков в геликонном разряде</b></p> <p>3. Хуснутдинов Р.И. <b>Восстановление радиального профиля светимости линий атомов и ионов геликонной плазмы для прототипа безэлектродного плазменного ракетного двигателя методом матриц переноса лучей</b></p> <p>4. Панфилов Д.С. <b>Анализ возможности использования SWIR камеры в диагностике томсоновского рассеяния в токамаке Т-15МД</b></p> <p>5. Ткаченко Е.Е. <b>Определение запасенной в плазме энергии с помощью кода равновесия PET, диамагнитных и кинетических измерений</b></p> <p>6. Цой Е.С. <b>Расчётный анализ эффективности лазерных источников линейчатого рентгеновского излучения, используемого для задач диагностики</b></p> <p>7. Гнутов А.С. <b>Некоторые особенности взаимодействия лазерного излучения с пористой средой по результатам численного моделирования</b></p>
9:30	Крат Степан Андреевич <b>Учебно-исследовательский токамак МИФИСТ-0: состояние на 2023 год</b>	
9:50	Пришвицын Александр Сергеевич <b>Диагностический комплекс токамака МИФИСТ-0</b>	
10:10	Сарычев Дмитрий Валентинович (дистанционно). <b>Система измерения радиационных потерь для токамака Т-15МД</b>	
10:30	Степин Андрей Викторович <b>Влияние толстостенной вакуумной камеры на результаты измерений электромагнитной диагностики токамака Т-15МД</b>	
10:50	Шестаков Евгений Андреевич (дистанционно) <b>Диагностика надтеплового и жесткого рентгеновского излучения на токамаке Т-15МД</b>	
11:10	Хайрутдинов Эдуард Наилевич <b>Система диагностики и активной стабилизации вертикального положения плазмы в токамаке Т-15МД</b>	
11:30	Кофе-брейк	

12:00	Рогозин Константин Андреевич <b>Зондовая диагностика диверторной плазмы в токамаке Т-15МД</b>	8. Сомов К.Р. <b>Измерение динамических характеристик плазменного потока квазистационарного сильнооточного плазменного ускорителя с собственным магнитным полем</b>
12:20	Качкин Александр Георгиевич <b>Инженерная реализация систем индикации замыканий, визуализации плазмы и диагностической станции анализа первой стенки токамака Т-15МД</b>	9. Карташева А.А. <b>Экспериментальное определение характеристик плазменного потока квазистационарного сильнооточного плазменного ускорителя</b>
12:40	Федорович Сергей Дмитриевич (дистанционно) <b>Результаты диагностики стационарного плазменного потока, создаваемого для исследования взаимодействия плазмы с материалом первой стенкой токамака</b>	10. Варшавчик Л.А. <b>Моделирование чистки диагностических зеркал в ВЧ разряде</b>
13:00	Юхнов Николай Михайлович <b>Влияние длительных термоциклических нагрузок на параметры сигнала алмазных детекторов</b>	11. Капустин Ю.В. <b>Инициализация разряда и контроль процесса очистки зеркал диагностической системы «спектроскопия водородных линий» реактора ИТЭР</b>
13:20	Шошин Андрей Алексеевич <b>Тестирование, согласование и серийное производство керамики карбида бора для внутривакуумной защиты портов ИТЭР</b>	12. Суляев Ю.С. <b>Процесс производства экваториального порта №11 ИТЭР в ИЯФ</b>
13:40		13. Образцов И.С. <b>Масс-спектрометрия рабочих и остаточных газов установки токамак Т-15МД</b>
19:00		14. Першин П.В. <b>Импульсный манометрический датчик на основе ионизационной лампы</b>
		15. Архипов И.И. <b>Диагностика газовыделения графитовых плиток защитной облицовки внутренней стенки вакуумной камеры токамака Т-15МД</b>
		<b>ОБЕД</b>
		<b>ЗАКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ</b>

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>Диагностика плазмы ИТЭР</b> .....	<b>35</b>
<b>ITER и TRT – ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА</b> .....	<b>35</b>
<b>ИТЭР. ВРЕМЯ ПЕРЕМЕН</b> .....	<b>37</b>
<b>СТАТУС РАЗРАБОТКИ ДИАГНОСТИК ИТЭР В 2023 ГОДУ</b> .....	<b>39</b>
<b>СТАТУС ДИАГНОСТИКИ "СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ И ПРИМЕСЕЙ" ДЛЯ ИТЭР</b> .....	<b>41</b>
<b>ГАММА-СПЕКТРОМЕТР В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ АНАЛИЗАТОРОВ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ИТЭР</b> .....	<b>43</b>
<b>РАЗРАБОТКА ФИНАЛЬНОГО ПРОЕКТА ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР</b> .....	<b>45</b>
<b>НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР</b> .....	<b>47</b>
<b>СРАВНЕНИЕ ПРИМЕНЯЕМЫХ В КОДАХ SOS И FIDASIM МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТА ГАЛО ДЛЯ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ</b> .....	<b>49</b>
<b>АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРОВ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ НЕЙТРОННЫХ ДИАГНОСТИК ИТЭР</b> .....	<b>52</b>
<b>СВЕТОСИЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР-ПОЛИХРОМАТОР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКОВ</b> .....	<b>54</b>
<b>ИНТЕГРАЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР</b> .....	<b>57</b>
<b>ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ИНТЕНСИВНОСТИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ ИТЭР МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ</b> .....	<b>58</b>

СИНТЕЗ CVD АЛМАЗНЫХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК И СОЗДАНИЕ НА ИХ ОСНОВЕ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БЫСТРЫХ АТОМОВ И НЕЙТРОНОВ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКОВ.....	60
<b>Диагностика плазмы Токамака с Реакторными Технологиями (TRT).....</b>	<b>63</b>
ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ.....	63
КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА TRT .....	65
РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» ДЛЯ УСТАНОВКИ ТРТ .....	66
КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИК ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ TRT .....	68
ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНОЙ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НА ТОКАМАКЕ ТРТ .....	71
КОНЦЕПЦИЯ ДИАГНОСТИКИ MSE ДЛЯ УСТАНОВКИ ТРТ .....	73
ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ДИАГНОСТИКИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT) .....	76
ЗОНДЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С ДИВЕРТОРОМ И ПЕРВОЙ СТЕНКОЙ ТОКАМАКА ТРТ .....	78
КОНЦЕПЦИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ ТРТ .....	81
КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ДОПЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ .....	84

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ФОТОННОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ МОЩНЫХ ПУЧКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ИЯФ СО РАН .....	87
ПАРАБОЛИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ЛИНИЙ В MSE-ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЫ.....	90
ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ТРТ.....	93
РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ТРЕБОВАНИЙ К СОВМЕСТНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ УСТАНОВКИ ТРТ И УПРАВЛЕНИЮ КОНСТРУКТОРСКОЙ И ИНЖЕНЕРНОЙ ДОКУМЕНТАЦИЕЙ В ЕДИНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СРЕДЕ.....	95
ПРИМЕНЕНИЕ КОДА ОРЕНМС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТОКАМАКЕ ТРТ .....	97
ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕРЖАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НЕРЕЗОНАНСНОМ НАКОПИТЕЛЕ.....	99
МОДЕЛЬ ТРТ 2022, ЯДЕРНО-РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. (МОДЕЛЬ 22 8Т, 5МА) .....	101
<b>Инженерные вопросы диагностики плазмы .....</b>	<b>103</b>
ЧИСТОЕ СБОРОЧНОЕ ПОМЕЩЕНИЕ ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИТЭР В ИЯФ СО РАН .....	103
ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИТЭР .....	104
ПИТАНИЕ СИСТЕМЫ ВЧ ОЧИСТКИ ПЕРВЫХ ЗЕРКАЛ ОПТИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИК ИТЭР .....	106
КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ВЫСОКООТРАЖАЮЩИЕ ЗЕРКАЛА НА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 316L(N)-IG ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИТЭР .....	109

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ЗАЩИТНОГО ОКНА И ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ОТ БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩИХ ОСАЖДЕНИЙ .....	112
РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВНУТРИКАМЕРНЫХ УЗЛОВ ПНЕВМОПРИВОДОВ ЗАЩИТНОЙ ШТОРКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ ИТЭР.....	115
АКТУАТОРЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ВАКУУМНОМ ОБЪЁМЕ ИТЭР.....	117
УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОКАМАК МИФИСТ-0: СОСТОЯНИЕ НА 2023 ГОД.....	120
ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ТОКАМАКА МИФИСТ-0.....	122
СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД.....	124
ВЛИЯНИЕ ТОЛСТОСТЕННОЙ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА Т-15МД.....	127
ДИАГНОСТИКА НАДТЕПЛОВОГО И ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД.....	129
СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ И АКТИВНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ Т- 15МД.....	132
ЗОНДОВАЯ ДИАГНОСТИКА ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ Т-15МД .....	134
ИНЖЕНЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ИНДИКАЦИИ ЗАМЫКАНИЙ, ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ И ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ АНАЛИЗА ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА Т-15МД.....	137
РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА, СОЗДАВАЕМОГО ДЛЯ	



ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛОМ ПЕРВОЙ СТЕНКОЙ ТОКАМАКА .....	140
ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОДСИСТЕМ ИТЭР НА ПРИМЕРЕ СТЕНДА ИСПЫТАНИЙ ПОРТ-ПЛАГОВ (PRTF)..	143
ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛА АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ .....	145
ТЕСТИРОВАНИЕ, СОГЛАСОВАНИЕ И СЕРИЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО КЕРАМИКИ КАРБИДА БОРА ДЛЯ ВНУТРИВАКУУМНОЙ ЗАЩИТЫ ПОРТОВ ИТЭР .....	147
ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ С СОБСТВЕННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ .....	149
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ .....	153
ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» ТОКАМАКА ИТЭР ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦИКЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК .....	156
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ В ВЧ РАЗРЯДЕ .....	159
ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ РАЗРЯДА И КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ЗЕРКАЛ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ» РЕАКТОРА ИТЭР .....	162
ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПОРТА №11 ИТЭР В ИЯФ .....	166
МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ РАБОЧИХ И ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ УСТАНОВКИ ТОКАМАК Т-15МД.....	168

ИМПУЛЬСНЫЙ МАНОМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ ИОНИЗАЦИОННОЙ ЛАМПЫ .....	173
ДИАГНОСТИКА ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ГРАФИТОВЫХ ПЛИТОК ЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКИ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ТОКАМАКА Т-15МД.....	175
<b>Спектроскопия плазмы и лазерные методы диагностики ...</b>	<b>178</b>
РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСА СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 .....	178
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОГО РАДИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА L-N ПЕРЕХОД В КОМПАКТНОМ ТОКАМАКЕ .....	181
ДИАГНОСТИКА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 .....	185
МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ИЗЛУЧЕНИЯ НЕЙТРАЛЬНОГО ГЕЛИЯ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 .....	188
СТАТУС ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 .....	192
ПОЛОИДАЛЬНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ТОРОИДАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МЕТОДОМ СХRS И ВОЗМОЖНЫЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ МЕХАНИЗМ НЕОДНОРОДНОСТИ .....	195
ЛАЗЕРНАЯ ГЕТЕРОДИННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ В ДИАГНОСТИКЕ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ .....	197
СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛАЗМЫ В ДИВЕРТОРЕ Т-15МД – ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ..	199
ОБРАБОТКА ДАННЫХ ТОМСОНОВСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА СКОРОСТИ ОТКЛИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ НА ВКЛЮЧЕНИЕ МОЩНОГО ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА В ТОКАМАКАХ .....	201

ЛАЗЕРНО-АССИСТИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В СТЕНКАХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК.....	204
ПРИМЕНЕНИЕ ГЕЛИЕВОГО ТЕРМОМЕТРА В КАЧЕСТВЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РАБОЧЕГО ГАЗА В МАКЕТЕ БПРД .....	207
ДОПЛЕРОВСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В ГЕЛИКОННОМ РАЗРЯДЕ .....	210
ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ СВЕТИМОСТИ ЛИНИЙ АТОМОВ И ИОНОВ ГЕЛИКОННОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ПРОТОТИПА БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ МАТРИЦ ПЕРЕНОСА ЛУЧЕЙ.....	212
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ SWIR КАМЕРЫ В ДИАГНОСТИКЕ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ТОКАМАКЕ Т-15МД .....	215
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСЕННОЙ В ПЛАЗМЕ ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ КОДА РАВНОВЕСИЯ РЕТ, ДИАМАГНИТНЫХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	217
<b>Корпускулярные методы диагностики .....</b>	<b>220</b>
СТАТУС КОРПУСКУЛЯРНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ В ФТИ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ .....	220
КОМПАКТНЫЙ МОНИТОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗОТОПНОГО ОТНОШЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЫ .....	223
ДИАГНОСТИКА БЫСТРЫХ ИОНОВ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2.....	226
ИЗУЧЕНИЕ БЫСТРЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ ГДЛ С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИКИ ПРОДУКТОВ РЕАКЦИИ СИНТЕЗА ДЕЙТЕРИЯ .....	229
ДИАГНОСТИКА НЕЙТРОННЫХ ПОТОКОВ И ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2.....	231

АНАЛИЗ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА DD-НЕЙТРОНОВ HG-24 С ПОМОЩЬЮ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ $LaCl_3(CE)$ И ПАРАТЕРФЕНИЛА .....	233
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИКД ДМНП ИТЭР В УСЛОВИЯХ ОДНОВРЕМЕННОГО ОБЛУЧЕНИЯ DD- И DT- НЕЙТРОНАМИ .....	236
КОНЦЕПЦИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТЕНДА ПЕРСТ ДЛЯ ОТРАБОТКИ БПРД .....	239
ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА АТОМОВ В ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЕ .....	241
РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МАГНИТНОМ СОПЛЕ МАКЕТА БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ .....	244
АНАЛИЗАТОР CNRA-09 НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 .....	246
ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИИ БЫСТРЫХ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-НВ .....	249
ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ИОНОПРОВОДА ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ НА ТОКАМАКЕ T-15МД .....	252
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДЕТЕКТОРА .....	255
<b>Микроволновые и субмиллиметровые методы диагностики .....</b>	<b>257</b>
СОЗДАНИЕ МОЩНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЦР ДИАПАЗОНА .....	257
ГИРОТРОНЫ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ С ШИРОКОПОЛОСНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ПО ЧАСТОТЕ .....	260
ВОЗМОЖНОСТИ ГИРОТРОННОЙ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА МОЩНОГО	

ШИРОКОПОЛОСНОГО МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ .....	263
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОНИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ ДВУХ СВЯЗАННЫХ МОЩНЫХ ГИРОТРОНОВ ДИАПАЗОНА 170 ГГц.....	266
СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ТОКАМАКА Т-15МД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ.....	269
РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКИ НАДТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО СПЕКТРАМ ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ И ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТОКАМАКАХ-РЕАКТОРАХ .....	272
ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЧАСТОТНОГО ДОППЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ МОД НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 .....	276
ДИАГНОСТИКА МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ И ЛСЭ ТЕРАГЕРЦОВОГО ГЕНЕРАТОРА .....	278
РАЗРАБОТКА КВАЗИОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МНОГОЧАСТОТНОГО ГИРОТРОНА В ДИАПАЗОНЕ 175– 250 ГГц.....	281
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИНХРОНИЗАЦИИ ГИРОТРОНА В РЕЖИМЕ ЖЕСТКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО СИГНАЛА.....	284
МОЩНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ W – ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПЛАНАРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ .....	287
МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА НА УСТАНОВКЕ ИТЭР .....	290

ВОЛНОВОДНЫЙ РЕЖЕКТОРНЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ .....	292
СВЕРХМОЩНЫЕ ЧЕРЕНКОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА С ДВУМЕРНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ .....	295
РЕЗОНАТОРЫ С ФАЗОВЫМИ КОРРЕКТОРАМИ ДЛЯ МОЩНЫХ ГИРОТРОНОВ .....	299
<b>Системы сбора и обработка экспериментальных данных....</b>	<b>302</b>
РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	302
СОЗДАНИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ СЕТИ ЦЕНТРОВ ДИСТАНЦИОННОГО УЧАСТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ИТЭР .....	304
ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ДМНП.....	306
АДАПТИВНЫЕ СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ .....	308
СИСТЕМА ИНТЕГРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОГО ВЫВОДА ДЛЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 .....	311
ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СБОРА, ОБРАБОТКИ, ХРАНЕНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ ТОКАМАКА “МИФИСТ-0” .....	314
ГИБРИДНЫЙ КАНАЛ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ИКД ДИАГНОСТИКИ ДМНП.....	317
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАКТОВ КАНАЛА КОНТРОЛЯ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА .....	319

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ПЛОТНОСТЬЮ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ДИСПЕРСИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 .....	321
МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ДИАГНОСТИКИ ВНК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРОВ .....	323
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА СИГНАЛОВ АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАГРУЗКАХ .....	325
АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ИНЖЕКТОРОВ ТОКАМАКА Т-15МД НА ТЕСТ СТЕНДЕ ИРЕК.....	326
ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ВЫХОДНОГО ИМПУЛЬСА ДЕТЕКТОРНОГО МОДУЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР С ПОМОЩЬЮ FPGA .....	329
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ СТЕНДА ПС1 .....	331
РАЗВИТИЕ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА УТС ИССЛЕДОВАНИЙ – ОТ RUSSIAN_FUSION GRID К FUSIONSPACE.RU .....	333
ПОДХОДЫ К СБОРУ, ХРАНЕНИЮ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ УТС-УСТАНОВОК РФ В АИП ИКП .....	336
КОНЦЕПЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ДИАГНОСТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ УСТАНОВКИ ТРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА.....	338
ЕДИНЫЙ РАСЧЁТНЫЙ СЕГМЕНТ ДЛЯ УТС-ИССЛЕДОВАНИЙ .....	340
РАСПОЗНАВАНИЕ ОШИБОЧНЫХ ДАННЫХ ДИАГНОСТИК С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ .....	341

ОБРАБОТКА ДАННЫХ НАУЧНОГО УТС ЭКСПЕРИМЕНТА С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ .....	344
ИМИТАТОР СИГНАЛОВ КАМЕР ДЕЛЕНИЯ ДИВЕРТОРНОГО МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ИТЭР.....	346
ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ВНК С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКИ .....	348
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА .....	350
DEGASUM – ПРОГРАММА СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НЕЙТРОННОЙ, РЕНТГЕНОВСКОЙ И ГАММА ДИАГНОСТИК ПЛАЗМЫ ТОКАМАКОВ.....	352
СИНХРОНИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАГНОСТИКИ ДМНП СО ВРЕМЕНЕМ ИТЭР .....	356
РАЗРАБОТКА НЕЗАВИСИМЫХ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ ИТЭР НА БАЗЕ ПЕРЕМЕННЫХ CODAS ДЛЯ УДАЛЕННЫХ УЧАСТНИКОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ .....	358
ГАЛЬВАНИЧЕСКИ ИЗОЛИРОВАННЫЕ РЕГИСТРАТОРЫ ...	360
АВТОНОМНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА МОДУЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК .....	363
РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА АППАРАТНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ.....	366
ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР В ТЕХНИЧЕСКОМ ПРОЕКТЕ СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ».....	368
«Первая стенка» и взаимодействие с плазмой .....	370



ЭРОЗИЯ ОБРАЩЕННЫХ К ПЛАЗМЕ МАТЕРИАЛОВ ТЯР ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ .....	370
ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЛЬФРАМА В ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКЕ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРА ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА.....	374
ОТДЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЫ И ВЫБОР МАТЕРИАЛА «ПЕРВОЙ СТЕНКИ» .....	378
ОБЗОР РАБОТ В ИЯФ СО РАН ПО ТЕМАТИКЕ ПЛАЗМА-ПОВЕРХНОСТЬ .....	379
КАРБИД БОРА КАК ЗАЩИТНЫЙ МАТЕРИАЛ КОНТАКТИРУЮЩИХ С ПЛАЗМОЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ .....	381
ВЫБОР МАТЕРИАЛА ОБЛИЦОВКИ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ПОКРЫТИЯ .....	384
ПОДГОТОВКА К ИССЛЕДОВАНИЮ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ .....	387
ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ, ПОЛУЧАЕМЫЕ МЕТОДОМ ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ.....	389
ПРОГРАММА НИР ПО РАЗРАБОТКЕ ДИАГНОСТИК ПЕРВОЙ СТЕНКИ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 .....	392
ТЕКУЩИЙ ЖИДКИЙ ЛИТИЙ КАК МАТЕРИАЛ, ОБРАЩЕННЫЙ К ПЛАЗМЕ .....	395
СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛИТИЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СТАЦИОНАРНОГО РАЗРЯДА В ТОКАМАКАХ С ДИВЕРТОРОМ.....	398

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	<b>401</b>
ВОПРОСЫ РЕЦИКЛИНГА ТОПЛИВА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ И ВЫБОРУ МАТЕРИАЛОВ .....	<b>403</b>
АПРОБАЦИЯ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В МАТЕРИАЛАХ ОБЛИЦОВКИ ТОКАМАК-РЕАКТОРОВ.....	<b>407</b>
К ВОПРОСУ ОБ ИССЛЕДОВАНИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С МАТЕРИАЛАМИ ТЯР ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ ВЫСОКОПОТОЧНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ И НЕЙТРОННЫХ ОБЛУЧЕНИЯХ .....	<b>410</b>
УСТАНОВКА ВЕТА: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ .....	<b>412</b>
КАЧЕСТВЕННАЯ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН ПРИ РАЗРУШЕНИИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ НАГРЕВОМ .....	<b>414</b>
ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЛИЦОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ, ОБРАЩЕННЫХ К ПЛАЗМЕ. ....	<b>416</b>
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА В УСЛОВИЯХ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИТЭР....	<b>419</b>
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ ВОЛЬФРАМА, ПОКРЫТОГО ТОНКИМ СЛОЕМ МЕТАЛЛА, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ .....	<b>423</b>
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЕРАМИК В РЕЗУЛЬТАТЕ ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА, ВОЗМОЖНОГО В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОГО УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ.....	<b>427</b>
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ПОТОКОВ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТЬ ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНИ.....	<b>429</b>

**ITER И TRT – ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
ПЛАТФОРМЫ УПРАВЛЯЕМОГО  
ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА**

Красильников А.В.

*Частное учреждение ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР»,  
Москва, Россия, [A.Krasilnikov@iterrf.ru](mailto:A.Krasilnikov@iterrf.ru)*

Создание термоядерного реактора требует разработки термоядерных технологий, которые и обеспечат его эффективную работу. В рамках Проекта ИТЭР на базе достижений развития токамаков, прежде всего в Советском Союзе, а также в США (TFTR) и ЕС (JET) создаётся технологическая платформа реактора и уже формируемой мировой термоядерной промышленности. Технологическая платформа ИТЭР включает: электромагнитную систему из низко-температурных сверхпроводников (TFC & CS - Nb<sub>3</sub>Sn, PFC – Nb-Ti), первую стенку – (Be (W + В<sub>4</sub>С покрытие + боронизация)), W дивертор с напуском Ne, криостат, крионасосы, криогенный комплекс, системы нагрева и безиндукционной генерации тока, реакторосовместимые диагностики, системы сбора и дистанционной обработки данных и управление, экспериментальные модули бридерного blankets, и все вместе комплекс реализации вазистационарного разряда (500 – 3600 сек) термоядерной плазмы с Q=10. В рамках Проекта ИТЭР в Российской Федерации создаются 23 системы.

Но в Проект ИТЭР включены не все требуемые реактору термоядерные технологии: Li первая стенка, генерация стационарного тока, гибридный blanket, ВТСП катушки, испытания материалов т/я реактора, поэтому «Проектным центром ИТЭР в

кооперации ведущими российскими научными центрами – участниками Проекта ИТЭР и разрабатывается Токамак с Реакторными Технологиями (TRT). Концептуальный проект TRT [1] опубликован в специальных номерах журнала «Физика плазмы» (№11 и №12 в 2021 и №8 и №12 в 2022 году). TRT разрабатывается: как плазменный прототип как чистого термоядерного реактора, так и т.я. источника нейтронов для гибридного (синтез-деление) реактора. Миссии и технологическая платформа TRT состоят в: разработке и интеграции в одной установке ключевых инновационных термоядерных технологий (создание дополнительной к ИТЭР технологической платформы TRT): ВТСП электромагнитной системы, работающей при высоком (8Т на оси плазмы) магнитном поле, металлической, В<sub>4</sub>С и литиевой жидкометаллической первой стенки, инновационного дивертора, системы инжекции атомов с энергией 0.5 МэВ и мощностью до 25 МВт, мегаваттных квазистационарных ( $t > 100$  с) гиротронов с частотой 230 ГГц, ИЦН на частотах 60-80 МГц мощностью несколько МВт, системы неиндуктивной генерации тока, тритиевого комплекса, совместимых с термоядерным реактором диагностик, технологии дистанционного управления, технологии поддержания квазистационарных разрядов в плазме с т/я параметрами, пионерском исследовании работы токамака в режиме горения термоядерной плазмы ( $Q > 1$ ) с интенсивным нагревом альфа-частицами в центре плазменного шнура в дейтерий-тритиевых экспериментах. TRT также обеспечит интеграцию технологических разработок ИТЭР в российскую программу УТС.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.23.1014 от 18 января 2023 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

# ИТЭР. ВРЕМЯ ПЕРЕМЕН

Л.Н. Химченко,

*Частное учреждение ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР»,  
Москва, Россия, [l.khimchenko@iterrf.ru](mailto:l.khimchenko@iterrf.ru)*

Проект ИТЭР является важным шагом на пути к термоядерному реактору. На заседании Совета ИТЭР – IC31, было отмечено, что выполнено 78% работ по сооружению инфраструктуры и изготовлению систем установки ИТЭР. Достигнут важный, знаковый, параметр строительства – собран первый сектор вакуумной камеры со сверхпроводящими катушками тороидального магнитного поля, и прошёл «притирку» в шахте токамака.

При этом проект сталкивается с давлением, связанным со сложностью сборки, расширением масштабов проекта, учитывающего дальнейшее развитие за пределами Первой плазмы, замедлением изготовления и поставок наиболее технологически сложных изделий, изменения логистических связей, желанием некоторых участников проекта оптимизировать свои финансовые взносы и т.д. Всё это приводит к сдвигам графика выполнения работ и возможному отодвиганию Первой плазмы.

При создании такой большой и сложной машины, как ITER, трудности и неудачи не являются неожиданностью — они являются неотъемлемой частью изготовления, сборки и установки первых в своем роде компонентов. Спустя два с половиной года после начала этапа сборки токамака, ITER столкнулся с первой серьёзной проблемой, были выявлены дефекты в двух ключевых компонентах токамака - теплозащитных экранах и секторах вакуумной камеры. На исправление также должно уйти время. Это потянуло обсуждение по использованию бериллия, как материала первой стенки, и сомнения в целесообразности подхода “4 Stage Approach”.

Эти и другие проблемы привели к тому, что на последнем Совете ИТЭР – 32 был рассмотрен вопрос изменения т.н. «Базовой линии». Что в конечном итоге может сильно изменить структуру диагностического комплекса.

В таких условиях Россия, кроме программы по созданию термоядерной энергетики, должна иметь свою ключевую установку, нацеленную на проверку технологий термоядерного реактора.

Работа выполнена по государственному контракту с ГК «Росатом» от 18.01.2023 № Н.4а.241.19.23.1014

# СТАТУС РАЗРАБОТКИ ДИАГНОСТИК ИТЭР В 2023 ГОДУ

Звонков А.В., Кравцов Д.Э., Мокеев А.Н., Степанов С.Б.,  
Шестаков Е.А.

*Частное учреждение "ИТЭР-Центр" Госкорпорации Росатом,  
Россия, 123060, г. Москва, ул. Расплетина, д. 11, к. 2.,  
[a.zvonkov@iterrf.ru](mailto:a.zvonkov@iterrf.ru)*

Целью Международного проекта ИТЭР является демонстрация возможности осуществления самоподдерживающейся реакции термоядерного синтеза в установке типа токамак. Поскольку ИТЭР является экспериментальным реактором и учитывая поставленные перед ним задачи, особое внимание уделяется оснащению токамака диагностическими системами, способными проводить измерения в течение всего операционного интервала работы ИТЭР.

Российская Федерация является одним из равноправных членов ИТЭР и вносит свой вклад в его строительство, в том числе в части разработки и поставки диагностических систем. В зоне ответственности Российской Федерации находятся 7 диагностических систем:

- Диверторный монитор нейтронного потока (ДМНП);
- Вертикальная нейтронная камера (ВНК);
- Активная спектроскопия (АС);
- Рефлектометрия со стороны сильного поля;
- Спектроскопия водородных линий (СВЛ);
- Анализатор атомов перезарядки;
- Томсоновское рассеяние в диверторе.

Одна из этих диагностик – СВЛ – является диагностикой первой очереди и требуется к установке на этапе пуска токамака [1].

Также Российской Федерацией разрабатываются специальные конструкции для крепления компонентов диагностик как внутри вакуумной камеры (в порт-плагах), так и

снаружи (в порт-камере). Данные конструкции должны обеспечивать надежное размещение диагностических систем во время их штатной работы, обслуживания и при нештатных ситуациях. Часть конструкций являются критически важными для обеспечения безопасной эксплуатации токамака. Всего разрабатываются крепления для 5 портов ИТЭР.

В докладе представлен текущий статус разработки и изготовления диагностик и порт-плаггов ИТЭР, находящихся в зоне ответственности Российской Федерации.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта от 18.01.2023 № Н.4а.241.19.23.1014.

### **Литература**

- [1]. Прогресс в разработке диагностической системы Спектроскопия водородных линий (СВЛ) ИТЭР, Шестаков Е.А., Алексеев А.Г., Асадулин Г.М., Вуколов Д.К., Горшков А.В., Драпико Е.А., Капустин Ю.В., Качкин А.Г., Морозов А.А., Орловский И.И., Рогов А.В., XIX Всероссийская конференция Диагностика высокотемпературной плазмы. Тезисы докладов. 27 сентября – 1 октября 2021 г.



# СТАТУС ДИАГНОСТИКИ "СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ И ПРИМЕСЕЙ" ДЛЯ ИТЭР

Алексеев А.Г.<sup>1,2</sup>, Вуколов Д.К.<sup>1,2</sup>, Горшков А.В.<sup>1,2</sup>,  
Орловский И.И.<sup>1,2</sup>, Морозов А.А.<sup>1,2</sup>, Андреев Е.Н.<sup>1,2</sup>,  
Асадулин Г.М.<sup>1,2</sup>, Ахтырский С.В.<sup>1,2</sup>, Афанасенко Р.С.<sup>1,2</sup>,  
Храменков А.В.<sup>1,2</sup>, Вуколов К.Ю.<sup>1,2</sup>, Карпушов И.Д.<sup>1</sup>,  
Качкин А.Г.<sup>1,2</sup>, Проценко Д.Е.<sup>1,2</sup>, Рогов А.В.<sup>1,2</sup>, Капустин Ю.В.<sup>1,2</sup>,  
Федоров Д.А.<sup>2</sup> Шестаков Е.А.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>УТС-Центр, Москва, Россия, [alex\\_ag@triniti.ru](mailto:alex_ag@triniti.ru)

<sup>2</sup>НИИ «Курчатовский Институт», Москва, Россия,

[Alekseev\\_AG@nrcki.ru](mailto:Alekseev_AG@nrcki.ru)

<sup>3</sup>Частное Учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

Спектроскопия водородных линий и примесей ИТЭР входит в список первоочередных диагностик, требуемых для запуска установки на этапе получения первой плазмы, и несет основную ответственность (Primary role) за измерение таких параметров как потоки изотопов водорода и примесей из первой стенки, регистрацию ELM и L-H-переходов с высоким пространственным и временным разрешением. Диагностика включает 3 оптических канала, обеспечивающих обзор по крайней мере одного из модулей первой стенки в каждом из 18 рядов бериллиевых бланкета. Два канала с полоидальным обзором расположены в экваториальном порту №11, и один тангенциальный канал – в экваториальном порту №12. Оба порта относятся к первоочередным, устанавливаемым полностью укомплектованными к первой плазме. Описание основных подсистем диагностики приведено в [1], [2]**Ошибка! Источник ссылки не найден..**

Согласно исходным планам запуска ИТЭР в 2025г, разработка и изготовление компонент диагностики велась в условия предельно сжатых сроков и постоянно меняющихся требований к интерфейсам, пространственным ограничениям и

сопроводительной документации. Учитывая статус портов 11 и 12, приоритетной задачей ставилась скорейшая разработка, изготовление и поставка внутривакуумного оборудования (узлы входного зеркала, оптического лабиринта, пневмопривода и передаточного механизма шторки для всех 3 каналов) на площадки порт-интеграторов в 2023г. Техническое (финальное) проектирование этих 12 конструктивно различных узлов проводилось одновременно с непрерывным уточнением интерфейсных ограничений и нагрузок в течение 2017-2020гг, требующих соответствующих корректировок и дополнительных расчетов. Защита финального проекта (FDR) этих компонент состоялась в феврале 2021г, и дальнейшая работа по доработке и утверждению проекта, подготовке и экспертизе производственной документации, квалификации спецпроцессов, испытанию прототипов и т.п. была проведена в предельно сжатые сроки. Основная часть деталей внутривакуумных компонент была изготовлена в 2022г, сборка и испытания проводятся в 2023-24гг.

В докладе представлены основные результаты работ по проектированию, изготовлению и испытаниям компонент диагностики, суммирован накопленный опыт, определены дальнейшие планы по разработке вневакуумных подсистем.

### **Литература**

- [1]. A.Gorshkov, et al, Fusion Engineering and Design 146 (2019), 329-335. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.061>
- [2]. 55.E2\_System\_Design\_Description\_(DDD), ITER\_D\_74SPFY v.1.1.

# ГАММА-СПЕКТРОМЕТР В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ АНАЛИЗАТОРОВ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ИТЭР

<sup>1</sup>Шевелев А.Е., <sup>1</sup>Хилькевич Е.М., <sup>1</sup>Бахарев Н.Н., <sup>1</sup>Скрекель О.М.,  
<sup>1</sup>Дойников Д.Н., <sup>1</sup>Найденев В.О., <sup>1</sup>Афанасьев В.И., <sup>1</sup>Лебедев С.В.,  
<sup>1</sup>Мельник А.Д., <sup>1</sup>Мионов М.И., <sup>1</sup>Наволоцкий А.С.,  
<sup>1</sup>Несеневич В.Г., <sup>1</sup>Петров М.П., <sup>1</sup>Петров С.Я., <sup>1</sup>Соколов Р.В.,  
<sup>1</sup>Чернышев Ф.В., <sup>1</sup>Шмитов Р.Ю., <sup>2</sup>Кормилицын Т.М.,  
<sup>2</sup>Мокеев А.Н., <sup>2</sup>Родионов Р.Н., <sup>3</sup>Маринин Г.В.

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия, [post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)

<sup>2</sup> Частное учреждение ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия, [support@iterrf.ru](mailto:support@iterrf.ru)

<sup>3</sup>ООО «РУССКИЕ ТЕХНОЛОГИИ», Санкт-Петербург, Российская Федерация, [techster@gmail.com](mailto:techster@gmail.com)

Доклад посвящен разработке гамма спектрометра в составе системы анализаторов атомов перезарядки (НРА) ИТЭР [1]. Главная задача спектрометра - предоставление информации об энергетическом распределении удерживаемых альфа-частиц и других быстрых ионов. Помимо этого, спектрометрические измерения жёсткого рентгеновского излучения в МэВ-ном диапазоне энергий позволяют получить информацию о формировании пучка убегающих электронов, что является важнейшей задачей для обеспечения безопасной эксплуатации термоядерных реакторов [2].

Гамма-спектрометр размещен в портовой ячейке экваториального порта ИТЭР №11 в нейтронной ловушке за НРА низких энергий (LENPA) [1]. Нейтронная ловушка представляет собой сплошной стальной цилиндр, в задней части которого в специальных нишах установлены два детектора - полупроводниковый HPGe и сцинтилляционный LaBr<sub>3</sub>(Ce). Перед детекторами находится нейтронный attenuator, представляющий собой полый стальной цилиндр, заполненный прессованными таблетками гидрида лития. Attenuator обеспечивает высокий коэффициент ослабления потока быстрых нейтронов 10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup>, в то

время как для гамма-квантов в МэВ-диапазоне энергий коэффициент ослабления составляет около 10. Энергетическое разрешение HPGe-детектора (2,1 кэВ на линии 1,33 МэВ) позволяет анализировать доплеровски-уширенную гамма-линию 4,44 МэВ из реакции  ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ , и/или линии 3,09, 3,68, 3,58 МэВ из реакции  ${}^{10}\text{B}(\alpha, p\gamma){}^{13}\text{C}$  с целью восстановления энергетического распределения удерживаемых альфа-частиц в диапазоне 1,5-3,5 МэВ. Измерения гамма-излучения с энергией 16,7 МэВ из реакции  $\text{D}(t, \gamma){}^5\text{He}$  дают информацию о мощности термоядерного синтеза в видимом для гамма-детекторов объеме плазмы. Также следует отметить важную роль гамма-спектрометра в предоставлении информации об активации материалов камеры токамака, которая может быть получена при анализе результатов измерения фонового излучения.

Гамма-детекторы оснащены современной системой сбора данных на основе высокоскоростных оцифровщиков сигнала. Для обработки сигнала с разделением наложенных импульсов и построения амплитудных спектров разработаны алгоритмы, позволяющие получать энергетические спектры при загрузке  $\sim 3 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$  для детектора  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ , и  $\sim 3 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$  для детектора HPGe.

В докладе представлен обзор технических решений, использованных в разработке гамма-спектрометра в составе системы анализаторов атомов перезарядки ИТЭР. Представлены результаты расчетов сигналов детекторов при регистрации 16,7 МэВ гамма-квантов из D-T реакции синтеза, а также сигналов из реакций между быстрыми ионами и легкими примесями в плазме ИТЭР. Проведена оценка потоков фонового нейтронного и гамма излучения.

Взгляды и мнения, выраженные в докладе, не обязательно отражают взгляды и мнения Организации ИТЭР.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № N.4a.241.19.23.1014 от 18.01.2023 между Госкорпорацией «Росатом» и Частным учреждением «ИТЭР-Центр».

## Литература

- [1]. V.I. Afanasyev, et al., JINST 17 (2022) C070019
- [2]. A.E. Shevelev, et al., Nucl. Fusion 61 (2021) 116024

# РАЗРАБОТКА ФИНАЛЬНОГО ПРОЕКТА ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР

Немцев Г.Е., Родионов Р.Н., Ревякин П.А., Юхнов Н.М.,  
Степанов С.Б, Голачев В.М., Жаров А.С., Нагорный Н.В.,  
Гужев Д.И.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Российская Федерация, [g.nemtsev@iterrf.ru](mailto:g.nemtsev@iterrf.ru)*

В работе представлен обзор диагностики Вертикальная нейтронная камера (ВНК) [1] токамака ИТЭР. ВНК - многоканальный нейтронный коллиматор, предназначенный для измерения пространственного распределения интенсивности нейтронного источника.

Диагностическая система ВНК находится в завершающей стадии разработки: проведены основные конструкторские работы и ведется подготовка диагностики к производству, начало которого запланировано в 2024 году. Завершена разработка блока детектирования быстрых нейтронов, состоящего из двух алмазных детекторов и двух ионизационных камер деления. Успешно выполнены испытания нейтронных детекторов в условиях, приближенных к условиям в каналах коллиматоров ВНК: высокоинтенсивные радиационные поля, высокая температура, длительные термоциклические нагрузки. Экспериментально определено влияние условий эксплуатации на параметры детекторов: чувствительность к быстрым нейтронам и энергетическое разрешение. Изготовлены и испытаны макеты основных критических элементов диагностической системы: линии связи, включающие кабели с минеральной изоляцией, электроника предварительного усиления, аналоговая оптическая гальваническая развязка, герметические защитные кожухи детекторов. Завершается разработка системы сбора данных ВНК, позволяющая измерять плотность потока нейтронов на детекторе в реальном времени с 1 мс разрешением в широком

динамическом диапазоне. Создан алгоритм восстановления профиля плазменного нейтронного источника по показаниям детекторов ВНК.

На основании результатов проделанной работы в 2023 году в Международной Организации ИТЭР предполагается проведение одного из этапов защиты финального проекта ВНК.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.23.1014 от 18 января 2023 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

### **Литература**

- [1]. Concept Design and Integration Aspects of ITER Vertical Neutron Camera / L. Bertalot [et al.] // Proceedings of Science. — 2015.

# НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР

Родионов Р.Н., Немцев Г.Е., Ревякин П.А.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», г. Москва, Россия,  
[P.Reviakin@iterrf.ru](mailto:P.Reviakin@iterrf.ru)*

ИТЭР – проект международного экспериментального термоядерного реактора на основе токамака, задачей которого является достижение состояния длительного горения ДТ плазмы с десятикратным превышением термоядерной мощности над вкладываемой мощностью нагрева. Поэтому компоненты диагностических систем ИТЭР неизбежно будут подвергаться значительным радиационным нагрузкам.

В работе представлены результаты нейтронно-физического анализа Вертикальной нейтронной камеры (ВНК) [1] – диагностической системы ИТЭР, предназначенной для измерения пространственного распределения интенсивности нейтронного источника плазмы. Расчёты проводились для стандартного сценария ДТ-плазмы ИТЭР (500 МВт).

С помощью вычислительного алгоритма на основе метода Монте-Карло был рассчитан перенос нейтронного излучения, а также получено распределение интенсивности вторичных гамма-квантов. На основе полученных значений плотностей потоков нейтронного и гамма-излучений рассчитано пространственное распределение источников радиационного нагрева конструкции ВНК. С помощью кода FISPACT [2], была рассчитана динамика активности компонентов диагностики, а также было определено пространственное распределение мощности эквивалентной дозы излучения по методике R2S [3] после остановки реактора.

В работе были получены значения долей прямых и рассеянных нейтронов в каналах коллиматоров. На основе рассчитанных спектров нейтронов были определены отклики и скорости счета детекторов ВНК – ионизационных камер деления и полупроводниковых алмазных детекторов.

Актуальной задачей, стоящей при разработке диагностики ВНК, является размещение электроники предварительного усиления сигналов детекторов в зоне повышенного радиационного фона, что требует ее защиты. Поэтому в работе был выполнен анализ ослабления полей нейтронного и гамма-излучений различными материалами и оценены необходимые толщины стенок проектируемого защитного шкафа.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.23.1014 от 18 января 2023 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

### Литература

- [1]. Bertalot L. et al. (2015). Concept Design and Integration Aspects of ITER Vertical Neutron Camera. Proceedings of Science, 2015 – January. DOI: <https://doi.org/10.22323/1.240.0090>
- [2]. Sublet J.-Ch. et al. (2017). FISPACT-II: An Advanced Simulation System for Activation, Transmutation and Material Modelling. Nuclear Data Sheets, 2017 – January, vol. 139, p.77-137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2017.01.002>
- [3]. Kumpilov D. et al. (2019). Activation of ITER Divertor Neutron Flux Monitor, Journal of Instrumentation 14 C11019. DOI: 10.1088/1748-0221/14/11/C11019



# СРАВНЕНИЕ ПРИМЕНЯЕМЫХ В КОДАХ SOS И FIDASIM МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТА ГАЛО ДЛЯ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Павлова Г.С., Тугаринов С.Н., Шабашов А.Ю.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия, [g.pavlova@iterrf.ru](mailto:g.pavlova@iterrf.ru)*

Активная спектроскопия (АС) используется на токамаках для измерения параметров высокотемпературной плазмы [1][1]. Она позволяет определять концентрацию, температуру и скорость направленного движения ионов плазмы с помощью анализа спектра перезарядочного излучения этих ионов. Это излучение возникает при перезарядке лёгких ионов плазмы на высокоэнергетическом пучке атомов. В результате перезарядки электроны от атомов пучка переходят к полностью ионизованным лёгким примесям плазмы, и образовавшиеся водородоподобные ионы излучают линейчатый спектр.

Определение параметров плазмы по спектральной линии активной перезарядки может быть затруднено из-за влияния различных эффектов, которые искажают форму линии. Ожидается, что в условиях токамака ИТЭР влияние одного из таких эффектов – эффекта гало – может оказаться очень существенным [3, 4]. Суть этого эффекта заключается в следующем: протоны плазмы перезаряжаются на атомах пучка, образуя вокруг него облако атомов водорода – гало пучка. Гало пучка, как и сам пучок, служит донором электронов для полностью ионизованных легких примесей плазмы и приводит к появлению дополнительного излучения перезарядки, которое увеличивает интенсивность спектральной линии активной перезарядки. Для верного определения концентрации ионов доля излучения гало в спектральной линии активной перезарядки

должна быть известна. Она может быть оценена с помощью моделирования.

Для моделирования АС часто применяют коды Simulation of Spectra (SOS) [5] или FIDASIM [6]. В них используются разные методы для расчёта концентрации атомов в плазме и интенсивности спектральных линий: в FIDASIM применяются метод Монте-Карло и столкновительно-излучательная модель, в то время как в SOS используются эффективные скоростные коэффициенты возбуждения переходов и сечения ослабления пучка, взятые из базы данных ADAS [7]. Данная работа посвящена сравнению результатов моделирования эффекта гало в кодах SOS и FIDASIM, в ходе которого были обнаружены и объяснены существенные различия в интенсивности смоделированных спектральных линий, а также сделаны выводы о применимости моделей, используемых в кодах, для моделирования спектральной линии активной перезарядки и излучения гало в условиях токамака ИТЭР. Были оценены ошибки, вносимые эффектом гало в определение параметров плазмы, в том числе и с учётом зависимости сечения перезарядки от энергии столкновения [8].

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 14.02.2022 № Н.4а.241.19.22.1123 "Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2022 году".

## Литература

- [1]. R. J. Fonck, D. S. Darrow, and K. P. Jaehnig, Phys. Rev. A 29, 3288 (1984).
- [2]. R. C. Isler, Plasma Phys. Controlled Fusion 36, 171 (1994).
- [3]. B.C. Stratton, R.J. Fonck, A.T. Ramsey, E.J. Synakowski, B. Grek, K.W. Hill, D.W. Johnson, D.K. Mansfield, G. Park, G. Taylor, Nuclear Fusion 30, 675 (1990).
- [4]. R. Dux, B. Geiger, R. M. McDermott, T. Pütterich, E. Viezzer and ASDEX Upgrade team, 39th EPS Conference & 16th Int. Congress on Plasma Physics P2.049 (2012).

- [5]. M. von Hellermann, M. de Bock, O. Marchuk, De. Reiter, S. Serov and M. Walsh, *Atoms* 7, 30 (2019).
- [6]. B. Geiger, L. Stagner, W.W. Heidbrink, R. Dux, R. Fischer, Y. Fujiwara, A.V. Garcia, A. S. Jacobsen, A. Jansen van Vuuren, A. N. Karpushov, D. Liu, P. A. Schneider, I. Sfiligoi, P. Zs. Poloskei, and M. Weiland, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 62, 105008 (2020).
- [7]. H. P. Summers, The ADAS User Manual, <http://www.adas.ac.uk/>.
- [8]. M. von Hellermann, P. Breger, J. Frieling, R. Konig, W. Mandl, A. Maas, and H. Summers, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 37, 71 (1995).

# АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРОВ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ НЕЙТРОННЫХ ДИАГНОСТИК ИТЭР

Т. М. Кормилицын<sup>1</sup>, С. Ю. Обудовский<sup>1</sup>, Р. Н. Родионов<sup>1</sup>,  
А. В. Панкратенко<sup>1</sup>, Д. С. Фридрихсен<sup>1</sup>, А. В. Красильников<sup>1</sup>,  
Ю. А. Кашук<sup>1</sup>, С. В. Сыромуков<sup>2</sup>, Д. И. Юрков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

<sup>2</sup>ФГУП «ВНИИА», Москва, Россия

В работе обсуждаются характеристики генераторов быстрых нейтронов для целей калибровки диагностики термоядерных нейтронов. Системы нейтронной диагностики современных термоядерных установок с магнитным удержанием плазмы полагаются на точную калибровку детекторов как до их установки, так *in situ*. Для этой деятельности необходим хорошо исследованный источник быстрых нейтронов со значительным нейтронным выходом и энергетическим спектром, соответствующим спектру высокотемпературной дейтериевой или дейтериево-тритиевой плазмы. Оптимальным решением этой задачи является дистанционно управляемый генератор быстрых нейтронов. Объектом данного исследования являются компактные нейтронными генераторами с запаянными трубками как D-D, так и D-T. В рамках характеристики этих источников проведено детальное моделирование нейтронных генераторов методом Монте-Карло, включая состав ионного пучка, замедление ионов в мишени и распределение плотности ядер мишени по глубине. Эти данные необходимы для расчета модели источника нейтронов, зависящей от угла и энергии. В работе обсуждается интегрированный подход к характеристике с точки зрения как полного выхода нейтронов, так и спектра нейтронов, зависящего от угла. Этот подход основан на активационных фольгах и нейтронных спектрометрах - сцинтиллятор LaCl<sub>3</sub>(Ce) (ø25,4×25,4 мм) и CVD-алмазный детектор (4×4×0,5 мм)

использовались для исследования полей излучения D-D (до  $10^9$  н/с) и D-T (до  $10^{11}$  н/с) источников соответственно. Оба спектрометра имеют классическую функцию отклика на быстрые нейтроны, обусловленную реакциями  $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}_{g.s.}$  и  $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$  соответственно. Функции отклика спектрометров, рассчитанные с помощью GEANT4, позволили нам проверить наши предположения о распределении источников нейтронов с использованием подхода прямого моделирования. На основании оценки модели ионного пучка отношение молекулярных ионов к атомарным ионам составило  $\sim 19:1$ , что согласуется с характеристиками источников Пеннинга. В работе показан проект системы контроля выхода ПГ, состоящей из предлагаемых нейтронных спектрометров и дополнительных счётчиков. В ходе испытаний показано, что выход нейтронного генератора колеблется в пределах 2,5% в течение 8-часовой рабочей смены. Надежность и стабильность таких источников вкупе с предложенным подходом к мониторингу явно выделяют нейтронные генераторы с запаянной трубкой на фоне других средств калибровки нейтронной диагностики термоядерной плазмы.

Работа выполнена в рамках соглашения между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Организацией ИТЭР Implementing Agreement № 1 (ITER ref. IO/21/СТ/4300002349) от 20 октября 2020 «Research and Detailed Design Development of the components needed for Neutron Generators suitable for ITER in-situ neutron calibration».

# СВЕТОСИЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР-ПОЛИХРОМАТОР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКОВ

Кузьмин Н.В.<sup>1</sup>, Звонков А.В.<sup>1</sup>, Науменко Н.Н.<sup>2</sup>, Павлова Г.С.<sup>1</sup>, Макаренко И.А.<sup>1</sup>, Серов В.В.<sup>1</sup>, Иванов Д.А.<sup>1</sup>, Тугаринов С.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Частное учреждение «ИТЭР-Центр», г. Москва, ул. Расплетина д.11 к.2, 123060, Россия, [n.kuzmin@iterrf.ru](mailto:n.kuzmin@iterrf.ru)

<sup>2</sup>ЗАО «Солар», г. Минск, ул. Платонова, 1Б, 220034, РБ

В докладе описан усовершенствованный прототип спектрометра-полихроматора высокого разрешения (СПВР), разработанного для спектроскопической диагностики плазмы, в частности, для активной спектроскопической диагностики на установках ИТЭР [1], EAST [2] и, в перспективе, для токамака с реакторными технологиями TRT [3].

Активная спектроскопия (АС, CXRS – Charge eXchange Recombination Spectroscopy) позволяет измерять ионную температуру плазмы, скорость ее тороидального и полоидального вращения, концентрацию легких примесей (в том числе гелиевой зо́лы) по всему сечению плазменного шнура с высоким пространственным и временным разрешением.

Локальное возбуждение свечения плазмы достигается за счет инжекции высокоэнергетического пучка нейтральных атомов и последующей перезарядки «голых» ядер примесей на атомах пучка, приводящей к возникновению водородоподобных ионов примесей, излучающих характеристические линии: Н I 656.3 нм; He II 468.6 нм; Be IV 465.8 нм; С VI 529.1 нм; О VIII 606.9 нм; Ne X 524.9 нм и другие.

Оптическая система сбора света диагностики АС строит изображение плазменного шнура на входном торце световодного коллектора, по которому свет передается на СПВР-спектрометры, находящиеся в лабораторном помещении. Спектральные профили излучения плазмы регистрируются одновременно в трех спектральных диапазонах: 468±5 нм, 529±5 нм и 656±6 нм.

В основе описываемого СПВР-спектрометра лежат три пропускающие голограммные дифракционные решетки, обеспечивающие одновременную регистрацию спектров в вышеуказанных спектральных диапазонах. Регистрация спектров производится с использованием высокопроизводительных компактных двумерных научных КМОП-камер с низким уровнем шумов, широким динамическим диапазоном, высокой квантовой эффективностью и непрерывной регистрацией кадров.

Разработанный алгоритм обработки регистрируемых 2D-спектров позволяет программно компенсировать возникающую кривизну спектральных линий, что позволяет производить их последующий вертикальный биннинг для улучшения соотношения сигнал-шум. Использование этого алгоритма позволяет использовать прямую входную щель на СПВР, а также прямые волоконные сборки, идущие на входную щель.

В результате лабораторного тестирования разработанного СПВР были измерены его следующие основные технические параметры:

- Рабочие спектральные диапазоны:  $468 \pm 5$  нм,  $529 \pm 5$  нм и  $656 \pm 6$  нм;
- Относительное отверстие: F/3;
- Прямая входная щель высотой 20 мм;
- Оптическое уменьшение в обеих плоскостях: 1.5 раза;
- Размер плоскости изображения:  $13.3 \times 13.3$  мм;
- Обратная линейная дисперсия:  $0.48/0.52/0.67$  нм/мм (для  $468/530/656$  нм);
- Предельное спектральное разрешение: 0.01 нм;
- Полное пропускание спектрометра: 0.26–0.3;
- Период следования кадров: от 11 мс до 10 с;
- Линейность отклика камер во всем динамическом диапазоне;
- Режим непрерывной регистрации кадров: период следования кадров не превышает время экспозиции более чем на 1 мкс;
- Глубина потенциальной ямы камер:  $54000 e^-$ ;
- Калибровочный коэффициент для камер:  $\approx 0.8$  фотонов/отсчет;
- Межканальный контраст спектрометра: 774000.

В результате лабораторного тестирования трехдиапазонного спектрометра-полихроматора, установлено соответствие характеристик разработанного спектрометра требованиям, предъявляемым к спектроскопическому оборудованию, необходимому для реализации активной спектроскопической диагностики на установке ИТЭР [1], а также потенциально и на других токамаках (EAST, TRT).

Описанный трехдиапазонный спектрометр-полихроматор был создан для определенной прикладной задачи. Однако, используя описанный принцип и схему работы спектрометра-полихроматора, можно создавать спектральные приборы для широкого круга прикладных задач.

Исследования выполнены при финансовой поддержке ГК № Н.4а.241.19.22.1123 "Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2022 году" от 14.02.2022.

## Литература

- [1]. Measurement performance assessment for the ITER CXRS Edge diagnostic system // Serov S.V., De Bock M., von Hellermann M.G., Tugarinov S.N. // *Rev. Sci. Instrum*, vol. 92, №5, p. 053517, 2021, doi: 10.1063/5.0042029
- [2]. Toroidal charge exchange recombination spectroscopy on EAST // M.Y. Ye, Y.Y. Li, Y.Yu, Y.J. Shi, B. Lyu, J. Fu, X.W. Du, X.H. Yin, Y. Zhang, Q.P. Wang, and B.N. Wan // *Fusion Eng. Des.* 96–97, pp. 1017–1020, 2015, doi: 10.1016/j.fusengdes.2015.02.063
- [3]. Разработка диагностической системы “Активная Спектроскопия” (CXRS) для установки TRT // Серов С.В., Тугаринов С.Н., Серов В.В., Крупин В.А., Земцов В.А., Красильников А.В., Кузьмин Н.В., Павлова Г.С., Науменко Н.Н. // *Физ. Плаз.*, т. 48, №8, стр. 700–710, 2022, doi: 10.31857/S0367292122100262



# ИНТЕГРАЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР

<sup>1</sup>Таскаев А. С., <sup>1</sup>Иванцовский М. В., <sup>1</sup>Бурдаков А. В.,  
<sup>1</sup>Шиянков С. В., <sup>1</sup>Рыжанков И. С., <sup>1</sup>Гавриленко Д. Е.,  
<sup>1</sup>Серёмин В. В., <sup>2</sup>Г.Е. Немцев

<sup>1</sup>*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, РФ*

<sup>2</sup>*Частное учреждение ГК «РосАтом» «Проектный центр  
ИТЭР», Москва, РФ*

Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК) для установки ИТЭР будет состоять из двух частей, в каждой из которых будет располагаться по шесть детекторных узлов, объединенных в герметичные диагностические модули, снабжённые системой сервисного вакуума и системой водяного охлаждения. Верхняя ВНК будет установлена в верхний порт (ВП) №18 и должна являться составной частью ДЗМ этого порта, нижняя ВНК устанавливается в нижний порт (НП) №14.

В данном докладе демонстрируется прогресс развития дизайна верхней и нижней ВНК. Помимо внутривакуумной части, в которую входит основная часть диагностики ВНК, разработка идёт и над вневакуумной частью – необходимо защитить от внешнего воздействия блоки с электроникой, отвечающими за получение информации с детекторов. Данная защита состоит из трёх слоёв – внутренний из металла ARMCO, средний из пластин вольфрама и внешний из кирпичей карбида бора.

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ИНТЕНСИВНОСТИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ ИТЭР МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Жаров А.С., Родионов Р.Н.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,  
[a.zharov@iterrf.ru](mailto:a.zharov@iterrf.ru)*

Главная цель токамака ИТЭР – продемонстрировать возможность создания и удержания дейтерий-третиевой плазмы с термоядерной мощностью, превышающей мощность внешнего нагрева в 10 раз [1]. Одной из систем нейтронной диагностики токамака ИТЭР является Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК), предназначенная для измерения пространственного распределения интенсивности нейтронного излучения и плотности термоядерной мощности плазмы в полоидальном сечении [2]. Для решения данной задачи ВНК оснащена нейтронными детекторами, наблюдающими плазму через 11 нейтронных коллиматоров (6 верхних и 5 нижних).

В работе рассмотрена задача восстановления пространственных профилей интенсивности источников DD и DT нейтронов плазмы с помощью применения искусственных нейронных сетей (ИНС). ИНС являются в настоящий момент одним из перспективных методов решения задач томографии плазмы [3, 4]. Высокая скорость работы ИНС по сравнению с традиционными методами делает возможным проведение томографии в режиме реального времени, что особенно важно с появлением токамаков с высоким нейтронным выходом. Задача томографии плазмы является существенно недоопределённой, и поэтому требует привлечения дополнительной априорной информации об источнике. В данной работе использовалась априорная информация о форме магнитных поверхностей.

Обучение ИНС проводилось на синтетической выборке, сгенерированной с помощью набора расчётных профилей интенсивностей нейтронных источников плазмы и расчётных проекционных матриц для нейтронных детекторов ВНК.

Проекционные матрицы позволяют рассчитать ожидаемые скорости счёта нейтронных детекторов для заданного профиля нейтронного источника плазмы с учётом рассеяния нейтронов на конструкции токамака.

В работе проведено сравнение точности восстановления профилей нейтронного источника методом ИНС и методом максимального правдоподобия (ММП), представленного в работе [5]. Было установлено, что ИНС могут достигать высокого уровня точности восстановления профилей интенсивности источников нейтронов плазмы, сопоставимого с результатами, полученными ММП. При этом время, затрачиваемое на решение задачи томографии, значительно сокращается. В качестве метрик качества применены относительное среднеквадратичное отклонение, а также индекс структурного сходства (SSIM) и пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR), которые активно применяются в задачах обработки изображений.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № Н.4а.241.19.23.1014 от 18 января 2023 года: «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

### **Литература**

- [1]. Bigot B. Progress toward ITER's first plasma // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. P. 112001.
- [2]. Bertalot L., et al. Concept design and integration aspects of ITER vertical neutron camera // Proceedings of Science. 2015. P. 090.
- [3]. E. Ronchi et al. Neural networks based neutron emissivity tomography at JET with real-time capabilities // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. (2010).
- [4]. D. D. Carvalho, et al. Deep neural networks for plasma tomography with applications to JET and COMPASS // Journal of Instrumentation 14, C09011 (2019) // DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/09/C09011>
- [5]. Rodionov R., Nemtcev G., Krasilnikov A. Fusion neutron emissivity tomography for ITER Vertical Neutron Camera // Nucl. Instrum. Meth. A. 2022. V. 1040. P. 167127.

# СИНТЕЗ CVD АЛМАЗНЫХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК И СОЗДАНИЕ НА ИХ ОСНОВЕ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БЫСТРЫХ АТОМОВ И НЕЙТРОНОВ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКОВ

Кириченко А.Н., Красильников А.В., Родионов Н.Б.,  
Родионова В.П., Трапезников А.Г., Ярцев В.П.,  
Хмельницкий Р.А., Мещанинов С.А., Амосов В.Н.

<sup>1</sup>*Проектный центр ИТЭР Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”, Москва, Россия.*

[n.rodionov@iterrf.ru](mailto:n.rodionov@iterrf.ru)

Высокая радиационная стойкость, возможность работать при повышенных температурах, высокие подвижность и эффективность сбора носителей заряда, прочность и химическая инертность являются наиболее важными свойствами алмаза для создания детекторов ионизирующих излучений.

Детекторы с алмазным чувствительным элементом использовались в нейтронной диагностике [1] для регистрации энергетических спектров термоядерных нейтронов на установках токамак и для регистрации энергетических спектров быстрых атомов перезарядки горячей плазмы [2].

В работе [3] сообщается о первом в ”Проектном центре ИТЭР“ опыте синтеза гомоэпитаксиальных тонких пленок CVD-алмаза толщиной несколько десятков микрометров (~70-80 мкм) на сильно легированных бором (*p*-типа) НРНТ подложках. В [3] была достигнута эффективность сбора зарядов 92% для альфа частиц и 91% для 14,7 нейтронов. Представляемая работа является продолжением исследований, цель которых повышение кристаллического качества и эффективности сбора заряда синтезируемых гомоэпитаксиальных CVD алмазных пленок на борированных подложках, используемых в качестве чувствительных элементов детекторов ионизирующего излучения.

Методом осаждения из газовой фазы в смеси водорода с метаном в реакторе «АРДИС» на легированных бором

монокристалльных подложках алмаза (концентрация бора ~100 ppm) были синтезированы эпитаксиальные алмазные пленки высокого кристаллического совершенства толщиной 75-118 мкм.

Для оценки структурного совершенства и содержания примесей синтезированных алмазных пленок на подложках было проведено комплексное исследование методами оптической спектроскопии.

По данным оптической спектроскопии CVD алмазные пленки обладают низким содержанием примесей в виде азотно-вакансионных центров (менее 5 ppb) и SiV центров (интенсивность бесфононных линий NV (575 и 637 нм) и SiV (738 нм) центров в 300 раз меньше интенсивности основной алмазной линии) и высоким кристаллическим совершенством (полная (ширина алмазной линии на половинной высоте составила  $2,2 \text{ см}^{-1}$ ) (рисунок 1).

Из отобранных спектрометрическими методами плёнок путем напыления металлических (35 нм) контактов на ростовые поверхности плёнок и помещения их в корпуса с прижимными контактами были изготовлены детекторы ионизирующих излучений. Эффективность сбора заряда (до 97 %) и энергетическое разрешение в вакууме (0,8%) детектора были измерены в потоках 5.5 МэВ-ных альфа-частиц (приконтактная генерация носителей). Для 14 МэВ-ных нейтронов (объёмная генерация) эффективность сбора заряда составила (до 97 %) с энергетическим разрешением (до 5 %), при этом чувствительность по реакции ( $n, \alpha$ ) не превышала ( $5,2 \times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{н}$ ).

Преимущество тонких пленок, выращенных на борированных подложках для детекторов ионизирующих излучений в том, что с уменьшением толщины пленок их радиационная стойкость возрастает [4], на них можно получить более высокую эффективность сбора заряда, так как на пути движения зарядов количество дефектов, на которых происходит захват носителей заряда, меньше. Детекторы на гомоэпитаксиальных тонких CVD-алмазных пленках могут успешно использоваться для регистрации атомов и альфа частиц, а также, для измерения нейтронных потоков с плотностью более  $10^{10} \text{ н/см}^2\text{с}$ .

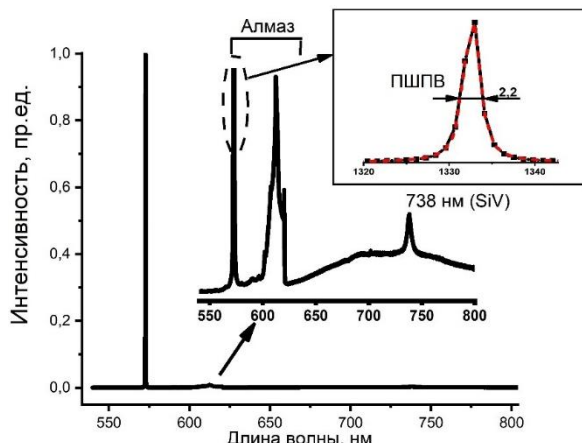


Рисунок 1 – Спектр фотолюминесценции CVD алмазной пленки при возбуждении лазером с длиной волны 532 нм. На вставке – деконволюция Рамановского спектра. Результат деконволюции показан красным цветом

Работа выполнена в рамках государственного контракта на выполнение НИОКР ГК от 17.04.2023 № Н.4к.241.09.23.1059.

Ключевые слова: алмазные пленки, эпитаксия, алмазный детектор

## Литература

- [1]. Kräsilnikov A. V., Azizov E. A., Khrunov V. S., Roque-more A. L., Young K. M. // Rev. Sci. Instrum. 1997. V. 68 (1). P. 553.
- [2]. Амосов В.Н., Красильников В.А., Скопинцев Д.А. и др. Система спектрометрии быстрых атомов на токамаке ЛЕТ на базе алмазного детектора. — Приборы и техника эксперимента, 2008, № 2, с. 108—112.
- [3]. А.В. Красильников, Н.Б. Родионов, А.П. Большаков, В.Г. Ральченко, С.К. Вартапетов, Ю.Е. Сизов, С.А. Мещанинов, А.Г. Трапезников, В.П. Родионова, В.Н. Амосов, Р.А. Хмельницкий, А.Н. Кириченко. Журнал технической физики, 2022, том 92, вып. 4, С. 596-603.
- [4]. Gianluca Verona Rinati Dipartimento di Ingegneria Industriale Università di Roma “Tor Vergata” Radiation hard Diamond Detectors in Schottky diode

**ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ТОКАМАКА  
С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ**

Кащук Ю.А., Красильников А.В., Коновалов С.В.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,  
[y.kashchuk@iterrf.ru](mailto:y.kashchuk@iterrf.ru)*

В докладе сформулированы требования к измерениям параметров термоядерной плазмы в токамаке с реакторными технологиями [1]. Определены требования к пространственному, временному и энергетическому разрешению различных диагностик. Определены функциональные роли диагностик. Выполнена их классификация в зависимости от решаемых задач. Выделены 4 основные задачи, решение которых должен обеспечить диагностический комплекс: безопасность работы и защита установки; базовое управление токамаком, продвинутое управление плазменным разрядом с реакторными характеристиками и измерения, необходимые для детального исследования диверторной плазмы [2].

В работе рассмотрена возможность стадийного построения диагностического комплекса токамака с реакторными технологиями. Выделены три стадии эксплуатации установки – пусковой минимум, безъядерные эксперименты с целью исследования взаимодействия плазма-стенка и стационарных режимов с управляемыми радиальными распределениями параметров плазмы, эксперименты с дейтериевой плазмой с образованием DD и DT нейтронов с выходом на  $P_{aux} \leq 40$  МВт и достижением  $Q=1$ .

Предложены варианты распределения диагностик по патрубкам ТРТ. Обсуждаются вопросы интеграции диагностического комплекса и интерфейсы с другими системами токамака.

Работа выполнена по государственным контрактам с ГК «Росатом» от 12.09.2022 № Н. 4ф.241.09.22.1135 и 17.04.2023 № Н.4к.241.09.23.1060.

### **Литература**

- [1]. Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Минеев А.Б., Кузьмин Е.Г., Кавин А.А., Карпов Д.А., Леонов В.М., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В., Иванов А.А., Бельченко Ю.И., Денисов Г.Г. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. С. 970. <https://doi.org/S0367292122700214>
- [2]. Кашук Ю.А., Красильников А.В., Коновалов С.В.// Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 12. С. 1159. <https://doi.org/10.31857/S0367292121110196>



# КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА TRT

Сушков А.В.<sup>1</sup>, Андреев В.Ф.<sup>2</sup>, Белов А.М.<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия,  
[Sushkov\\_AV@nrcki.ru](mailto:Sushkov_AV@nrcki.ru)

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия,  
[Andreev\\_VF@nrcki.ru](mailto:Andreev_VF@nrcki.ru)

<sup>3</sup>НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия,  
[Belov\\_AM@nrcki.ru](mailto:Belov_AM@nrcki.ru)

<sup>4</sup>АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Россия

Для получения устойчивого плазменного разряда на токамаке необходимо знать величину тока плазмы и величины магнитных и электрических полей внутри и снаружи объема плазмы. Измерения магнитного поля, окружающего плазму, позволяют определить электромагнитные параметры плазменного шнура, его положение и форму, а также регистрировать развитие магнитогидродинамических (МГД) неустойчивостей плазмы. Надежное измерение этих параметров требуется также для понимания результатов эксперимента. Поэтому электромагнитная диагностика (ЭМД) является базовой диагностикой любого токамака. ЭМД современных токамаков состоят из сотен индуктивных датчиков различных типов: осесимметричные петли полоидального потока, петли диамагнитного потока, магнитные зонды и седловые петли для измерения локального магнитного поля, пояса Роговского для измерения тока плазмы и токов по элементам вакуумной камеры (ВК), устанавливаемых внутри и снаружи ВК.

В данный момент существует только концептуальный проект токамака TRT, соответственно в докладе будет представлена общая концепция размещения и технической реализации датчиков ЭМД, которыми желательно оснастить проектируемый токамак. Окончательные требования к количеству и месту размещения датчиков возможно будет определить только в процессе рабочего проектирования ВК, первой стенки и дивертора токамака TRT, т.к. основная часть датчиков ЭМД устанавливается внутри ВК и должна быть интегрирована в конструкцию токамака.

# РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» ДЛЯ УСТАНОВКИ ТРТ

Тугаринов С.Н., Кузьмин Н.В., Павлова Г.С., Серов В.В.

*ЧУ «ИТЭР-Центр», Москва, Россия, [s.tugarinov@iterrf.ru](mailto:s.tugarinov@iterrf.ru)*

Диагностические системы на термоядерных установках играют важнейшую роль, как в управлении работой установки, так и для исследования процессов, протекающих в термоядерной плазме. На большинстве ныне существующих и строящихся токамаках важнейшую роль в измерениях ключевых параметров плазмы играет корпускулярно-спектроскопическая диагностика, также называемая активной спектроскопией (АС) (в англоязычной литературе, CXRS – Charge eXchange Recombination Spectroscopy) [1,2]. Диагностика АС, позволяет измерять профиль ионной температуры плазмы, скорость ее тороидального и полоидального вращения, а также профиль концентрации легких примесей (в том числе гелиевой зола) с высоким временным и пространственным разрешением.

Для реализации диагностики АС, используется инжекция высокоэнергичных пучков атомов водорода. В объеме плазмы, занимаемом инжeksiруемым пучком атомов, идет интенсивная реакция перезарядки, а именно, захват ядрами примесей электрона у атома пучка, в результате чего возникают водородоподобный ион в возбужденном состоянии, который излучает характерные спектральные линии из всего объема плазмы.

На предыдущем этапе работ по созданию концепции диагностики АС для установки ТРТ, была представлена предварительная концепция диагностической системы Активная спектроскопия для установки ТРТ. Описаны возможные схемы проведения измерений, а также, приведено описание предполагаемой измерительной аппаратуры, а именно, многоканальных спектрометров-полихроматоров. Также было показано, что реализация диагностики АС с использованием нагретых пучков (водородного либо дейтериевого), не возможна, ввиду очень высокой энергии атомов нагретых пучков (500 кэВ), что не позволяет получить достаточного для

проведения измерений соотношения сигнал-шум для используемых спектральных линий.

В рамках развития концепции диагностики АС проведено моделирование спектральных профилей излучения легких примесей, возникающих при инжекции в плазму диагностического пучка атомов водорода. При этом, проводилось варьирование в широком диапазоне значений, как параметров самой плазмы в установке ТРТ, так и параметров инжектируемых пучков атомов.

В данной работе представлены результаты проведенного моделирования для величины сигнал-шум и точностей измерения параметров плазмы в широком диапазоне значений плотности плазмы  $\langle n_e \rangle = 10^{19} - 10^{20} \text{ м}^{-3}$  и при изменении энергии инжектируемых атомов от 60 до 100 кэВ.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 17.04.2023 № Н.4к.241.09.23.1060 "НИОКР в обоснование программы исследований и технических требований к системам токамака с реакторными технологиями. Этап 2023-2024 годов".

## Литература

- [1]. Диагностика плазмы / Под ред. М.И. Пергамента. М.: Энергоатомиздат, 1990. Вып. 7. С. 56–111.
- [2]. Fonck R.J., Darrow D.S., Jaehnig K.P. // Phys. Rev. A. V. 29. P. 6. 1984. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.29.3288>.

# КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИК ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ TRT

Е.Е. Мухин, С.Ю. Толстяков, Г.С. Курскиев, А.Н. Коваль,  
В.А. Соловей, Н.С. Жильцов, Н.В. Ермаков

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,*  
[post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)

Комплекс диагностик томсоновского рассеяния (ТР) на токамаке TRT включает диагностику центральной и краевой плазмы при зондировании из экваториального патрубка, а также области наружного дивертора и X-точки. На токамаке Глобус-М2 продемонстрирована работа диагностики ТР в мониторинговом режиме. Это позволит включать диагностику ТР в обратную связь играя важную роль в программе исследования эффективности нагрева плазмы и отработки режимов работы дивертора.

Зондирование центральной и краевой плазмы предлагается проводить вдоль хорды лазерного излучения, вводимого в плазму в экваториальном порту TRT № 8, а сбор рассеянного излучения в экваториальном порту № 9. Экваториальная геометрия зондирования центральной плазмы обеспечивает измерения  $T_e n_e$  на стороне слабого поля и в паре точек со стороны сильного поля. Это позволяет по профилю давления электронов определять положение магнитной оси и последней замкнутой магнитной поверхности. Важнейшей задачей проекта TRT является получение стационарного режима горения и управления плазменным разрядом при высокой мощности дополнительного нагрева. Работа в таких режимах происходит, как правило, вблизи предела развития резистивных винтовых неустойчивостей, ограничивающих как эффективность удержания плазмы, так и глобальную МГД-устойчивость плазменного столба. Для управления МГД-стабильностью таких разрядов необходимы надежные и точные измерения

пространственных профилей кинетических параметров плазмы, к которым относятся  $T_e n_e$ .

Всю совокупность плазменных параметров в районе X-точки, их изменение от X-точки вдоль сепаратрисы до наружной диверторной мишени и вдоль поверхности наружной диверторной пластины предлагается решать с помощью совмещенной лазерной диагностики ТР/ЛИФ (лазерно-индуцированной флуоресценции) [2, 3]. Одна из наиболее важных задач диагностики будет заключаться в проверке модельных предположений поведения плазмы в диверторе и ее отрыва от диверторных пластин.

Измерения в диверторе предлагается проводить вдоль трех хорд лазерного излучения, вводимого в плазму в диверторном порту TRT № 16. Системы наблюдения при этом предлагается размещать в диверторном порту № 16 и экваториальном порту № 14. Каждая из хорд лазерного зондирования предназначена для решения своей функциональной задачи: хорда зондирования вдоль наружной диверторной мишени служит для измерения распределения тепловой нагрузки на наружную диверторную пластину, положение и ширину области максимальной нагрузки (strike point); хорда, направленная вдоль сепаратрисы, позволит измерить градиенты параметров электронного, ионного и нейтрального компонентов плазмы от X-точки до области strike point; хорда зондирования, направленная вертикально из-под диверторной кассеты, позволит измерить плазменные параметры в области X-точки на входе в дивертор.

Доклад посвящен обсуждению обоснования и выбора технических решений при создании диагностического комплекса ТР токамака TRT.

Разработка вариантов размещения диагностики на токамаке, выполнены в рамках государственного задания 0034-2019-0001 Министерства образования и науки РФ.

## Литература

- [1]. Курские Г. С. и др., Диагностика электронного компонента плазмы токамака с реакторными технологиями методом

томсоновского рассеяния, ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2022, том 48, № 8, с. 711–721  
<https://doi.org/10.31857/S0367292122100134>

- [2]. Мухин Е. Е. и др., Объединенная диагностика томсоновского рассеяния и лазерно-индуцированной флуоресценции для исследования плазмы дивертора и х-точки в токамаке с реакторными технологиями, ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2022, том 48, № 8, с. 722–730  
<https://doi.org/10.31857/S0367292122100146>
- [3]. Mukhin E.E., et al Integration of Thomson scattering and laser-induced fluorescence in ITER divertor, NUCL. FUSION. 2019. V. 59 086052. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1cd5>

# ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНОЙ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НА ТОКАМАКЕ ТРТ

Миронов М.И.<sup>1</sup>, Афанасьев В.И.<sup>1</sup>, Мельник А.Д.<sup>1</sup>,  
Наволоцкий А.С.<sup>1</sup>, Несеневич В.Г.<sup>1</sup>, Петров М.П.<sup>1</sup>, Петров С.Я.<sup>1</sup>,  
Чернышев Ф.В.<sup>1</sup>, Шмитов Р.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН «ФТИ им. А.Ф. Иоффе», Санкт-Петербург, Россия,  
[post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)

В настоящее время на установке ТРТ (Токамак с Реакторными Технологями) планируется использовать диагностический комплекс, состоящий из трех анализаторов атомов перезарядки [1], который позволит проводить измерения энергетической функции распределения как тепловых, так и быстрых ионов, возникающих при инжекции в плазму нагретых нейтральных пучков и высокочастотной мощности. В представленном, пилотном проекте были проанализированы возможности применения диагностики в так называемом пассивном варианте, когда измерения носят интегральный характер и предоставляют информацию, усредненную вдоль линии видимости анализаторов [2].

Для определения локальных значений параметров ионного компонента плазмы может быть использован другой подход - метод активной корпускулярной диагностики. В этом случае в плазму инжектируется диагностический пучок нейтральных атомов, который в интересующей области плазмы, находящейся на линии видимости анализатора, создает повышенную концентрацию частиц-доноров, на которых происходит нейтрализация ионов плазмы [1]. В данной работе проведен анализ возможности применения метода активной корпускулярной диагностики на установке ТРТ. При этом предлагается расположить один из анализаторов атомов перезарядки таким образом, чтобы его линия видимости, имеющая тангенциальное направление, пересекала линию

инъекции диагностического пучка. Представлены параметры и схема размещения диагностической аппаратуры. Проведено численное моделирование формирования нейтрализационной мишени, создаваемой диагностическим пучком, и сделана оценка пространственного разрешения предлагаемой измерительной схемы. Приведены результаты расчета величины полезного сигнала и диапазонов измерения локальных значений ионной температуры и изотопного соотношения плазмы.

### **Литература**

- [1]. А. В. Красильников, С. В. Коновалов, Э. Н. Бондарчук, И. В. Мазуль, И. Ю. Родин, А. Б. Минеев, Е. Г. Кузьмин, А. А. Кавин, Д. А. Карпов, В. М. Леонов, Р. Р. Хайрутдинов, А. С. Кукушкин, Д. В. Портнов, А. А. Иванов, Ю.И. Бельченко, Г.Г. Денисов, Физика плазмы, 2021, Т. 47, № 11, стр. 970-985.
- [2]. В. И. Афанасьев, П. Р. Гончаров, А. Д. Мельник, М. И. Миронов, А. С. Наволоцкий, В. Г. Несеневич, М. П. Петров, С. Я. Петров, Ф. В. Чернышев, Физика плазмы, 2022, Т. 48, № 8, стр. 675-684.
- [3]. Кисляков А.И., Крупник Л.И., Физика плазмы, 1981, Т. 7, № 4, стр. 866-906.



# КОНЦЕПЦИЯ ДИАГНОСТИКИ MSE ДЛЯ УСТАНОВКИ TRT

В.А. Крупин<sup>1</sup>, И.А. Земцов<sup>1,2</sup>, А.Р. Немец<sup>1</sup>, В.С. Неверов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский Институт», Москва, Российская Федерация, пл. Академика Курчатова, д. 1, [zemtsov\\_ia@nrcki.ru](mailto:zemtsov_ia@nrcki.ru)

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1, [zemtsov\\_ia@bmstu.ru](mailto:zemtsov_ia@bmstu.ru)

Проект токамака с реакторными технологиями (TRT) преследует решение таких важных для достижения стационарной управляемой реакции термоядерного синтеза задач, как развитие и интеграция в рамках одной установки ключевых термоядерных технологий; разработка и исследование длительных ( $\geq 100$  с) квазистационарных разрядов и разработка и исследование термоядерной плазмы с доминированием нагрева альфа-частицами.

Для достижения поставленных перед данным проектом задач установка должна быть укомплектована передовым диагностическим комплексом. Крайне важными для реализации целей TRT являются измерения профилей плотности тока плазмы  $j(r)$  и коэффициента запаса устойчивости  $q(r)$ , который определяет устойчивость шнура, перенос тепла и частиц в плазме. Данные искомые величины можно определить из измерений питч-угла магнитного поля  $\gamma_{pitch} = \tan^{-1}(B_\theta/B_\phi)$ . Довольно распространенным методом определения  $\gamma_{pitch}$  является MSE-методика – анализ направления поляризации спектральной линии серии Бальмера, испускаемой быстрыми атомами, пролетающими через магнитное поле. Данная работа посвящена концепции MSE-диагностики токамака TRT.

Для описания концепции данной диагностики в работе были использованы реализованные во фреймворке Cherab [1] модели для расчета синтетических спектров излучения плазмы и инжектированных пучков быстрых атомов. В моделях были учтены основные эффекты, влияющие на форму спектра и его интенсивность. В частности, это влияние когерентного возбуждения

магнитных подуровней на интенсивности компонент MSE спектра [2], зеемановское расщепление в спектре перезарядки на пучке. Для пассивной линии  $D_{\alpha}$  использовался Штарк-доплер-зеемановский контур линии [3]. При моделировании учитывалось отражение излучения от стенок камеры. Итоговый модельный спектр содержит тормозной континуум, пассивную линию  $D_{\alpha}$ , активную перезарядочную линию  $D_{\alpha}$ , индуцируемую пучками, а также активную линию  $H_{\alpha}$  пучка, пример такого спектра представлен на рисунке 1.

Полученные спектры показали, что ожидаемая интенсивность активной линии на 3 порядка меньше интенсивности пассивной линии плазмы и на порядок меньше интенсивности тормозного континуума. В таком случае измерение данной методикой возможно осуществить только при значительном смещении активной линии  $H_{\alpha}$  в силу эффекта Доплера относительно центра пассивной линии. Также из формы спектра видно, что большое тороидальное магнитное поле установки обеспечивает сильное расщепление активной линии, позволяющее разрешать отдельные  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризованные компоненты.

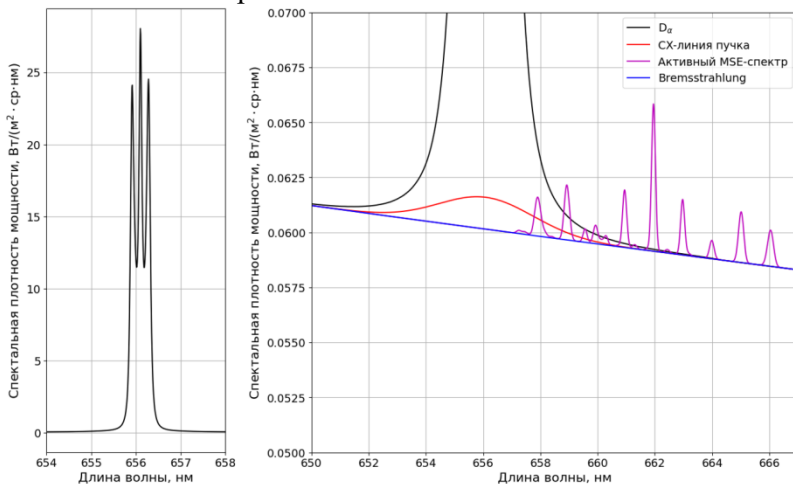


Рисунок 1 – Пример полного модельного спектра

Анализ спектров, полученных для нескольких вариантов расположения систем сбора излучения, позволил выбрать два наиболее перспективных расположения хорд наблюдения MSE-диагностики в экваториальном сечении: в сечении соседнем с

диагностическим инжектором и в сечении, отстоящем от него на 90 градусов по тороидальному обходу. Предложена возможность разделения систем сбора света по зонам наблюдения: одна система для внутренней области шнура ( $\rho=0\dots0,5$ ), вторая – для внешней области ( $\rho=0,5\dots1$ ). Для выбранных расположений систем сбора проведено моделирование MSE-спектров по всему малому радиусу плазменного шнура со стороны слабого поля.

Проведено исследование зависимости параметров активного спектра от энергии пучка в диапазоне от 60 до 100 кэВ. Входные параметры диагностического инжектора в модели задавались согласованно между собой: вместе с энергией основной компоненты в соответствии с величинами равновесного выхода изменялись и другие параметры пучка: эквивалентный ток атомов водорода с полной энергией, ток атомов компонент пучка с энергиями  $E_0/2$  и  $E_0/3$ , а также их дисперсия и расходимость. Учитывалось влияние энергии частиц на эффективность нейтрализации ионов в инжекторе. В качестве основных анализируемых характеристик модельных спектров использовалась интегральная интенсивность активной линии пучка и ее смещение относительно пассивной линии плазмы.

В результате обработки полученных синтетических спектров было продемонстрировано слабое влияние низкоэнергетических компонент пучка на MSE-спектр активной линии. Была получена нижняя граница энергии основной компоненты диагностического инжектора для случаев расположения систем сбора в предложенных экваториальных патрубках вакуумной камеры установки. Исходя из этого условия были определены диапазоны значений полного тока водородных атомов и эффективного диаметра диагностического пучка. Оценено достижимое пространственное разрешение и требуемое спектральное разрешение прибора.

## Литература

- [1]. Carr M., Meakins A., et al. Rev. Sci. Instrum., 2018, vol. 89, 083506, <https://www.cherab.info>
- [2]. Marchuk O. et al. J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys. 2009. Vol.43, №1.
- [3]. Lomanowski B.A., et al. Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, 123028.

# ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ДИАГНОСТИКИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT)

Раздобарин А.Г.<sup>1,3</sup>, Шубин Я.Р.<sup>1</sup>, Богачев Д.Л.<sup>1</sup>, Дмитриев А.М.<sup>1</sup>,  
Елец Д.И.<sup>1,2,3</sup>, Медведев О.С.<sup>1,2,3</sup>, Мухин Е.Е.<sup>1</sup>, Снигирев Л.А.<sup>1</sup>,  
Гаспарян Ю.М.<sup>2</sup>, Алексеенко И.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия, [Aleksey.Razdobarin@mail.ioffe.ru](mailto:Aleksey.Razdobarin@mail.ioffe.ru)

<sup>2</sup>НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия, [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru)

<sup>3</sup>БФУ им. И. Канта, Калининград, [post@kantiana.ru](mailto:post@kantiana.ru)

Разработка диагностик первой стенки является важным шагом развития термоядерных установок следующего поколения. В условиях длительных разрядов и высокой энергонагруженности, тепловые нагрузки на обращенные к плазме элементы (ОПЭ) могут приближаться к порогу разрушения материалов внутренней облицовки [1,2], что обуславливает необходимость мониторинга температуры наиболее нагруженных областей первой стенки и дивертора в режиме реального времени. Кроме того, необходим постоянный контроль целостности ОПЭ и мониторинг накопления термоядерного топлива в со-осаждениях распыленных материалов и изотопов водорода. Последнее принципиально важно для обеспечения корректной процедуры запуска топлива, оптимального баланса изотопов водорода и гелиевой золы, а также достижения оптимальных характеристик плазменного разряда.

В работе рассматривается вариант реализации комплекса диагностик, обращенных к плазме элементов первой стенки и дивертора токамака с реакторными технологиями (TRT). Основные задачи диагностического комплекса – контроль целостности и состояния поверхности стенки, измерение тепловых потоков на первую стенку и диверторные мишени, мониторинг накопления топлива. Для решения данных задач предлагается использование совмещенной диагностики

частотно/амплитудно-модулированного лазерного радара и двухчастотной цифровой голографии, активной (лазерной) и пассивной ИК-термографии, диагностик накопления топлива на основе лазерной десорбции и абляции. Предложена схема размещения диагностик на токамаке TRT, рассмотрены базовые варианты реализации схемы ввода лазерного излучения и сбора света. Проведен анализ факторов, ограничивающих применимость методов и/или их интеграцию. Выполнены оценки пространственного разрешения и уровня сигналов для лазерных методов исследования стенки. Проведена оценка ошибок с учетом вклада непрерывного фона, обусловленного тормозным излучением электронов и определен диапазон измерения температуры обращенных к плазме элементов во время работы токамака ТРТ. Обсуждается специфика реализации диагностического комплекса в условиях токамак-реактора, в том числе, ограничения, связанные с работой при высокой температуре и ионизирующем излучении, необходимость защиты оптики от осадений и распыления, и т.д.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 23-79-00023, <https://rscf.ru/project/23-79-00023/>

### **Литература**

- [1]. Pitts R.A., et al. // Nuclear Materials and Energy. 2019. V. 20. P.100696. doi: 10.1016/j.nme.2019.100696.
- [2]. Кукушкин А. С., Пшенов А. А. // Физика Плазмы. 2021. том 47. № 12. с. 1123.

# ЗОНДЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С ДИВЕРТОРОМ И ПЕРВОЙ СТЕНКОЙ ТОКАМАКА ТРТ

Айрапетов А.А., Беграмбеков Л.Б., Грунин А.В., Рожков А.Д.,  
Захаров А.М.

*НИЯУ МИФИ, г.Москва, Россия, 115409, [AAAirapetov@mephi.ru](mailto:AAAirapetov@mephi.ru)*

Воздействие плазмы термоядерных установок на материалы первой стенки и дивертор, и ответное воздействие этих материалов на плазму объединяет большой набор различных явлений. Это и эрозия поверхности материалов, и изменение их структуры, состава; захват, удержание и неконтролируемый выброс газов; эмиссия в плазму атомов и микроскопических частиц материалов; формирование перенапылённых слоёв, которые также могут захватывать и удерживать большие количества газов, и загрязняющих плазму при последующем разрушении и т.п.

Определение допустимых для эксплуатации установок режимов взаимодействия плазмы с контактирующими с ней материалов – одна из важных задач для каждой установки. А в контексте развития термоядерной энергетики исследование этого взаимодействия – чрезвычайно актуальная задача, поскольку вопрос контактирующих с плазмой материалов в термоядерных установках следующего поколения так и не решен.

В случае токамака с реакторными технологиями (ТРТ) эти проблемы требуют особого внимания, поскольку на нем предполагается получить длинные квазистационарные режимы [1], приводящие к интенсивным длительным потокам плазмы на дивертор и значительным нагрузкам на первую стенку. Для разработки материалов и режимов плазменного облучения диверторов токамаков, способных работать в квазистационарном режиме, важно выявить специфику и параметры процессов взаимодействия плазмы с дивертором в условиях экстремально высоких температур и интенсивностей плазменного облучения, реализуемых на его поверхности [2]. Поэтому ТРТ должен обладать диагностиками, предоставляющими требуемую информацию, а

именно позволяющими непосредственно изучать поведение материала дивертора и первой стенки при воздействии плазмы токамака на него.

В докладе представлены концептуальные дизайны зондов для токамака ТРТ: диверторного зонда и многофункционального зонда для исследования взаимодействия плазма/первая стенка. Оба зонда служат для измерения параметров плазмы и позволяют проводить изучение воздействия плазмы на материал (дивертора или первой стенки). Конструкции зондов позволяют извлекать для анализа облучаемые плазмой образцы через вакуумные шлюзы без развакуумирования токамака.

Диверторный зонд для токамака ТРТ [3] предназначен для выполнения измерений параметров как плазменного облучения дивертора, так и процессов на поверхности и в объёме материала дивертора при одиночных разрядах и при длительном плазменном облучении. Зонд вводится в плазменную камеру через диверторный порт и устанавливается в наружной отражающей мишени так, что поверхность его сменного образца располагается в плоскости облучаемой поверхности тайла. Зонд сможет измерять «in situ» характеристики ионных и термических потоков на сменный образец, также предусматривается возможность использовать зонд в качестве зонда Ленгмюра. Анализ экспонированных в плазме образцов может проводиться после вывода их из токамака любым аналитическим оборудованием, и, следовательно, можно получить информацию о скорости распыления в условиях дивертора, характере модификации структуры и рельефа его поверхности, количестве и составе твердотельных примесей, осевших на поверхности дивертора, составе и структуре образовавшихся поверхностных слоёв, количестве газов, внедрившихся в его объём и особенности их удержания и др.

Многофункциональный зонд [4] включает в себя спектрометрическую и материаловедческую секции, расположенные в кожухе, зонд Маха, зонды Ленгмюра и образцы, предназначенные для экспонирования в плазме. Секции зонда работают независимо друг от друга и позволяют получить комплексную информацию о компонентах пристеночной плазмы. Материаловедческая секция зонда включает в себя два аналитических узла, в которые частицы плазмы и примесей могут проникать через отверстия, после которых

может находиться электрод, служащий для отклонения ионов плазмы от линейной траектории. Далее находится либо кварцевый измеритель толщины, либо устройство, фиксирующее толщину напылённого слоя по изменению его электропроводности. В обоих случаях зонд будет иметь возможность регистрировать осаждаемые слои или скорость распыления материалов в реальном времени и позволит on-line анализировать получаемую информацию. Масс-спектрометрическая часть позволит измерять токи ионов с разным соотношением  $m/Z$  за счет разделения их в скрещенных  $E \times H$  полях (используется собственное магнитное поле токамака и электрическое поле, создаваемое в зонде). Также возможно измерение полного ионного тока (для этого электрическое поле не формируется и не происходит разделения частиц) или полного электронного тока.

Таким образом, предлагаемые зонды позволяют проводить измерение характеристик плазмы в области размещения образцов и извлекать из токамака и анализировать сменные образцы без нарушения работы токамака. Это позволит устанавливать соответствие между параметрами плазменного воздействия на материалы и характером процессов на их поверхности и в объёме и изучать динамику развития этих процессов от длительности облучения, типов и параметров разряда.

## Литература

- [1]. Красильников А. В., и др. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. с. 970–985. DOI: 10.31857/S0367292121110196
- [2]. Мазуль И. В., и др. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 12. с. 1103–1122. DOI: 10.31857/S0367292121110214
- [3]. Айрапетов А.А., и др. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 12. С. 1233-1243. DOI: 10.31857/S0367292122600625
- [4]. Беграмбеков Л.Б., Грунин А.В. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 12. С. 1244. DOI: 10.31857/S036729212260056X



# КОНЦЕПЦИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРОННО- ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ ТРТ

Диас Михайлова Д.Е.<sup>1,2</sup>, Соловьёв Н.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия,

[Solovev\\_NA@nrcki.ru](mailto:Solovev_NA@nrcki.ru)

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия, [tomasrulit@mail.ru](mailto:tomasrulit@mail.ru)

Предложена концепция диагностической системы измерения профиля электронной температуры плазмы по интенсивности электронно-циклотронного излучения (ЭЦИ) для установки ТРТ [1].

Измерение профиля электронной температуры  $T_e$  на ТРТ предлагается осуществлять по участкам спектра ЭЦИ, соответствующим излучению на 1 й гармонике частоты электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) в обыкновенной поляризации (O1) и на 2 й гармонике частоты ЭЦР в необыкновенной поляризации (X2).

Оценены спектральные характеристики ЭЦИ для базового сценария разряда ТРТ [2]. Частотные диапазоны, которые могут быть использованы для измерения  $T_e$ , составляют приблизительно 180–300 ГГц для O1 (охватывается область  $-0,9 \leq \rho \leq 0,9$ ) и 365–470 ГГц (охватывается область  $-0,1 \leq \rho \leq 0,9$ ). Для волны X2 охватываемая область ограничена в силу наложения гармоник, связанного с небольшой величиной аспектного отношения ТРТ, однако может быть получено более высокое пространственное разрешение, чем для волны O1. Наименьший радиальный размер разрешаемой области для радиально

направленной хорды оценивается в 3–5 см (в зависимости от точки) для O1 и в 2–4 см для X2.

Предложена концепция технического устройства диагностики, а именно схема размещения внутривакуумных компонентов в экваториальной патрубке ТРТ, схема квазиоптического делителя O-X мод, ожидаемые характеристики линии передачи и необходимый набор спектральных приборов. Данная концепция в значительной степени является адаптацией концепции диагностики ЭЦИ для ИТЭР [3] под параметры ТРТ.

Концепция предполагает одновременное использование 2-х линий наблюдения: радиальной и наклонённой в тороидальном направлении. Для каждой линии наблюдения предполагается реализовать квазиоптическую фокусирующую систему на основе перископической системы зеркал, обеспечивающую поперечный размер разрешаемой в плазме области около 3–5 см для O1 и 1–3 см для X2. В трубке также предполагается расположить систему абсолютной калибровки чёрным телом *in situ*. Разделение O- и X поляризаций предполагается осуществлять в ИТЭР-подобной конфигурации из двух квазиоптических телескопов, обеспечивающих согласование обращённого к плазме зеркала и линий передачи. Передача ЭЦИ из зала установки в диагностическое помещение предполагает использование 4-х линий передачи (X и O для каждой из 2-х линий наблюдения). В качестве спектральных приборов для измерения ЭЦИ предполагается применение интерферометров (Фурье-спектрометров) для максимального охвата спектра ЭЦИ с ограниченным временным разрешением (~10 мс) и многоканальных супергетеродинных приёмников для охвата пространственно-локализованных областей O1 и X2 с временным разрешением от ~1 мкс.

Ожидается, что при реализации базового сценария разряда ТРТ диагностика ЭЦИ сможет удовлетворить требованиям к измеряемым параметрам « $T_e$  Core» и « $T_e$  Edge» [4], за исключением, возможно, требований к пространственному разрешению, если последние понимать в смысле размера разрешаемой области.

## Литература

- [1]. Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики / А. В. Красильников, С. В. Коновалов, Э. Н. Бондарчук [и др.] // Физика плазмы. — 2021. — Т. 47, № 11. — С. 970–985.
- [2]. Сценарии разряда токамака с реакторными технологиями / В. М. Леонов, С. В. Коновалов, В. Е. Жоголев [и др.] // Физика плазмы. — 2021. — Т. 46, № 11. — С. 986–997.
- [3]. Update on the status of the ITER ECE diagnostic design / G. Taylor, M. E. Austin, A. Basile [et al.] // EPJ Web of Conferences. — 2017. — Vol. 147. — P. 02003
- [4]. Требования к измерениям характеристик плазмы токамака с реакторными технологиями TRT / Ю. А. Кашук, С. В. Коновалов, А. В. Красильников // Физика плазмы. — 2022. — Т. 48, № 12. — С. 1159–1165.

# КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ДОПЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

А.Ю. Яшин<sup>1,2</sup>, А.В. Петров<sup>1</sup>, А.М. Пономаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, [alex.yashin@list.ru](mailto:alex.yashin@list.ru)

<sup>2</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

По мере продвижения к созданию токамака с термоядерной плазмой становится все более очевидной необходимость иметь возможность тестировать и исследовать концептуально разработанные возможные режимы работы и сценарии разряда. В настоящее время в российской национальной программе термоядерных исследований большое внимание уделяется разработке токамака с реакторными технологиями (ТРТ). Его технические и эксплуатационные параметры выбраны с учетом возможности проведения широкого круга исследований, которые должны быть связаны с решением фундаментальных задач для успешной реализации не только источника нейтронов для гибридного реактора синтез–деление, но и чисто термоядерного реактора [1].

Одной из основных целей проекта ТРТ является достижение надежного контроля потоков тепла и частиц в условиях реактора. Это означает, что необходимо отслеживать состояние плазменной турбулентности и постоянно исследовать различные неустойчивости, которые, как ожидается, будут развиваться. К ним относятся периферийные локализованные моды (ELM) и неоклассические тиринг моды (NTM) и альфвеновские моды (AE), которые известны тем, что они ухудшают характеристики плазмы.

Вот почему системы диагностики, совместимые с условиями реактора, жизненно важны для развития управляемого термоядерного синтеза. Исходя из ожидаемых плазменных условий и целей проекта ТРТ, можно предположить, что

требуется информативная диагностика поведения флуктуаций плотности плазмы. Одной из таких диагностик является диагностика доплеровского обратного рассеяния (ДОР), которая стала неотъемлемой частью исследований плазмы на большинстве токамаков по всему миру (см. [2] и ссылки 17-24 в ней), в частности такая система разрабатывается для проекта ИТЭР [3]. Его полезность в сочетании с сопоставимой простотой реализации сделали его невероятно привлекательным и популярным диагностическим методом. ДОР — это микроволновая диагностика, которая основана на процессе обратного брэгговского рассеяния электромагнитного излучения в области отсечки [4]. Этот метод позволяет проводить локальные измерения флуктуаций плотности различного масштаба и скорости их полоидального вращения. Таким образом, он может позволить исследовать и контролировать турбулентность в широком диапазоне радиусов от области SOL до центральных областей плазмы. Кроме того, с помощью этого метода можно обнаружить и исследовать когерентные МГД-моды [5]. Все это указывает на то, что ДОР станет прекрасным дополнением к диагностической системе ТРТ.

В докладе обсуждается полезность системы ДОР для решения задач ТРТ, а также предложены возможные способы ее реализации на токамаке, включая обсуждение возможных технических характеристик системы. Одной из наиболее важных проблем реализации ДОР является возможность исследовать различные области плазмы. Это требует выбора соответствующего диапазона частот зондирования, чтобы они соответствовали сценариям и профилям плотности, ожидаемым в ТРТ. Обсуждаются аспекты и преимущества различных способов реализации ДОР на токамаке. Представлены возможные аппаратные средства, конструкции и расположение антенной системы. Существуют также ограничения системы, которые необходимо учитывать специально для ТРТ. Идеи по реализации ДОР на ТРТ подкреплены расчетами трассировки лучей и разрешения диагностики. Также оцениваются волновые числа флуктуаций плазмы, которые система могла бы регистрировать.

Наконец, обсуждаются возможности применения ДОР наряду с методами, которые могут быть использованы для обнаружения колебательных процессов в плазме и для исследования турбулентности. Все эти факторы необходимо учитывать при разработке диагностики ДОР, поскольку мы пытаемся предложить систему ДОР, подходящую непосредственно для целей ТРТ.

Настоящая работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту №0784-2020-0020.

### **Литература**

- [1]. Leonov, V.M. et al. Plasma Phys. Rep. 47, 1107–1118 (2021)
- [2]. Yashin, A. et al. Appl. Sci. 2021, 11, 8975
- [3]. C. M. Muscatello et al. Nucl. Fusion 60, 066005 (2020)
- [4]. G.D. Conway et al. 2004 Plasma Phys. Control. Fusion 46 951
- [5]. T. Estrada et al 2012 Nucl. Fusion 52 082002

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ФОТОННОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ МОЩНЫХ ПУЧКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ИЯФ СО РАН

С.С. Попов<sup>1,2</sup>, М.Г. Атлуханов<sup>1</sup>, А.В. Бурдаков<sup>1,3</sup>, В.В. Куркучек<sup>1</sup>,  
А.Л. Санин<sup>1</sup>, Д.И. Сквородин<sup>1,2</sup>, Ю.А. Трунев<sup>1</sup>, И.В. Шиховцев<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>*Институт ядерной физики им. Ак. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия, [S.S.Popov@inp.nsk.su](mailto:S.S.Popov@inp.nsk.su)*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия.*

<sup>3</sup>*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия.*

Инжекция мощных атомарных пучков в область удержания плазмы - один из ключевых моментов для развития современных прототипов термоядерных реакторов [1]. Общепринятый метод для получения таких нейтралов, основан на пропускании отрицательных ионов через газовое облако (газовые мишени). Такой подход имеет принципиальное ограничение по эффективности нейтрализации 60% [2], и сопровождается рядом критических моментов, дополнительно подавляющих коэффициент нейтрализации и полный КПД установки [3].

В настоящее время активно разрабатывается один из перспективных способов получения атомарных пучков из отрицательноионных, основанный на взаимодействии с фотонной мишенью. Если получить фотоны с энергией превышающего энергию сродства электрона атому (0.754 эВ для водорода), но меньше его потенциала ионизации (13.6 эВ) тогда основным процессом в мишени является фототрыв дополнительного электрона от отрицательного иона при невозможности полной ионизации. В виду этого условия, можно достичь выхода нейтралов близкого к 100%.

В основном фотонные мишени предлагается реализовывать на различных типах резонаторов Фабри-Перо [4]. Однако у такого подхода есть ряд жестких технических требований для реализации. Поэтому действующей системы нейтральной инжекции с таким

нейтрализатором пока не существует. Альтернативным способом является накопление мощного лазерного излучения в адиабатической нерезонансной ловушке. В этом подходе инжекция производится не через высокоотражающую поверхность, а через небольшое отверстие в зеркале. Удержание излучения основано на устойчивом сохранении адиабатических инвариантов при отсутствии условий на фазовые соотношения между разными сегментами лучей. Это резко снижает требования на качество излучения накачки, давая возможность использовать промышленные высокоэффективные мощные волоконные лазеры. Данный подход подтвержден экспериментами по нейтрализации пучков отрицательных ионов водорода и дейтерия с коэффициентом нейтрализации выше 90% для энергии 6-12 кэВ [5].

В настоящем докладе представлено состояние и прогресс исследований по нерезонансному фотонному нейтрализатору, проводимых в ИЯФ СО РАН, описана подготовка эксперимента по нейтрализации пучка H с энергией до 130 кэВ, током около 10 мА. Кроме этого, приведены параметры нейтрализатора для нагревных инжекторов больших установок типа ИТЭР, ТРТ. Профиль степени нейтрализации для системы нейтральной инжекции ТРТ [6] представлен на Рис. 1. Расчет сделан для энергии частиц 500 кэВ, мощность лазерной инжекции взята 150 кВт.

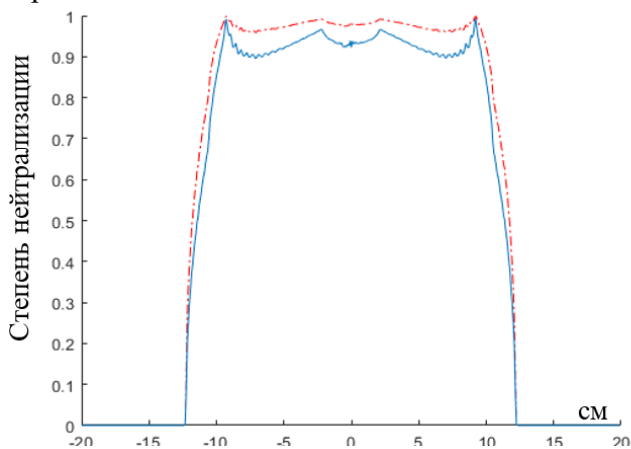


Рис.1. Профиль степени нейтрализации для пучков ионов Водорода (сплошная линия), дейтерия (штрих-пунктирная линия) с энергией 500 кэВ. Мощность лазерной инжекции 150 кВт.



Как видно, принципиально достижима степень нейтрализации в 90% и выше, что существенно повысит КПД нейтральной инжекции.

### **Литература**

- [1]. Inoue, Takashi. (2023). Development of High-Current Negative-Ion-Based Beam Source at the National Institutes for Quantum Science and Technology (QST) in Japan for JT-60 U and ITER Neutral Beam Injectors. 10.1007/978-3-031-21476-9\_19.
- [2]. Dimov G.I., Ivanov A.A. and Roslyakov G.V. 1980 Plasma Phys. Rep. 6 933
- [3]. Hemsworth, Ronald & Boilson, Deirdre. (2017). Considerations for the development of neutral beam injection for fusion reactors or DEMO. AIP Conference Proceedings. 1869. 060001. 10.1063/1.4995788.
- [4]. Fiorucci, D., Fassina, A. Overview of photo-neutralization techniques for negative ion-based neutral beam injectors in future fusion reactors. Eur. Phys. J. D 76, 141 (2022).
- [5]. S.S. Popov et al. Neutralization of negative hydrogen and deuterium ion beams using non-resonance adiabatic photon trap. 2018 Nucl. Fusion 58 096016
- [6]. Ю. И. Бельченко, А. В. Бурдаков, В. И. Давыденко, А. И. Горбовский, И. С. Емелев, А. А. Иванов, А. Л. Санин, О. З. Сотников, Возможная схема инжектора атомарного пучка для нагрева плазмы и генерации тока в токамаке TRT, Физика плазмы, 2021, Т. 47, № 11, стр. 1031-1037.

# ПАРАБОЛИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ЛИНИЙ В MSE- ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЫ.

Демура А.В.<sup>1</sup>, Леонтьев Д.С.<sup>1</sup>, Лисица В.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

MSE (Motional Stark Effect)-диагностика плазмы основана на исследовании спектра пучка нейтрального водорода, пролетающего через плазму. При этом в его системе координат возникает электрическое лоренцево поле  $\mathbf{F}$ . Это приводит к расщеплению энергетических уровней в атоме с образованием хорошо различимого поляризованного штарковского спектра. Такой спектр состоит из  $\pi$ -компонент с вектором поляризации, параллельным  $\mathbf{F}$  и  $\sigma$ -компонент, с вектором поляризации, лежащим в плоскости, перпендикулярной  $\mathbf{F}$  [1-2]. Данная методика является локальной и обладающей хорошим пространственным разрешением. MSE диагностика может послужить для нахождения профиля наклона магнитной силовой линии, которая, в свою очередь, позволяет установить пространственные распределения абсолютных величин параметров разряда, например, коэффициент запаса устойчивости шнура, разрядный ток и определение профиля плотности тока в плазме токамака.

Для MSE диагностики необходимы расчеты интенсивности и поляризационной характеристик спектров, возникающих при динамическом штарк-эффekte (в частности, линий  $H\alpha$ ). Для этого проведен расчет неупругих переходов, вызванных столкновениями атомов пучка с протонами плазмы, между тремя типа уровней: 1) возбуждение из основного состояния; 2) переходы между возбужденными состояниями; 3) переходы между штарковскими подуровнями внутри данного уровня. Для переходов между возбужденными уровнями при энергиях больше 25 кэВ справедливо борновское приближение. Для переходов из основного состояния необходим учет адиабатического фактора, определяемого отношением частоты перехода к частоте столкновения. В настоящей

работе расчет сечений производится непосредственно в параболических волновых функциях (ВФ) в отличие от предыдущих работ, использующих сферические ВФ с их последующим преобразованием в параболические [3].

На рисунке 1 представлены результаты расчетов сечений возбуждения из основного состояния на уровень  $(nkm)=(320)$ . На основе данных по радиационно-столкновительным процессам была построена кинетическая модель для определения населенностей первых пяти уровней атома водорода. При этом рассматривалось два случая: 1) без ионизации путем столкновений протонами; 2) с ионизацией. Кроме того, дополнительным условием является то, что сумма населенностей всех уровней равна 1.

Абсолютная интенсивность штарковской компоненты

линии  $H_{\alpha}$   $I_{calc} = A_{3j-2i} \cdot \hbar \omega_{3j-2i} \cdot \frac{N_{3j}}{g_{3j}}$ , где  $A_{3j-2i}$  – вероятность

радиационного распада с уровня  $3j$  на уровень  $2i$ ,  $\hbar \omega_{3j-2i}$  – энергия между уровнями,  $N_{3j}$  – населённость состояния  $3j$ ,  $g_{3j}$  – его статистический вес [4]. Для расчета интенсивностей компонент линии необходимо решать систему кинетических уравнений для населенностей штарковских подуровней верхнего уровня  $3j$  с учетом его связи с другими уровнями. В статистическом пределе считается, что заселение уровней происходит пропорционально их статистическому весу так, что  $I_{st} \sim A_{3j-2i} \cdot \hbar \omega_{3j-2i}$ . В динамическом пределе населенности уровней определяются соотношением между возбуждением из основного состояния и полной вероятностью

радиационного распада  $A_{3j}^{tot}$ :  $I_{din} = A_{3j-2i} \cdot \hbar \omega_{3j-2i} \cdot \frac{N_p v \cdot g_{3j} \sigma_{1-3j}}{A_{3j}^{tot}}$ , где  $\sigma_{1-3j}$

$\sigma_{3j}$  – сечение возбуждения из основного состояния на уровень  $3j$ ,  $N_p$  – плотность плазмы,  $v$  – скорость пучка. На рисунках 2 представлено отношение сумм интенсивностей  $\sigma$  и  $\pi$  компонент линии  $H_{\alpha}$  как функции плотности плазмы. Виден переход между динамическим и статистическим пределами при увеличении плотности плазмы.

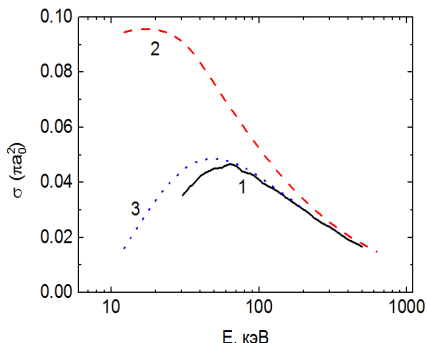


Рис. 1 Сечение возбуждения перехода 100\_320. 1) данные работы [3]; 2) расчет в борновском приближении; 3) расчет в борновском приближении с учетом адиабатического фактора.

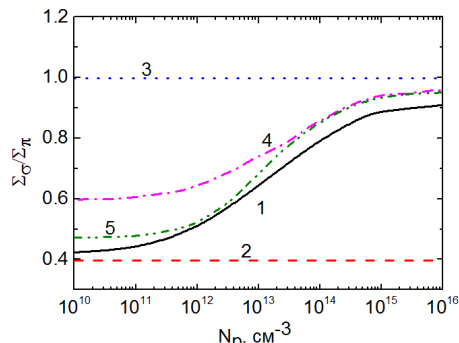


Рис. 2 Отношение суммы интенсивностей  $\sigma$ -компонент к сумме интенсивностей  $\pi$ -компонент как функция плотности плазмы ( $E=100$  кэВ,  $V=5$  Тл). 1) – результат расчета по кинетической модели с учетом ионизации; 2) – динамический предел; 3) – статистический предел; 4) – данные работы [2]; 5) – данные работы [5].

## Литература

- [1]. Крупин В.А. и др.// РАЗРАБОТКА MSE ДИАГНОСТИКИ ПРОФИЛЯ ТОКА ДЛЯ УСТАНОВКИ Т-10, Препринт ИАЭ-5940/7, Москва: РИЦ “Курчатовский институт,” 1995. 33 с.
- [2]. Ralchenko Yu. et al//A non-statistical atomic model for beam emission and motional Stark effect diagnostics in fusion plasmas, Review Scientific Instruments 2012 , vol. 83, 10D504.
- [3]. Marchuk O. et al. Collisional excitation and emission of  $\text{H}\alpha$  Stark multiplet in fusion plasmas // J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys. 2009. Vol. 43, № 1.
- [4]. Бете Г., Солитер Э. Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами, Москва: ГИФМЛ, 1960.
- [5]. von Hellermann M., de Bock M., Marchuk O., Reiter D., Serov S., Walsh M., Simulation of Spectra Code (SOS) for ITER Active Beam Spectroscopy // Atoms, 2019, vol. 7, p. 30

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ТРТ

Миронова Е.Ю., Портоне С.С., Нагорный Н.В., Миронов А.Ю.,  
Семёнов И.Б., Семёнов О.И.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,*  
[E.Mironova@iterrf.ru](mailto:E.Mironova@iterrf.ru)

Для термоядерной установки Токамак с Реакторными Технологиями (ТРТ) проводится проектирование автоматизированной информационно-управляющей системы (АИУС) для обеспечения режимов её работы, управления комплексом диагностических систем, хранения данных и возможности доступа к ним. Несмотря на проектирование автоматизированных систем управления с отставанием на один этап от проектирования самого объекта ввиду уточнения исходных данных, многие моменты необходимо прорабатывать на самых ранних этапах разработки систем объекта.

Для обеспечения интеграции АИУС, диагностических и технологических систем в единый комплекс систем для измерений физических параметров, мониторинга и управления технологическими и физическими процессами на этапе проектирования немаловажно внедрение единых подходов к обозначению технических и информационных объектов, использование средств совместного проектирования, системы управления документацией, средств моделирования, регламентирование инструментов и средств разработки. Планирование инфраструктуры здания должно с запасом учитывать: серверные помещения с поддержкой требуемых для оборудования окружающих условий, систему бесперебойного электропитания, систему кабельных соединений, отдельное помещение для пультовой установки, последующую возможность интеграции систем мониторинга, оповещения, безопасности и контроля доступа.

Автоматизированные информационно-управляющие системы включают: центральную систему управления и центральную пультовую, систему блокировок и защит диагностического оборудования, систему информационной безопасности, систему обработки данных. АИУС ТРТ обеспечивает моделирование и подготовку диагностических данных для системы управления плазмой, локальные вычислительные сети для обмена данными, синхронизации, хранение данных.

В докладе представлены подходы к проектированию систем сбора данных и управления передовых мировых и российских установок УТС исследований типа токамак, структура и планы по проектированию АИУС ТРТ и ее систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» в рамках Государственного контракта №Н.4к.241.09.23.1060 от 17.04.2023 «НИОКР в обоснование программы исследований и технических требований к системам токамака с реакторными технологиями. Этап 2023-2024 годов».

# **РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ТРЕБОВАНИЙ К СОВМЕСТНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ УСТАНОВКИ ТРТ И УПРАВЛЕНИЮ КОНСТРУКТОРСКОЙ И ИНЖЕНЕРНОЙ ДОКУМЕНТАЦИЕЙ В ЕДИНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СРЕДЕ**

Семенов Е.В., Смирнов П.В., Каклюгина Н.А., Пташкина А.Н.,  
Кадыргулов А.А., Сульдин В.А., Портоне С.С.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия*  
[E.Semenov@iterrf.ru](mailto:E.Semenov@iterrf.ru)

Для управления современными проектами применяются системы управления жизненным циклом продукта (PLM), которые позволяют хранить документацию и управлять ею, создавать общую глубоко интегрированную цифровую модель проекта и осуществлять планирование и контроль работ. Использование участниками проекта различных САПР неизбежно приводит к возникновению сложностей с совместимостью данных различных форматов. Поэтому, не смотря на возникающие проблемы, необходимо консолидировать все данные в общей среде PLM, применять к ним единые процессы и строить на их основе единую цифровую модель. Это даст возможность проведения одновременных работ на базе нескольких предприятий из разных городов над узлами установки или отдельной подсистемы в режиме реального времени.

В настоящий момент поставщики организации ИТЭР используют различные программные продукты для выполнения конструкторских работ. При этом нормативная база, а также среда хранения документации, оказались не готовы к такому развитию событий. Кроме того, изначальное отсутствие единого решения по хранению и управлению документацией привело к использованию набора различных баз данных. На основе опыта проекта ИТЭР показано, что требования к совместному проектированию и единая среда управления документацией являются одними из важнейших составляющих для успешного сооружения крупных установок.

Учитывая этот опыт, авторы работы уверены в том, что система PLM, способная обеспечить управление проектом в полном объеме, должна быть внедрена на его начальной стадии. Был произведен мониторинг и анализ доступных на настоящий момент отечественных PLM решений. Этот анализ позволил выбрать программное обеспечение, наиболее отвечающее требованиям проекта.

Ключевыми требованиями к единой PLM для проекта ТРТ являются:

Хранение данных, создание единой базы конструкторских и инженерных документов с поддержкой связей между документами и реализацией единого жизненного цикла изделия с возможностью проведения всех процедур;

Создание структур данных применительно к проекту ТРТ (структура требований, функциональная, геометрическая, структура работ и т.д.);

Осуществление работы с данными различных САПР, возможности интеграции с ними;

Создание единой цифровой модели ТРТ и быстрый доступ к текущему состоянию проектирования установки для отслеживания выполнения планов;

Управление проектом на основе требований, что обеспечивает уменьшение количества ошибок и незапланированных изменений, разработка контекстов и в бизнес-процессах, декомпозиция ТЗ в систему требований;

Модельно-ориентированная системная инженерия как инструмент для разработки и анализа системы требований;

Введение единых правил и требований к разработке, хранению и управлению конструкторской и инженерной документацией в проекте ТРТ.

Для обеспечения единых требований необходима разработка нормативной документации (правил руководств и инструкций), обязательных к выполнению всех участников проекта.

Работа выполнена в рамках государственного контракта с ГК «Росатом» от 22.03.2023 № Н.4к.241.09.23.1036 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в Российской Федерации. Этап 2023 - 2024 годов».



# ПРИМЕНЕНИЕ КОДА OPENMC ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТОКАМАКЕ TRT

Афанасенко Е. С., Родионов Р. Н., Портнов Д. В.,  
Афанасенко Р. С., Высоких Ю. Г., Кормилицын Т. М.,  
Ревякин П. А., Кащук Ю. А.

*Частное учреждение «ИТЭР-центр», г. Москва, Россия,  
[e.afanassenko@iterrf.ru](mailto:e.afanassenko@iterrf.ru)*

С появлением токамаков с высоким нейтронным выходом проведение нейтронно-физического анализа при проектировании конструкции токамака становится необходимостью. Планирование экспериментов и интерпретация полученных результатов требует знания ядерно-радиационных нагрузок. Моделирование переноса нейтронного и гамма-излучений в конструкционных элементах установки позволяет получить распределения нейтронных и гамма-полей, рассчитать мощность источников радиационного энерговыделения, оценить динамику активации конструкций, что важно при проектировании сверхпроводниковых катушек, биологической защиты, систем охлаждения, нейтронных и гамма диагностик плазмы.

OpenMC (Open Monte-Carlo) [1] является одним из расчётных кодов, предназначенных для моделирования процессов переноса ионизирующих излучений в трёхмерной геометрии методом Монте-Карло [2] и предоставляет весь функционал, необходимый для решения вышеуказанных задач. OpenMC является программным комплексом с открытым исходным кодом. Это упрощает его применение, позволяет вносить изменения в код, тем самым развивая данный проект, наращивая его качество силами широкого круга разработчиков и пользователей, а также позволяет модифицировать его под специальные задачи.

В работе проведён нейтронно-физический анализ модели токамака TRT [3], адаптированной для работы с кодом OpenMC. В качестве источника нейтронов рассматривалось

пространственное распределение, соответствующее разряду дейтериевой плазмы с ионной температурой 21 кэВ, электронной плотностью  $9,4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , и полной интенсивностью нейтронного излучения плазмы  $10^{17} \text{ н/с}$ . В результате были получены пространственное распределение плотности потоков нейтронного и гамма-излучений, плотность источников радиационного нагрева в конструкционных элементах токамака. Проведено сравнение результатов моделирования в ключевых точках с другим транспортным кодом, широко используемом в термоядерных исследованиях. Получено хорошее согласие результатов моделирования между двумя кодами, что говорит о больших перспективах работы с кодом OpenMC в будущем как для задач проекта TRT, так и для других установок УТС.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № Н.4к.241.09.23.1060 от 17.04.2023 на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы "НИОКР в обоснование программы исследований и технических требований к системам токамака с реакторными технологиями. Этап 2023-2024 годов".

## Литература

- [1]. Paul K. Romano, Nicholas E. Horelik, Bryan R. Herman, Adam G. Nelson, Benoit Forget, and Kord Smith, "OpenMC: A State-of-the-Art Monte Carlo Code for Research and Development," *Ann. Nucl. Energy*, 82, 90–97 (2015).
- [2]. Бусленко, Н.П. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация на цифровых вычислительных машинах // Ю.А. Шрейдер. М.: Физматгиз, 1961.
- [3]. А. В. Красильников, С. В. Коновалов и др. Токамак с реакторными технологиями (ТРТ): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики // *Физика плазмы*, 2021, том 47, № 11, с. 970–985

# ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕРЖАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НЕРЕЗОНАНСНОМ НАКОПИТЕЛЕ

Атлуханов М.Г.<sup>1,2</sup>, Бурдаков А.В.<sup>1,3</sup>, Касатов А.А.<sup>1,2</sup>,  
Куркуचेков В.В.<sup>1,2</sup>, Попов С.С.<sup>1,2</sup>, Сковородин Д.И.<sup>1,2</sup>,  
Трунев Ю.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, Россия, [m.g.atlukhanov@inp.nsk.su](mailto:m.g.atlukhanov@inp.nsk.su)*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет, НГУ,  
Новосибирск, Россия*

<sup>3</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
НГТУ, Новосибирск, Россия*

В работе [1] представлен первый рабочий прототип нерезонансного фотонного нейтрализатора для отрицательного пучка ионов водорода и дейтерия с энергией 6 - 12 кэВ с эффективностью нейтрализации свыше 90% [2]. Данные экспериментальные результаты показали работоспособность и перспективность такой методики.

Для дальнейшего развития такого подхода, предложен промежуточный эксперимент с энергией отрицательного пучка до 130 кэВ. В связи с этим разработаны новые диэлектрические зеркала с зеркальной поверхностью 500x85 мм с заявленным коэффициентом отражения 0.9995 изготовителем АО «НИИ НПО «ЛУЧ»» [3]. Данные зеркала имеют сложную форму представляющие цилиндрическую центральную часть, плавно переходящую на краях в тор, с технологическим отверстием 500 мкм для ввода излучения. В качестве источника накачки лазерного излучения используется иттербиевый волоконный лазер с мощностью 4 кВт на длине волны 1069 нм компании «ИРЭ-Полус» [4].

Перед проведением эксперимента по нейтрализации, произведена серия экспериментов по измерению эффективности накопления лазерного излучения новых зеркал для различных

случаев взаимного расположения и угловой расходимости вводимого излучения. Идея метода основана на измерении времени жизни излучения в ловушке и его зависимости от привнесенного между зеркалами ослабителя.

Полученный коэффициент отражения составил величину  $0,99961 \pm 1 \cdot 10^{-4}$ . Это соответствует заявленному и обеспечивает эффективность накопления излучения в ловушке  $1/(1-R)$  равную около 2000.

В экспериментах с пучком H<sup>-</sup> при энергии порядка 100 кэВ, диаметром около 1 см и накачкой 4кВт можно ожидать эффективность нейтрализации до 90 %.

Так как основным критерием работоспособности фотонного нейтрализатора является коэффициент отражения зеркал. Данная методика позволит в будущем оценить деградацию коэффициента отражения от времени работы фотонного нейтрализатора на пучке отрицательных ионов.

## Литература

- [1]. S.S. Popov, M.G. Atlukhanov et al. Neutralization of negative hydrogen and deuterium ion beams using non-resonance adiabatic photon trap. 2018 Nucl. Fusion 58 096016
- [2]. S.S. Popov, M.G. Atlukhanov et al. High effective neutralizer for negative hydrogen and deuterium ion beams on base of nonresonance adiabatic trap of photons. 2017. AIP Conference Proceedings. 1869. 050005. 10.1063/1.4995786.
- [3]. <http://sialuch.com/>
- [4]. <https://www.ipgphotonics.com/ru/site>

# МОДЕЛЬ TRT 2022, ЯДЕРНО-РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. (МОДЕЛЬ 22 8Т, 5МА)

Портнов Д. В.<sup>1</sup>, Афанасенко Е. С.<sup>1,2</sup>, Родионов Р. Н.<sup>1</sup>,  
Афанасенко Р. С.<sup>1</sup>, Высоких Ю. Г.<sup>1</sup>, Кашук Ю. А.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Частное учреждение «ИТЭР-центр», г. Москва, Россия,

[d.portnov@iterrf.ru](mailto:d.portnov@iterrf.ru)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», г. Москва, Россия

Модель токамака TRT [1] была использована для расчета ядерно-радиационных нагрузок на конструктивные элементы установки, а также оценок. Данная работа является развитием предварительных оценок, сделанных в [2]. Новая версия геометрической модели содержит на два порядка больше элементов. Изменилось положение экваториальных и диверторных портов. Вместо кольцевого источника нейтронов был применен нейтронный источник, рассчитанный для равновесного состояния плазмы (дейтерий,  $B_0=8Т$ ,  $I=5МА$ ,  $T_i=21кэВ$ ,  $n_e=9.4e19м^{-3}$ ). Полный выход нейтронов с такой плазмой достигает  $\approx 1e17с^{-1}$ . Геометрическая модель все еще имеет эскизный характер – в ней отсутствует ряд существенных для нейтронного транспорта элементов. Нам пришлось сделать некоторые предположения и дополнить исходную геометрическую модель, там, где это было абсолютно необходимо, например, частично заполнить пространство портов. В остальном геометрическая модель была использована как есть. При таком подходе в области вокруг установки ожидаемо получаются завышенные величин полей частиц и мощности дозы. Однако и такая оценка позволяет судить о требуемом уровне радиационной защиты и условиях работы диагностик.

В результате работы были получены распределения нейтронных и фотонных полей, энергосвыделения, мощности

дозы. Распределения были получены как обзорные – в кубе, объемлющем установку, так и более детальные в пространствах портов и тороидальной катушки. Один из портов (№13) модели представлял коллиматор для нейтронной диагностики. Получены также интегральные значения нагрузок по критическим элементам установки, включая, в частности, вакуумную камеру, тороидальную катушку.

Полученные результаты позволяют утверждать, что необходимо применение водо-стальной защиты с добавлением бора даже для чисто дейтериевой плазмы.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № Н.4к.241.09.23.1060 от 17.04.2023 на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы "НИОКР в обоснование программы исследований и технических требований к системам токамака с реакторными технологиями. Этап 2023-2024 годов".

### Литература

- [1]. А. В. Красильников, С. В. Коновалов и др. Токамак с реакторными технологиями (ТРТ): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики // Физика плазмы, 2021, том 47, № 11, с. 970–985
- [2]. Портнов Д.В., Высоких Ю.Г., Кашук Ю.А., Родионов Р.Н. Токамак с реакторными технологиями (TRT): предварительный анализ ядерного энерговыделения в катушках тороидального поля//Физика Плазмы, 2021, Vol.47, Токамак с реакторными технологиями (TRT), No. 12.

**ЧИСТОЕ СБОРОЧНОЕ ПОМЕЩЕНИЕ ДЛЯ  
ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИТЭР В  
ИЯФ СО РАН**

Иванцовский М.В.<sup>1</sup>, Бурдаков А.В.<sup>1,3</sup>, Суляев Ю.С.<sup>1,2</sup>,  
Гавриленко Д.Е.<sup>1</sup>, Шабунин Е.В.<sup>1</sup>, Шошин А.А.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия,  
[M.V.Ivantsivsky@inp.nsk.su](mailto:M.V.Ivantsivsky@inp.nsk.su)*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет, Новосибирск,  
Россия*

<sup>3</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, Россия*

Все конструкторские и производственные процессы, связанные с проектом ИТЭР обязаны следовать правилам кода RCC-MR 2007. Согласно данному коду сборка элементов реактора, относящихся к первому контуру охлаждения ядерной электростанции, должна происходить в чистом помещении 1го класса чистоты по RCC-MR, что соответствует 7му классу чистоты по ISO.

Диагностические порты в составе диагностической первой стенки (ДПС), диагностического защитного модуля (ДЗМ) и корпуса порт-плага (ПП) содержат каналы охлаждения и располагаются внутри вакуумной камеры непосредственно в видимости плазмы. Данные конструкции по классификации приравниваются к первому контуру охлаждения атомных электростанций. Для обеспечения данных требований возникла необходимость в разработке, проектировании и организации чистого помещения для сборки порт-плагов в ИЯФ СО РАН.

# ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИТЭР

Гавриленко Д.Е.<sup>1</sup>, Бурдаков А.В.<sup>1,3</sup>, Иванцовский М.В.<sup>1</sup>,  
Шошин А.А.<sup>1,2,3</sup>, Полосаткин С.В.<sup>1,2,3</sup>, Суляев Ю.С.<sup>1,2</sup>,  
Таскаев А.С.<sup>1</sup>, Кашук Ю.А.<sup>4</sup>, Обудовский С.Ю.<sup>4</sup>, Степанов С.Б.<sup>4</sup>,  
Кормилицын Т.М.<sup>4</sup>, Филиппов Г.А.<sup>5</sup>, Долматов Д.О.<sup>5</sup>,  
Жвырбля В.Ю.<sup>5</sup>, Конева Д.А.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> *Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия,*

[D.E.Gavrilenko@inp.nsk.su](mailto:D.E.Gavrilenko@inp.nsk.su)

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

<sup>3</sup> *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

<sup>4</sup> *Частное учреждение ГК «РосАтом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия*

<sup>5</sup> *Томский Политехнический Университет, Томск, Россия*

Одним из основных направлений деятельности научных и производственных учреждений, вовлеченных в строительство международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР, является разработка специальных технологических процессов для изготовления диагностических систем. От качества выполнения технологических процессов напрямую зависит своевременный запуск установки и успешная реализация научной программы.

В докладе представлен обзор результатов работы по разработке, апробации и аттестации специальных технологических процессов, применяемых при изготовлении элементов диагностических систем – ДМНП, ВНК, Экваториального порта №11.

В частности, с учетом невозможности контроля сварных соединений каналов системы водяного охлаждения ЭПП №11, в



ИЯФ СО РАН совместно со специалистами Томского политехнического университета была разработана и протестирована система роботизированной ультразвуковой томографии для контроля качества сварных соединений нержавеющей стали 316L(N)-IG.

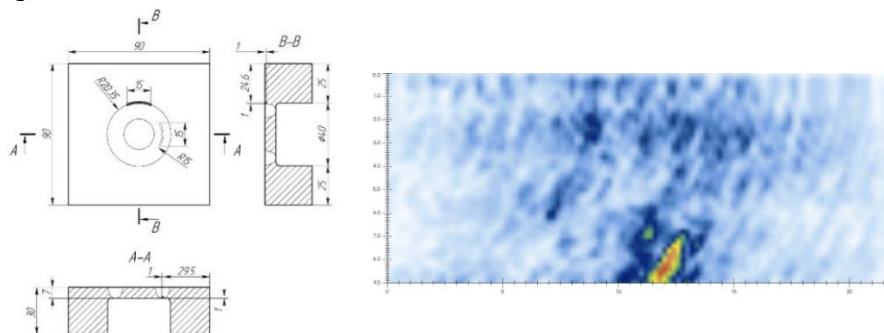


Рисунок 1 – Результат сканирования блока, содержащего паз-непровар в корне шва

Процедура ультразвукового сканирования сварных соединений для ЭП №11 разработана, прошла квалификацию и согласована в МО ИТЭР.

# ПИТАНИЕ СИСТЕМЫ ВЧ ОЧИСТКИ ПЕРВЫХ ЗЕРКАЛ ОПТИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИК ИТЭР

Самсонов Д.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,  
[d.samsonov@mail.ioffe.ru](mailto:d.samsonov@mail.ioffe.ru)

Применение оптических методов диагностики в токамаке ИТЭР предполагает размещение собирающих и передающих зеркал внутри вакуумного объема установки. Зеркала, расположенные в непосредственной близости от плазмы токамака, подвержены деградации отражательной способности из-за осаждения продуктов эрозии первой стенки. Порядок эксплуатации ИТЭР не допускает достаточно частое периодическое извлечение таких зеркал из вакуумного объема для обслуживания или замены. Основным способом восстановления отражения в этих условиях является удаление осадений при помощи ионных потоков из плазмы ВЧ разряда, образованного локально у поверхности зеркала.

Для эффективного и контролируемого вклада мощности в ВЧ разряд требуется согласование импедансов источника, подводящей линии и нагрузки. С этой целью ранее предложено [1] устанавливать в непосредственной близости от разрядной нагрузки простое предсогласующее устройство в виде Г-образного четырехполюсника. Выбор параметров этого четырехполюсника должен основываться на данных об импедансе нагрузки. На рабочей частоте около 80 МГц, которая признана компромиссной по критериям селективности очистки, потерь ВЧ мощности, а также энергетического спектра ионного потока, импеданс нагрузки определяется не только плазмой ВЧ разряда, но и паразитными реактивными элементами, неизбежно вносимыми конструкцией узла первого зеркала, такими как емкость зеркала-электрода относительно заземленного корпуса, а также индуктивность соединителя между зеркалом и предсогласователем.

Ограниченный выбор материалов и технологий, доступных для применения внутри вакуума ИТЭР, привел к выбору для реализации согласующего четырехполюсника планарных неподстраиваемых элементов на подложке из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью. В результате экспериментальной работы с макетом такого узла стало ясно, что компенсация неточностей расчета планарной топологии, неоднозначностей при сборке узла предсогласования, а также трудностей с точным определением импеданса ВЧ разряда все же требуют введения в конструкцию предсогласователя возможности однократной подстройки при начальной наладке узла.

В докладе рассмотрена структура эквивалентной электрической схемы цепи разрядной нагрузки, полученная в результате сопоставления измеренного входного импеданса макета сборки зеркала с расчетом эквивалентной сосредоточенной цепи и конечно-элементным расчетом трехмерной структуры. Показано, что при реалистичных геометрических параметрах наблюдается резонанс на частотах в диапазоне 200-300 МГц, положение которого чувствительно к однозначности сборки конструкции, и влияет на входной импеданс на рабочей частоте, а потери в этой структуре могут оказаться сопоставимыми с вкладом мощности в сам ВЧ разряд.

Импеданс плазмы ВЧ разряда, включенный в эквивалентной схеме параллельно паразитной емкости зеркала-электрода, нелинейно изменяется в зависимости от частоты, давления, мощности и состава рабочего газа. Его значения измеренные экспериментально сравнивались с результатами численного расчета при помощи модели, основанной на нелинейной эквивалентной схеме замещения ВЧ емкостного разряда [2]. Расчет проводился с учетом внешней цепи, параметры которой оставались неизменными, отражая реальную конфигурацию предсогласователя. Определены параметры предсогласующего устройства, диапазон изменения импеданса нагрузки, а также сделана оценка диапазона параметров рабочей точки разряда, при которой вклад мощности в ВЧ разряд остается приемлемым. С

помощью полноволнового конечно-элементного моделирования выполнен синтез планарной топологии предсогласующего устройства. Показано, что с хорошей точностью характеристика узла совпадает с характеристикой цепи на сосредоточенных элементах. Предложена эскизная конструктивная реализация узла предсогласования с однократной подстройкой при наладке путем поворота обкладок емкостных элементов.

В результате проведенного анализа предложена законченная последовательность шагов для синтеза электрических параметров и конструктивной реализации предсогласующего устройства, позволяющая перейти к его макетированию.

### **Литература**

- [1]. Резанов Д.А., Орешко И.В., Самсонов Д.С., Мухин Е.Е. Сogласующее устройство в составе системы ВЧ очистки узла первых зеркал оптической диагностики ИТЭР. Сборник тезисов докладов XIII конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение». Москва, 07-09 декабря 2022 г. (с. 87-90).
- [2]. Schmidt F., Mussenbrock T., Trieschmann J. Consistent simulation of capacitive radio-frequency discharges and external matching networks //Plasma Sources Science and Technology. – 2018. – Т. 27. – №. 10. – С. 105017.

# КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ВЫСОКООТРАЖАЮЩИЕ ЗЕРКАЛА НА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 316L(N)-IG ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИТЭР

Терещенко И.Б.<sup>1</sup>, Самсонов Д.С.<sup>1</sup>, Мухин Е.Е.<sup>1</sup>, Коваль А.Н.<sup>1</sup>,  
Марчий Г.В.<sup>1</sup>, Григорьева О.А.<sup>1</sup>, Толстяков С.Ю.<sup>1</sup>, Чернаков  
П.В.<sup>2</sup>, Богачев Д.Л.<sup>2</sup>, Маринин Г.В.<sup>3</sup>, Терентьев Д.В.<sup>3</sup>, Пискарев  
П.Ю.<sup>4</sup>, Маханьков Н.А.<sup>4</sup>, Солк С.В.<sup>5</sup>, Патрикеев В.Е.<sup>6</sup>,  
Худолей А.Л.<sup>7</sup>, Кумейша П.Н.<sup>7</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ООО «Спектрал-Тех», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>ООО «РУССКИЕ ТЕХНОЛОГИИ», Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup>АО НИИ ОЭП, Сосновый Бор, Россия

<sup>6</sup>АО ЛЗОС, Лыткарино, Россия

<sup>7</sup>ИТМО им. А.В. Лыкова, Минск, Беларусь

Зеркала систем сбора света оптических диагностик ИТЭР должны обеспечить долговременную оптическую стабильность в условиях значительных эксплуатационных, радиационных, тепловых и прочих нагрузок. Типичное расстояние 5-8 метров от исследуемой плазмы до границы вакуума приводит к необходимости использовать несколько зеркальных отражений внутри вакуума, что предъявляет высокие требования к коэффициенту отражения каждого зеркала [1]. Для диагностики томсоновского рассеяния (ТР) в комбинации с лазерно-индуцированной флуоресценцией (ЛИФ) в диверторе ИТЭР эта проблема стоит наиболее остро, так как расстояние до границы вакуума здесь достигает ~10 метров. Для обеспечения достаточного уровня полезного сигнала и ввиду малой величины сечения томсоновского рассеяния при зондировании плазмы используется лазерное излучение с параметрами 3 Дж 3 нс 100 Гц, а рассеянное излучение необходимо собирать в телесном угле вдоль хорды 1/10, поперек 1/20 и с минимальными потерями

предавать на спектрально-аналитическую аппаратуру. На качество передачи рассеянного излучения влияют стабильность формы поверхности и пространственного положения зеркальных поверхностей, а также отражающая способность, которая характеризуется зеркальным и диффузным отражением.

Отражающая способность определяется выбором материала отражающей поверхности, а также способом ее подготовки. В качестве материала крупногабаритных зеркал [2] первоначально рассматривался SiC, однако макет зеркала из него не прошел виброиспытания из-за высокой хрупкости материала. Также существовала проблема нагрева таких зеркал в режиме отжига. Вышеупомянутые недостатки привели к отказу от SiC в качестве материала зеркал в пользу нержавеющей стали 316L(N)-IG. Создание крупногабаритных зеркал из нержавеющей стали 316L(N)-IG является достаточно новым подходом, и методы получения высококачественных оптических поверхностей в таком случае мало изучены. Спектральный коэффициент отражения в видимом диапазоне стали 316L(N)-IG не превышает 68% и для увеличения отражательной способности необходимо формировать зеркальное покрытие. С точки зрения максимизации отражения в видимой и ближней ИК области и наиболее подходящим материалом является Ag. Для снижения активации необходимо наносить его по тонкопленочной технологии. Отражательная способность тонкой пленки (величина диффузного отражения), а также ее структурная целостность (адгезия, растрескивание) определяется способом подготовки подложки и способом нанесения оптического покрытия.

Одной из возможных причин деградации оптической поверхности зеркал в вакуумном объеме ИТЭР является аварийный выброс пара. В случае такой аварии все элементы продолжительное время находятся под воздействием влажности более 90%, а температура может достигать 240°C и более.

Серебро подвержено деградации в таких условиях [3], поэтому его надо защищать. В качестве защиты отражающего слоя Ag выбрано тонкое многослойное диэлектрическое покрытие, полной толщиной не более 30 нм. Проведенные

эксперименты показали, что при одинаковой полной толщине защитного покрытия увеличение количества интерфейсов в защитном покрытии уменьшает падение отражения после экспозиции в паре, и при 5 слоях оно практически отсутствует.

Оптическое качество поверхности зависит от способа ее образования. В докладе приводится сравнение образцов из нержавеющей стали 316L(N)-IG малого размера, поверхность которых образована абразивным полированием, магнитореологическим полированием, а также алмазным точением слоя меди, присоединенного к нержавеющей стали методом горячего изостатического прессования. Качество отражающих поверхностей сравнивается с применением функции отражательной способности (ДФОС, англ. Bidirectional reflectance distribution function – BRDF), которая связана с функцией распределения рассеянного света (ФРПС, англ. Angle Resolved Scattering – ARS):  $BRDF(\theta_s) = ARS(\theta_s)/\cos(\theta_s)$ , где  $\theta_s$  – а угол рассеяния [4].

### Литература

- [1]. Samsonov, D., Tereschenko, I., Mukhin, E., Gubal, A., Kapustin, Yu., et al. Nuclear Fusion, 62, 2022
- [2]. Mukhin, E., Semenov, V., Razdobarin, A., Tolstyakov, S., Kochergin, M., Kurskiev, G., Podushnikova, K., et al. Nuclear Fusion 52, 2012
- [3]. Folgner K. A. et al. Applied Optics 59, 2020
- [4]. Schröder S., Duparré A., Coriand L., Tünnermann A., Penalver D., et al. Optics Express, 19, 2011

# ЦИКЛИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ЗАЩИТНОГО ОКНА И ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ОТ БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩИХ ОСАЖДЕНИЙ

Елец Д.И.<sup>1,2,3</sup>, Дмитриев А.М.<sup>1</sup>, Раздобарин А.Г.<sup>1,2,3</sup>,  
Снигирев Л.А.<sup>1</sup>, Медведев О.С.<sup>1,2,3</sup>, Мухин Е.Е.<sup>1</sup>,  
Толстяков С.Ю.<sup>1</sup>, Куприянов И.Б.<sup>4</sup>, Буховец В.Л.<sup>5</sup>,  
Городецкий А.Е.<sup>5</sup>, Маркин А.В.<sup>5</sup>, Залавутдинов Р.Х.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,

[elets.denis@mail.ioffe.ru](mailto:elets.denis@mail.ioffe.ru)

<sup>2</sup>НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия, [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru)

<sup>3</sup>БФУ им. И. Канта, Калининград, [post@kantiana.ru](mailto:post@kantiana.ru)

<sup>4</sup>ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, Москва, Россия, [yniinm@rosatom.ru](mailto:yniinm@rosatom.ru)

<sup>5</sup>ИФХЭ РАН, Москва, [dir@phychе.ac.ru](mailto:dir@phychе.ac.ru)

Для термоядерных установок, таких как ИТЭР и ТРТ одним из рассматриваемых материалов первой стенки является бериллий [1]. Во время работы токамака в режиме горения термоядерной плазмы под действием потоков высокоэнергетических нейтралов, стационарных и импульсных тепловых нагрузок различной природы (срывы плазмы, ELM-ы и проч.) ожидается образование значительного количества продуктов эрозии первой стенки с последующим их пересаживанием на внутренней поверхности вакуумного объема. Комбинация данных нагрузок будет приводить к деградации поверхности и структуры бериллиевой облицовки, а также накоплению в пересаживаемых слоях термоядерного топлива [2]. Кроме того, осаждение материалов, состоящих из продуктов эрозии материалов первой стенки (в основном – бериллий и вольфрам) может оказать существенное влияние на параметры оптических компонентов диагностик, расположенных вблизи первой стенки. [3].

С целью увеличения срока службы диагностических систем разрабатываются различные способы защиты



внутривакуумных оптических элементов от запыления, а также различные методы очистки загрязненной поверхности внутривакуумных оптических элементов от осадений продуктов эрозии первой стенки. На данный момент для очистки первого оптического элемента системы сбора света в диагностике томсоновского рассеяния (ДТР) рассматривается метод физического распыления осажденного материала в высокочастотном емкостном разряде [4]. Очистку первого окна системы ввода лазерного излучения планируется производить при помощи абляции сформированных осадений проходящим через окно пучком лазерного излучения.

По причине высокой токсичности бериллия значительное количество исследований по накоплению изотопов водорода и влиянию осадений на параметры обращенных к плазме оптических компонентов проводятся с использованием модельных материалов [5]. Тем не менее, вследствие уникальных физико-химических свойств бериллия модельные эксперименты требуют подтверждения с использованием бериллиевых и бериллийсодержащих осадений.

Для обеспечения возможности проведения таких исследований, на базе ВНИИНМ им. А.А. Бочвара была создана установка, позволяющая проводить последовательное напыление бериллийсодержащих пленок методом магнетронного осаждения и *in-situ* плазменную и лазерную очистку оптических элементов без необходимости развакуумирования установки. Формирование бериллийсодержащих пленок осуществляется при помощи ВЧ магнетрона, работающего на частоте 13,56 МГц. Бериллиевая мишень была изготовлена из российской марки ТГП-56ПС, одобренной для применения в ИТЭР. Полученные пленки бериллия были охарактеризованы при помощи сканирующей электронной микроскопии (SEM), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX), рентгеновская фотоэлектронной спектроскопии (XPS) и других методов исследования поверхности. Представлены основные результаты циклических экспериментов по осаждению бериллийсодержащих пленок и их очистки с поверхности защитных окон и первого

зеркала диагностики томсоновского рассеяния в диверторе токамака ИТЭР. В качестве перспективных материалов оптических элементов использовались окна из плавленого кварца КУ-1, монокристаллического сапфира, боросиликатного стекла, а также зеркала из монокристаллического молибдена. Для удаления бериллийсодержащих осадений применялось два метода – плазменная и лазерная очистка. Плазменная очистка осуществлялась при помощи ВЧ емкостного разряда с частотой 81 МГц в гелии при давлении 2 Па. Лазерная очистка осуществлялась при помощи Nd:YAG лазера с длительностью импульса 12 нс, энергией в импульсе 0,2 Дж и частотой следования импульсов 100 Гц. Процесс напыления и очистки контролировался путем измерения интенсивности отражения лазерного излучения на длине волны 532 нм от поверхности кварцевого образца. Оптические характеристики исследуемых образцов определялись, как между циклами осаждения/удаления, так и по завершении экспериментальной серии. В докладе обсуждается эффективность плазменной и лазерной очистки оптических элементов диагностики от бериллийсодержащих осадений, а также стойкость материалов зеркал/окон и возможные требования к системам очистки. Кроме того, обсуждается возможность применения данной экспериментальной установки для формирования модельных образцов и отработки комплекса диагностик состояния первой стенки токамака включая накопление изотопов водорода в переосажденных слоях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 23-79-00023, <https://rscf.ru/project/23-79-00023/>

## Литература

- [1]. I.B. Kupriyanov et al., Fus. Eng. Des. 124 (2017), 1004-1010
- [2]. R. Mitteau et al., Fus. Eng. Des. 85 (2010), 2049-2053
- [3]. A. Litnovsky et al., Fusion Eng. Des. 86 (2011), 1780 (4pp)
- [4]. A.M. Dmitriev et al., Fusion Eng. Des. 146A (2019), 1390 (4pp)
- [5]. A.G. Razdobarin et al., J. Nucl. Fusion 55 (2015) 093022

# РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВНУТРИКАМЕРНЫХ УЗЛОВ ПНЕВМОПРИВОДОВ ЗАЩИТНОЙ ШТОРКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ ИТЭР

Вуколов Д.К.<sup>1,2</sup>, Алексеев А.Г.<sup>1,2</sup>, Морозов А.А.<sup>1,2</sup>,  
И.Д. Карпушов<sup>1</sup>, Е.Н. Андреев<sup>1,2</sup>, Ю.В. Капустин<sup>1,2</sup>,  
А.А. Куров<sup>3</sup>, А.С. Ерошкин<sup>3</sup>, А.Г. Вараксин<sup>3</sup>, И.А. Банов<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>УТС-Центр, Москва, Россия, [yukolod\\_dk@fc.iterru.ru](mailto:yukolod_dk@fc.iterru.ru)

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия,  
[yukolov\\_dk@nrcki.ru](mailto:yukolov_dk@nrcki.ru)

<sup>3</sup>АО «КБ РЭ», Фрязино, Россия.

Защитная шторка является одним из неотъемлемых элементов оптических диагностик высокотемпературной плазмы, позволяющим увеличить ресурс работы внутрикамерных оптических элементов и вакуумных окон, предотвращая их деградацию при проведении процедур очистки первой стенки вакуумной камеры. Для установки ИТЭР, в условиях длительного межсервисного интервала, требуется обеспечение особой надежности систем, включая защитную шторку.

Основным узлом, определяющим долговременную работу защитной шторки без обслуживания в условиях экспериментального токамак-реактора, является ее привод. Особой надежности требуют внутрикамерные узлы вне оперативной досягаемости. Дополнительные требования к конструкции предъявляют правила безопасности на установках с применением трития.

Доклад посвящен вопросам проектирования, изготовления, проведения квалификационных и приёмосдаточных испытаний внутрикамерных узлов привода защитной шторки (УПЗШ) для диагностики «Спектроскопия водородных линий и примесей» ИТЭР. Представлены основные требования к

таким узлам, приведены результаты сравнительного анализа и выбора перспективного типа привода и схемы компоновки [1] в диагностических портах вакуумной камеры ИТЭР, изложены основные отличительные особенности устройства и функционирования УПЗШ и передаточного механизма шторки. Детально описаны все этапы проведенных испытаний и приведены их результаты [2]. Освещены вопросы подготовки технической документации в соответствии с требованиями ИТЭР, технологической проработки изготовления деталей УПЗШ и обеспечения надежных сварных соединений, особенностей маркировки, очистки, приёмосдаточных испытаний и упаковки изделий для последующей поставки на сборочные площадки порт-интеграторов. Перечислены встретившиеся в процессе работы проблемы, извлеченные из них уроки и практические выводы.

### **Литература**

- [1]. Christian Vorpahl, Andrey Alekseev et al. ITER diagnostic shutters. – Fusion Engineering and Design, Volume 123, November 2017, Pages 712-716; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.05.111>.
- [2]. D. Vukolov et al. Shutter tests, welding procedures and qualification, lessons learnt. – 55.E2 FDR of in-PP diagnostic, ITER documentation, January 2021; <https://user.iter.org/?uid=4RGNTL>.

## АКТУАТОРЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ВАКУУМНОМ ОБЪЁМЕ ИТЭР

Панкратьев П.А.<sup>1</sup>, Смирнова Е.П.<sup>1</sup>, Гук Е.Г.<sup>1</sup>, Раздобарин А.Г.<sup>1</sup>,  
Медведев О.С.<sup>1</sup>, Елец Д.И.<sup>1</sup>, Букреев И.М.<sup>1</sup>, Толстяков С.Ю.<sup>1</sup>,  
Чернаков А.П.<sup>1</sup>, Чернаков П.В.<sup>2</sup>, Климов В.Н.<sup>3</sup>, Кириенко И.Д.<sup>4</sup>,  
Модестов В.С.<sup>4</sup>, Мухин Е.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,

[post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)

<sup>2</sup>ООО Спектрал-тех, Санкт-Петербург, Россия,

[sales@spectraltech.ru](mailto:sales@spectraltech.ru)

<sup>3</sup>НИЦ “Курчатовский институт” – ЦНИИ КМ “Прометей”,  
Санкт-Петербург, Россия, [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)

<sup>4</sup>СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,

[office@spbstu.ru](mailto:office@spbstu.ru)

Для защиты диагностических систем от напыления и распыления частицами из плазмы, внутри вакуумного объёма ИТЭР будут работать несколько десятков подвижных затворов. Высокие температуры и значительный флюенс нейтронов во внутривакуумном объёме ИТЭР в совокупности с мощным магнитным полем затрудняют применение электромагнитных приводов в качестве актуаторов механических перемещений. Одним из наиболее перспективных вариантов считается использование пьезодвигателей. В докладе представлен результат исследований пьезодвигателя резонансного типа, разработанного на основе высокотемпературной пьезокерамики.

Ключевой проблемой создания пьезодвигателя для ИТЭР является подбор пьезокерамики, обладающей радиационной стойкостью в сочетании с высокой рабочей температурой. Проведенные ранее испытания ультразвукового пьезопривода показали, что при правильном выборе керамики, такой тип мотора способен сохранять работоспособность при дозах облучения более  $10^{19}$  см<sup>-2</sup> быстрыми нейтронами (> 0.1 МэВ) и гамма-квантами (> 0.1 МэВ) [1,2]. Согласно результатам

компьютерного моделирования, дозы такого порядка ожидаются в предполагаемом месте расположения данного мотора на диагностике томсоновского рассеяния на токамаке ИТЭР за всё время его эксплуатации. Конструкция двигателя предполагает вращение керамического подшипника, являющегося одновременно выходным валом. При этом, спецификой данного мотора являются высокая скорость вращения  $\sim 7$  об/с в сочетании с низким крутящим моментом  $\sim 0.01$  Н $\times$ м на выходе. Двигатель с такими характеристиками способен быстро приводить в движение небольшие шторки массой до 30 г. В докладе будет представлен результат испытаний пьезодвигателя с редуктором, который призван обеспечить увеличение крутящего момента за счет перехода к медленному вращению.

Была разработана концепция и изготовлен прототип затвора с комбинированной системой работы актуатора, состоящего из биметаллических пластин, соединённых перемычкой и позволяющего перемещать затвор на расстояния порядка 20 - 40 мм в условиях вакуума как при наличии, так и в отсутствие магнитного поля. В отсутствие магнитного поля, актуатор приходит в движение благодаря деформации биметаллических элементов, нагрев которых происходит при пропускании через них тока порядка 20 А. Цикл открытия/закрытия затвора в этом режиме составляет около 5 мин. Актуатор должен располагаться в вакуумном объёме таким образом, чтобы при протекании постоянного тока через перемычку, открытие затвора происходило под действием силы Лоренца. Закрытие затвора в таком режиме происходит сразу после отключения тока. С помощью компьютерного моделирования была разработана конструкция и подобраны материалы, после чего, был создан прототип с биметаллическими пластинами из нержавеющей стали и тантала. Были проведены испытания данного двигателя при нормальных условиях в магнитном поле 0.4 Тл, а также испытания в вакууме без магнитного поля при остаточном давлении 5 Па. При эксплуатации в магнитном поле время полного открытия затвора зависит от формы фронта сигнала. Во время испытаний, ток

линейно нарастал до максимального значения за времена порядка ~10 с, за которые затвор полностью открывался. Для актуатора такого типа разработана система фиксации в открытом и закрытом положении. Основные компоненты системы работают на том же принципе что и основной актуатор. С одной стороны, фиксаторы надёжно фиксируют затвор и препятствуют его колебаниям при возможных трясках и вибрациях, с другой стороны дают возможность не пропускать электрический ток в течение всего времени работы диагностической системы. Проведена адаптация конструкции актуатора для использования в диагностике мониторинга эрозии первой стенки ИТЭР.

### **Литература**

- [1]. E.E. Mukhin et al., Fusion Eng. Des. 176, 113017 (2022).
- [2]. E.E. Мухин, и др., Письма в ЖТФ 48(23), 6 (2022).

## УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОКАМАК МИФИСТ-0: СОСТОЯНИЕ НА 2023 ГОД

С.А. Крат<sup>1</sup>, А.С. Пришвицын<sup>1</sup>, Н.Е. Ефимов<sup>1</sup>, Ф.С. Подоляко<sup>1</sup>,  
А.И. Алиева<sup>1</sup>, А.С. Белов<sup>1</sup>, И.И. Пашков<sup>1</sup>, Е.А. Виницкий,  
А.Д. Изарова<sup>1</sup>, М.Е. Попов<sup>1</sup>, П.М. Юрченков<sup>1</sup>, Д.В. Колодко<sup>1</sup>,  
А.В. Казиев<sup>1</sup>, В.А. Тумаркин<sup>1</sup>, К.Л. Губский<sup>1</sup>, Д. Синельников<sup>1</sup>,  
Д. Булгадарян<sup>1</sup>, А.В. Грунин<sup>1</sup>, Л.Б. Беграмбеков<sup>1</sup>, В.В. Вайтонис<sup>1</sup>  
А.И. Мещеряков<sup>1</sup>, А.В. Мельников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, Россия, [Sakrat@mephi.ru](mailto:Sakrat@mephi.ru)*

Эксплуатация крупных научных установок, таких как токамаки Т-15МД, Глобус-М2, создающиеся сейчас проекты ТРТ и ИТЭР требует высококвалифицированного персонала с широким диапазоном специализаций. Каждый тип диагностики, применяемой на токамаке, требует узкого специалиста по этой диагностике. Также необходимы физики-экспериментаторы и физики-теоретики, знакомые как с физикой плазмы, так и с вопросами взаимодействия плазмы с поверхностью. Подготовка специалистов по данным направлениям не может быть полной без прохождения ими практики на установках типа токамак, по своим свойствам приближенным к крупным установкам. Одновременно с этим использование крупных установок в качестве учебных нецелесообразно и подчас невозможно. Малый университетский токамак МИФИСТ-0 [1] является ответом на означенную проблему и создан как учебная площадка для подготовки высококвалифицированных кадров у области управляемого термоядерного синтеза. При этом сам процесс создания и улучшения токамака, происходящий с активным привлечением студентов, также решает задачу подготовки новых кадров.

Токамак МИФИСТ-0 – сферический токамак с большим радиусом  $R=24$  см, малым радиусом  $a=13$  см, аспектным соотношением 1.9, вертикальной вытянутостью по камере  $\sim 2.2$ . Токамак имеет 6 экваториальных патрубков проходным диаметром



154 мм. Остаточный вакуум составляет  $\sim 10^{-6}$  мБар и достигается после  $\sim 1$  суток откачки без необходимости прогрева камеры.

В конструкции токамака применён ряд решений, позволяющий уменьшить стоимость, сложность и инфраструктурные требования токамака. В частности, вместо отдельных тороидальных катушек, для создания тороидального поля применяется тороидальный соленоид, что позволяет добиться идеального согласования тока между отдельными витками соленоида. Для уменьшения влияния рассеянных полей от центрального соленоида и облегчения начальных стадий развития разряда соленоид последовательно соединяется с наборами тороидальных витков, формируя распределённый воздушный индуктор.

Для облегчения пробоя токамак оснащён системой СВЧ преионизации на частоте 2.45 ГГц мощностью 1 кВт с настраиваемым согласованием и поляризацией вводимой мощности, возможностью измерения падающей и отражённой мощности в течение разряда.

Токамак оснащён ВЧ антенной, принципиально позволяющей вводить большую мощность ( $> 1$  МВт в коротком импульсе) на частотах  $\sim 10$  МГц. На данный момент токамак оснащён.

Токамак оснащён набором диагностик, позволяющим определять основные параметры плазмы несколькими методами. Часть диагностик также разработана и создана силами НИЯУ МИФИ.

В представленном докладе описывается состояние работ на токамаке МИФИСТ-0 на начало сентября 2023 года. Представляются осциллограммы полученных разрядов и приводятся полученные характеристики плазмы. Описываются ближайшие и среднесрочные планы по развитию площадки токамака МИФИСТ-0 как учебной и научной установки.

## Литература

- [1]. S.A. Krat et al, MPhIST-0 tokamak for education and research, Fusion Science and Technology, 79(4):1-19

# ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ТОКАМАКА МИФИСТ-0

А.С. Пришвицын<sup>1</sup>, С.А. Крат<sup>1</sup>, Н.Е. Ефимов<sup>1</sup>, Ф.С. Подоляко<sup>1</sup>,  
А.И. Алиева<sup>1</sup>, А.С. Белов<sup>1</sup>, И.И. Пашков<sup>1</sup>, Е.А. Виницкий,  
А.Д. Изарова<sup>1</sup>, М.Е. Попов<sup>1</sup>, П.М. Юрченков<sup>1</sup>, Д.В. Колодко<sup>1</sup>,  
А.В. Казиев<sup>1</sup>, В.А. Тумаркин<sup>1</sup>, К.Л. Губский<sup>1</sup>, Д. Синельников<sup>1</sup>,  
Д. Булгадарян<sup>1</sup>, А.В. Грунин<sup>1</sup>, Л.Б. Беграмбеков<sup>1</sup>, В.В. Вайтонис<sup>1</sup>,  
А.И. Мещеряков<sup>1</sup>, А.В. Мельников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ», Москва, Россия, [ASPrishvitsyn@mephi.ru](mailto:ASPrishvitsyn@mephi.ru)

Функционал токамака как научной установки определяется его диагностическим комплексом, позволяющим определять параметры плазмы, исследовать физические процессы, происходящие в ней и при её взаимодействии с поверхностью. Исходя из этого положения, учебный токамак, каковым является токамак МИФИСТ-0, должен обладать репрезентативным набором диагностик, позволяющим определять все основные параметры плазмы, являющимся достаточно характерным для более крупных исследовательских токамаков, и максимально широким по представленному набору диагностических средств. При этом, так как диагностический комплекс должен в основном использоваться студентами в процессе их подготовки, он должен быть достаточно прост в обращении, надёжен в использовании

На токамаке МИФИСТ-0 основным ограничением по используемым диагностикам является малое количество диагностических патрубков (6 патрубков ДУ154 в экваториальной плоскости). Это делает необходимой возможность быстрой смены диагностик для демонстрации максимально широкого комплекса диагностик. На текущий момент токамак МИФИСТ-0 оснащён следующими диагностиками [1]:

- Петли напряжения на обходе. Две петли на внутреннем обходе, петли на верхней и нижней точках камеры, две петли на внешнем обходе
  - Пояса Роговского для измерения тока плазмы. Один пояс вне камеры, один пояс внутри камеры, интегрирован с кольцевым лимитером токамака
  - Магнитные зонды – 6 магнитных зондов для измерения положения плазменного шнура
  - Универсальный ввод со сменными головками, позволяющий быструю смену электрических зондов различных конфигураций. На текущий момент реализованы двойной и тройной зонды Ленгмюра.
  - Пассивные оптические диагностики: быстрая камера, обзорный спектрометр, быстрый фотодиод с фильтром H $\alpha$  линии
  - Активные оптические диагностики: ИК гетеродинный интерферометр, СВЧ интерферометр
- Для токамака также разработаны рентгеновский спектрометр и энергоанализатор нейтральных частиц.

### **Литература**

- [1]. S.A. Krat et al, MPhIST-0 tokamak for education and research, Fusion Science and Technology, 79(4):1-19

# СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД

Д.В. Сарычев<sup>1</sup>, Н.А. Соловьев<sup>1</sup>, Д.Е. Диас-Михайлова<sup>1</sup>,  
Е.Г. Плоскирев<sup>1</sup>, Д.А. Орловский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИИЦ Курчатовский Институт, Москва, Россия, [dmvsar@yandex.ru](mailto:dmvsar@yandex.ru)

<sup>2</sup>НИУ МЭИ, Москва, Россия

Данные о полных радиационных потерях (РП) плазмы на установках УТС необходимы для решения задач контроля разряда, определения времени удержания энергии. Пространственные распределения РП существенны для изучения теплопроводности и переноса плазмы, плазменно-поверхностного взаимодействия, срывов и процессов в диверторе.

Основным требованием к детектору РП является постоянная чувствительность в широком диапазоне длин волн (практически от видимого излучения до рентгена). В достаточной мере этому требованию удовлетворяют только тепловые приборы, измеряющие мощность падающего на поглотитель излучения по изменению его температуры. Принцип действия используемых на Т-15МД пироэлектрических детекторов основан на линейной зависимости спонтанной поляризации сегнетоэлектрических материалов от температуры. В результате нагрев детектора приводит к возникновению в его электрической цепи тока, который в пренебрежении тепловыми потерями пропорционален поглощенной мощности излучения.

Выбор пироэлектрических детекторов связан с наличием опыта их успешного применения на отечественных установках, надежностью, невысокой ценой, широким диапазоном рабочих температур. При этом к их недостаткам относятся паразитный пьезоэффект, приводящий к существенному снижению отношения “сигнал–шум” в условиях токамака, а также низкая чувствительность – токовые сигналы детекторов при измерениях с достаточным пространственным разрешением в токамаке составляют не более сотен пикоампер. Тем не менее, как было показано на токамаке Т-10, при обеспечении соответствующих

виброзащиты и экранировки возможно получение значений плотности мощности, эквивалентной шумам, (NEPD – Noise Equivalent Power Density) на уровне  $10 \text{ мкВт/см}^2$  (при временном разрешении 10 мс) [1], что близко к значению этого параметра для металлических резистивных болометров “ASDEX-type”, являющихся основным типом детекторов радиационных потерь на крупных зарубежных установках. Практически полученное значение NEPD оказалось достаточным для получения профилей радиационных потерь во всех представляющих интерес режимах разряда (см., например, [2]).

Другим типом применяемых на Т-15МД детекторов являются полупроводниковые фотодиоды AXUV (Absolute eXtreme UltraViolet). Они изготавливаются по специальной технологии, обеспечивающей чувствительность в диапазонах дальнего и экстремального ультрафиолета. Тем не менее, для диапазона энергий квантов  $\sim 7 - 100 \text{ эВ}$  сохраняется область существенного снижения чувствительности, что ограничивает возможность использования детекторов AXUV в качестве калиброванного средства измерения РП плазмы. Несмотря на это их применение в дополнение к болометрам оказывается привлекательным из-за высокого временного разрешения до 1 мкс, высокой чувствительности (в  $\sim$  млн раз выше, чем у пироболометров), а также нечувствительности к энергии нейтральных частиц, паразитным тепловым воздействиям и рассеянному СВЧ-излучению.

Система измерения РП токамака Т-15МД включает три комбинированные вакуумированные камеры-обскуры, расположенные в одном полоидальном сечении. Они обеспечивают обзор основной плазмы пирозлектрическими детекторами с двух ракурсов (по 15 каналов плюс обзорный датчик для каждого) и детекторами AXUV с трех ракурсов (по 16 каналов). Планируется установка дополнительной камеры-обскуры для обзора диверторной области. К особенностям конструкции следует отнести виброразвязку детекторного блока пироболометров от камеры установки на основе сильфона, а также использование расположенных непосредственно на детекторных блоках вакуумно-совместимых преусилителей. Кроме того, приняты меры, чтобы исключить влияние на сигналы пироболометров фотоэмиссионных

токов, эффективно генерируемых излучением УФ диапазона [3]. Для этого передние обращенные к плазме поверхности детекторов покрыты сплошным металлическим слоем, который заземляется, а сигнал снимается с электродов на задних поверхностях детекторов. Для защиты встроенной электроники при прогреве камеры токамака предусмотрено водяное охлаждение камер-обскур. Оконечные усилители напряжения для детекторов обоих типов располагаются в атмосфере вблизи камер-обскур диагностики. Многоканальные усилители позволяют осуществлять дистанционное (по Ethernet) переключение коэффициентов усиления и частот среза встроенных ФНЧ.

Абсолютная калибровка пирозлектрических детекторов с усилителями проводилась с помощью лазера с контролируемой мощностью излучения, поверхности детекторов при этом зачернялись. Также проводилась геометрическая калибровка положений линий наблюдения всех детекторов с помощью небольшой лампы, перемещаемой в камере токамака

Существенной проблемой при применении пироболометров в разрядах большой длительности на Т-15МД становится деградация сигнала из-за тепловых потерь детекторов. С целью использования для восстановления сигнала при длительностях разряда до  $\sim 4$  с были измерены и проанализированы переходные характеристики детекторов, указаны причины их отклонения от экспоненциальных. При бóльших длительностях разряда для восстановления среднего уровня сигнала необходимо будет применять модуляцию излучения механическим затвором [4].

## Литература

- [1]. А.Г. Алексеев, В.В. Забродский, Д.В. Сарычев, Н.А. Соловьев, А.В. Сушков; Физика Плазмы; 2022; том 48 № 12; с. 1–10.
- [2]. V.A. Vershkov, D.V. Sarychev, G.E. Notkin et al.; Nucl. Fusion; 2017; 57; 102017.
- [3]. C. Côté, A.W. DeSilva; Rev. Sci. Instrum.; 1996; 67; 4146.
- [4]. B.V. Kuteev, A.A. Outkine, P.G. Gabdullin, A.Yu. Kostrioukov, V.G. Kapralov; Rev. Sci. Instrum.; 2004; 75; 4287.

# ВЛИЯНИЕ ТОЛСТОСТЕННОЙ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА Т-15МД

А.В. Степин<sup>1</sup>, В.Ф. Андреев<sup>1</sup>, А.Ю. Балашов<sup>1</sup>, А.М. Белов<sup>1,2</sup>,  
Г.Б. Игонькина<sup>1</sup>, П.С. Семенов<sup>1</sup>, М.М. Соколов<sup>1</sup>, А.В. Сушков<sup>1</sup>,  
Э.Н. Хайрутдинов<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва

<sup>2</sup> АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

e-mail докладчика: [steopin.andrei@yandex.ru](mailto:steopin.andrei@yandex.ru)

В ходе первой экспериментальной кампании на установке Т-15МД [1] (март-июнь 2023 г.) были получены экспериментальные результаты электромагнитной диагностики (ЭМД) [2], которая является одной из базовых диагностик токамака. При обработке экспериментальных данных было обнаружено, что на эволюцию сигналов датчиков напряжения обхода и двухкомпонентных датчиков формы, измеряющих нормальную и тангенциальную компоненты магнитного поля, и установленных внутри вакуумной камеры (ВК) Т-15МД, влияет толстая стенка ВК, в которой создаются значительные наведенные токи. Время отклика сигналов магнитных датчиков на изменения магнитного поля, создаваемого полоидальными катушками и/или центральным соленоидом токамака, получается разным для датчиков, расположенных на стороне сильного и слабого поля. Это связано с особенностью конструкции вакуумной камеры Т-15МД, где толщина стенки ВК со стороны центрального соленоида (~5 мм) меньше, чем толщина стенки (~20 мм) на внешней стороне тора. Эффект толстой камеры оказывает существенное влияние на профили сигналов магнитных датчиков, который необходимо учитывать при интерпретации полученных сигналов, а так же для управления положением и формой плазмы в режиме реального времени.

Методы обработки таких экспериментальных сигналов, отработанные на установке Т-15МД, могут быть использованы для ТРТ, в котором предполагается двухслойная и толстая ВК, по сравнению с Т-15МД.

В работе представлено краткое описание ЭМД Т-15МД, экспериментальные данные ЭМД, собранные системой сбора данных установки [2], а также результаты моделирования поведения сигналов магнитных датчиков, полученные с помощью специального программного кода [3].

### Литература

- [1]. A.V. Melnikov, A.V. Sushkov, A.M. Belov, Yu.N. Dnestrovskij, L.G. Eliseev, A.V. Gorshkov, D.P. Ivanov, N.A. Kirneva, K.V. Korobov, V.A. Krupin, S.E. Lysenko, V.S. Mukhovatov, N.A. Mustafin, S.V. Perfilov, K.A. Razumova, I.N. Roy, P.V. Savrukhin, V.S. Strelkov, E.A. Shestakov, G.N. Tilinin, V.L. Vdovin. Physical program and diagnostics of the T-15 upgrade tokamak, Fusion Engineering and Design Volumes 96–97, October 2015, Pages 306-310
- [2]. A.V. Sushkov, A.M. Belov, G.B. Igonkina, A.G. Kachkin, E.N. Khayrutdinov, A.V. Melnikov, M.M. Sokolov. Design of inductive sensors and data acquisition system for diagnostics of magnetohydrodynamic instabilities on the T-15MD tokamak. Fusion Engineering and Design Volume 146, Part A, September 2019, Pages 383-387 5/1 DOI: 10.1134/S1063778822070146 ISSN 1063-7788.
- [3]. Andreev, V.F., Balashov, A.Y., Belov, A.M. et al. Simulation of Magnetic Measurements on the T-15MD Tokamak Taking into Account Eddy Currents in the Vacuum Chamber. Phys. Atom. Nuclei 85, Pages 1223–1237 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1063778822070146>.



# ДИАГНОСТИКА НАДТЕПЛОВОГО И ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

Шестаков Е.А., Саврухин П.В., Лисовой П.Д., Тепикин В.И., Храменков А.В.

*НИИ "Курчатовский институт", 123182 Россия, Москва,  
[Shestakov\\_EA@nrcki.ru](mailto:Shestakov_EA@nrcki.ru)*

Одной из особенностей токамаков является возможность генерации ускоренных электронов, обладающих энергией до десятков МэВ. Данные электроны образуются в повышенных электрических полях и могут формировать пучки, представляющие угрозу для внутрикамерных компонентов токамака.

Управление эволюцией ускоренных электронов, определение режимов работы без их возникновения и разработка методов их устранения являются важными физическими задачами.

Для измерения параметров ускоренных электронов могут использоваться различные диагностические методы, наиболее популярным является измерение тормозного рентгеновского излучения.

В целях исследования эволюции ускоренных электронов на токамаке Т-15МД оборудованы диагностики надтеплового и жесткого рентгеновского излучения в конфигурации первой плазмы.

Диагностика надтеплового рентгеновского излучения в конфигурации первой плазмы состоит из трех детекторов на основе теллурид кадмиевых кристаллов с размерами 5x10x1 мм с интегрированными усилителями сигналов. Используются новые разработанные и изготовленные усилители на основе малошумящих операционных усилителей. Проведена калибровка детекторов с помощью рентгеновской трубки. Детекторы установлены в экваториальном сечении токамака Т-15МД со

стороны атмосферы. Для выхода рентгеновского излучения из токамака оборудовано бериллиевое окно толщиной 120 мкм. Таким образом детекторы позволяют проводить измерение рентгеновского излучения в диапазоне энергий 3-300 кэВ.

Диагностика жесткого рентгеновского излучения на токамаке Т-15МД состоит из монитора и спектрометрических детекторов.

Монитор жесткого рентгеновского излучения установлен в экспериментальном зале токамака в экваториальной плоскости на расстоянии 2 м от вакуумной камеры. В основе монитора лежит сцинтилляционный кристалл NaI (Тl) с размерами d25x25 мм. Монитор позволяет проводить измерения в том числе в стационарных потоках рентгеновского излучения в диапазоне энергий до 3 МэВ (10 МэВ в режиме частичного поглощения). Проведена калибровка монитора на рентгеновской трубке. Для управления загрузкой монитора предусмотрена установка свинцового экрана толщиной 4 мм.

На токамаке Т-15МД оборудованы 2 спектрометрических детектора жесткого рентгеновского излучения. В основе детекторов лежат сцинтилляционные кристаллы LaBr<sub>3</sub>(Ce) с размерами d38x38мм. Данные детекторы позволяют проводить измерения спектров жесткого рентгеновского излучения в диапазоне энергий до 10 МэВ с энергетическим разрешением до 1.5%. Проведена калибровка детекторов с помощью радиоактивных источников из набора ОСГИ-3. Для детекторов разработан и оборудуется коллиматор, позволяющий проводить измерения излучения с пространственным разрешением до 2-3 см.

Проведены измерения рентгеновского излучения в экспериментах на токамаке Т-15МД при СВЧ пробое плазмы.

Пробой с помощью СВЧ рассматривается как основной вариант организации пробоя в экспериментальном токамаке-реакторе ИТЭР.

Хорошо известно, что ускоренные электроны возникают в повышенных электрических полях, в частности часто могут возникать на начальной стадии разряда [1] во время омического

пробоя. Это связано одновременно как с высоким (до 2-3 В/м) электрическим полем во время пробоя, так и с низкой плотностью нейтрального газа. На многих токамаках, в том числе и на Т-10 [2] было показано, что ввод СВЧ мощности на стационарной стадии разряда приводил к уменьшению вихревого электрического поля и уменьшению числа ускоренных электронов вплоть до полного их исчезновения. Данный эффект связан как правило с двумя процессами: нагревом плазмы, что приводит к уменьшению ее сопротивления, и неиндукционным замещением тока плазмы. Одновременно эти два процесса приводят к уменьшению вихревого электрического поля.

Стадия пробоя значительно отличается от стационарной стадии структурой рабочего тела, в котором поглощается СВЧ излучение. Ввод СВЧ мощности на стадии пробоя (организация пробоя с помощью СВЧ) на токамаке Т-15МД приводит к образованию ускоренных электронов уже на ранней стадии пробоя. Проведенный анализ показал, что энергии ускоренных электронов при СВЧ пробое в отдельных разрядах Т-15МД достигали 3 МэВ.

Необходимо отметить, что ускоренные электроны возникают в отсутствие вихревых электрических полей, создаваемых полоидальными катушками токамака Т-15МД. При увеличении токов в катушках управления, создающих вертикальное магнитное поле, увеличивается как количество ускоренных электронов, так и их энергия.

## Литература

- [1]. Generation of runaway electrons during the initial stage of the T-10 tokamak plasma discharge, E.A. Shestakov, P.V. Savrukhin, M.I. Ershova and A.V. Khramenkov, J. Phys.: Conf. Ser. 1094 012004, 2018
- [1]. Пространственно-временная эволюция ускоренных электронов при развитии неустойчивости срыва в плазме токамака Т-10, П.В. Саврухин, Е.А. Шестаков, А.В. Храменков, Физика плазмы, том 44, номер 12, декабрь 2018г

# СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ И АКТИВНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ Т-15МД

Э.Н. Хайрутдинов, А.Г. Качкин, М.М. Соколов, Г.Б. Игонькина,  
Р.Р. Хайрутдинов

НИИЦ "Курчатовский институт", г. Москва  
e-mail: [eduard@khayrutdinov.ru](mailto:eduard@khayrutdinov.ru)

В случае нарушения устойчивости вертикально вытянутая плазма в токамаке Т-15МД переходит в неконтролируемое вертикальное смещение (VDE), которое заканчивается тепловым пробоем с вероятностью последующего разрушения элементов камеры. Для предотвращения этого явления необходима система активной стабилизации вертикального положения плазмы. Для этих целей в токамаке Т-15МД используется специальная быстрая обмотка - HFC (Horizontal Field Coil). Работа системы вертикальной стабилизации завязана на контур обратной связи для определения начала вертикального смещения. В этот контур заведен комплект датчиков вертикального потока электромагнитной диагностики [1], позволяющий обнаружить изменение поля плазменного шнура в процессе вертикального смещения. Для получения оптимальных временных значений регулятор стабилизации вертикального положения реализован на ПЛИС. В представленной работе описывается общий состав системы, технические решения, которые были выбраны для реализации контура управления с обратной связью. Описанные решения были смоделированы (как источник питания, так и предложенный метод управления) с применением модели вертикальной неустойчивости плазмы, которая состоит из уравнений Кирхгофа для HFC [2] и уравнения движения плазмы. В предлагаемом проекте используются те же принципы, что и при реализации системы управления плазмой Т-15МД, поэтому новое решение легко интегрировать в существующую систему.

## **Литература**

- [1]. Sushkov A.V., Belov A.M., Igonkina G.B., Kachkin A.G., Khayrutdinov E.N. Melnikov A.V., Sokolov M.M. Design of inductive sensors and data acquisition system for diagnostics of magnetohydrodynamic instabilities on the T-15MD tokamak // Fusion Engineering and Design - 2019. - Т. 146 - С.383-387.
- [2]. М.С.Лурье, О.М.Лурье Имитационное моделирование схем преобразовательной техники // Красноярск: СибГТУ. 2007 г. 145 с.

# ЗОНДОВАЯ ДИАГНОСТИКА ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ Т-15МД

К.А. Рогозин<sup>1</sup>, С.А. Грашин<sup>1</sup>, В.П. Будаев<sup>1</sup>, А.В. Карпов, Д.А. Анисимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИ «Курчатовский институт», [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

Зондовая диагностика плазмы позволяет измерять локальные потоки частиц, турбулентный перенос частиц и энергии, которые являются определяющими для периферийной и диверторной плазмы. Зонды Ленгмюра обеспечат измерения пространственного распределения как средних значений, так и флуктуаций параметров периферийной и диверторной плазмы в токамаке Т-15МД [1]: электронной температуры, концентрации плазмы, потоки плазмы, электрические поля и число Маха. Зонды Ленгмюра имеют высокое отношение сигнал/шум. Частотный диапазон измерений находится в диапазоне 0,1–1000 кГц (соответствует дрейфово-диссипативной турбулентности плазмы, ответственной за аномальную диффузию плазмы поперек магнитного поля); многоэлектродные сборки позволяют изучать корреляционные свойства турбулентности.

Комплексы зондов Ленгмюра являются базовой диагностикой для программы исследований пристеночной, периферийной и диверторной плазмы, а также материаловедческих исследований на токамаке Т-15МД во всех режимах удержания, включая стадию квазистационарного удержания плазмы. Зондовая диагностика позволит проводить мониторинг параметров плазмы вблизи поверхности дивертора, в окрестности Х-точки и вблизи внутренней стенки вакуумной камеры. Кроме того, такие измерения обеспечат информацией о граничных значениях радиальных профилей параметров плазмы для использования их при моделировании процессов переноса в различных режимах удержания плазмы в Т-15МД.

Зонды Ленгмюра обеспечивают измерения в зонах с плотной и горячей плазмой: с плотностью плазмы  $n_e \leq 2,0 \times 10^{19}$

$\text{м}^{-3}$ , температура электронов  $T_e \leq 200$  эВ. В условиях длинного импульса диагностика позволит проводить измерения параметров плазмы с временным циклом от 0,2 с, временной выборкой 10 – 100 мс, и временным разрешением не менее 1 мкс.

Система ленгмюровских зондов Т-15МД состоит из двух многоэлектродных комплексов:

- комплекс ленгмюровских зондов диверторов (верхнего и нижнего), включает всего 84 зонда, монтируемых на пластинах дивертора. Область измерения – верхняя и нижняя диверторные зоны Т-15МД.

- Комплекс быстроперемещаемых зондовых систем для измерения параметров периферийной плазмы, включает 11 зондов на специальной подвижной («прыгающей») сборке. Быстрые «прыгающие» зондовые системы позволяют измерять распределения параметров плазмы за времена 10 – 100 мс при больших тепловых нагрузках, в том числе, в квазистационарных разрядах. Область измерения – нижняя диверторная зона токамака.

Комплекс быстроперемещаемых зондовых систем токамака Т-15МД оснащен системой передвижения и позиционирования зондовой сборки в диверторе токамака Т-15МД. Система перемещения и отклонения позволяет вводить зонд в камеру токамака на глубину до 1 м. Возможные углы отклонения от центральной оси  $\pm 5^\circ$  как в вертикальной, так и горизонтальной плоскости. Система обеспечит ввод-вывод зондов из камеры токамака, перемещение внутри камеры на расстояние до 1000 мм, позиционирование с точностью  $\pm 2$  мм. Использование электродвигателей линейного перемещения позволит осуществлять быстрый ввод и вывод зондов в зону измерения с высокой плазменной нагрузкой на расстояние 300 мм с максимальной скоростью не менее 3700 мм/с и длительностью цикла 0,2 с и более. Комплекс оснащен собственной системой вакуумной откачки. Разделение вакуумных объемов токамака и диагностического комплекса осуществляется вакуумной заслонкой, закрепленной на фланце CF250.

Измерения зондами будут проводиться во всех режима удержания плазмы в Т-15МД, в том числе, в Н-режиме.

### **Литература**

- [1]. Хвостенко, П.П. Экспериментальная термоядерная установка токамак Т-15МД / П.П. Хвостенко, И.О. Анашкин, Э.Н. Бондарчук [и др.] // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2019. – т. 42, вып. 1. – с.15-38



# ИНЖЕНЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ИНДИКАЦИИ ЗАМЫКАНИЙ, ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ И ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ АНАЛИЗА ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА Т-15МД

Качкин А.Г., Соколов М.М., Игонькина Г.Б., Хайрутдинов Э.Н.,  
Звонков С.Н., Коршунов Н.В., Ложкин И.В., Шрамков Е.А.,  
Сушков А.В., Коньков А.А.

*НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация*  
[Kachkin\\_AG@nrcki.ru](mailto:Kachkin_AG@nrcki.ru),  
[Sokolov\\_MM@nrcki.ru](mailto:Sokolov_MM@nrcki.ru),  
[Igonkina\\_GB@nrcki.ru](mailto:Igonkina_GB@nrcki.ru)

## **Введение**

В данном докладе представлена инженерная реализация трёх систем на токамаке Т-15МД: автоматизированной системы индикации замыканий элементов токамака Т-15МД, системы визуализации плазменного разряда и диагностической станции анализа первой стенки. Освещаются принципы работы систем, основные характеристики и достигнутые результаты.

## **1. АСИЗ**

При проведении плазменных экспериментов на токамаке Т-15МД требуется обеспечение контроля целостности электрической изоляции между элементами конструкции с целью предотвращения возникновения замкнутых электрических контуров, которые вызывают нарушения в работе установки и разрушение элементов её конструкции.

Автоматизированная система индикации замыканий (АСИЗ) элементов токамака Т-15МД предназначена для контроля наличия электрического контакта между 42 изолированными элементами установки, вакуумной камерой и точкой заземления оборудования в зале установки Т-15МД [1].

АСИЗ введена в эксплуатацию и с её помощью зафиксированы контакты между изолированными элементами

установки и потенциалы на некоторых элементах – ведутся мониторинг замыканий и анализ полученных данных.

## **2. Система визуализации плазменного разряда**

В основе системы визуализации плазменного разряда лежит регистрация интенсивности видимого излучения из зоны наблюдения, определяемой объективом и областью матрицы камеры, с которой считывается информация, позволяющая получить двумерную визуализацию динамики излучения из пристеночной области плазмы и взаимодействия плазмы с первой стенкой, а также осуществлять визуальный контроль тлеющего разряда в процессе кондиционирования вакуумной камеры.

На токамаке Т-15МД в настоящий момент в качестве обзорных используются 3 высокоскоростные CMOS камеры с глобальным затвором и широкоугольными объективами, позволяющие получать изображение плазмы в 8, 12 и 16 сечениях вакуумной камеры с разрешением до 4096x3072 и частотой до 300 fps.

С помощью системы визуализации плазмы зафиксированы разряды во время энергетического пуска. Для развития системы необходимо обновление камер, расширение поля обзора, экранирование камер, обновление сервера сбора данных для регистрации длинных импульсов.

## **3. Диагностическая станция анализа первой стенки**

Принцип работы диагностической станции анализа первой стенки (ДС АПС) или WASA-Upgrade (Wall Analysis with SIMS and Auger) основан на анализе элементарного состава поверхности пробы коллекторных зондов, вводимых в зону экспозиции, что позволяет получать информацию о распылении, переносе и повторном осаждении примесей в SOL, а также о процессах эрозии внутри камеры токамака [2,3,4]. Использование коллекторного зонда с четырьмя узкими щелевыми апертурами обеспечивает измерение потоков частиц с временным разрешением в тороидальном и полоидальном направлениях. Для измерения содержания примесей *in situ* на поверхности пробы используются высокоточные методы ВИМС (вторично-ионной масс-спектрометрии) и Оже спектроскопии.

В настоящее время ведутся работы по созданию высоковакуумной транспортной системы, модернизации камеры анализа и транспортной тележки ДС АПС Т-15МД. Созданы электровакуумный стенд для наладки камеры анализа, системы сбора и обработки данных, а также 3D модель ДС АПС, интегрированная в 3D модель Т-15МД. Ведется разработка системы управления, сбора и обработки данных.

Система дистанционного управления ДС АПС, интегрированная с информационно-управляющей системой Т-15МД, а также системы технического зрения, сбора и обработки данных реализуются на базе оборудования National Instruments в программной среде LabVIEW.

### **Литература**

- [1]. Э.Н. Хайрутдинов, Г.Б. Игонькина, М.М. Соколов, А.В. Сушков // Диагностика и индикация электрических замыканий между конструктивными элементами токамака Т-15МД // XIX Всероссийская конференция ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ 2021 г. Тезис доклада, секция 8, сборник.
- [2]. M.Behnke, A.Herrmann, D.Hildebrandt, H.Grote, M.Laux, P.Pech, J.Sachtleben, H.Wolff, V.M.Chicherov, S.N.Svonkov // A surface analysis station for investigation of the near wall plasma of tokamak T-15 // Vacuum. Volume 37, Issues 1–2, 1987, Pages 145-147
- [3]. Alkhimovich V.A., Vertiporokh A.N., Igon'kina G.B. et al. T-15 Plasma Chamber Design and Testing / // Plasma Devices and Operations - 1992 -Т. 2 -С.27-46.
- [4]. Zvonkov S., Igonkina G., Stefanovskij A., Herrmann A. Wall conditioning in T-15 Investigations of wall surface state by WASA II // 23rd European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics. Contributed Papers Part II, Kiev, Ukraine, 24-28 June 1996. p. 747-750.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА, СОЗДАВАЕМОГО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛОМ ПЕРВОЙ СТЕНКОЙ ТОКАМАКА

Федорович С.Д.<sup>1</sup>, Чан Куанг В.<sup>1</sup>, Кавыршин Д.И.<sup>1,2</sup>, Будаев В.П.<sup>1,3</sup>, Карпов А.В.<sup>1,3</sup>, Лукашевский М.В.<sup>1</sup>, Рогозин К.А.<sup>1</sup>, Коньков А.А.<sup>1</sup>, Анисимов Д.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИУ «МЭИ», Москва, Россия, [ChanKV@mpei.ru](mailto:ChanKV@mpei.ru)

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва, Россия, [dimakav@rambler.ru](mailto:dimakav@rambler.ru)

<sup>3</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, [budaev@mail.ru](mailto:budaev@mail.ru)

Плазменная линейная установка ПЛМ-М создана в НИУ «МЭИ» для моделирования плазменного воздействия на поверхность испытуемого материала, близкого по параметрам к плазме периферии токамака [1,2]. Установка ПЛМ-М представляет собой магнитную ловушку с мультикасповой конфигурацией. Плазма создаётся ионизацией атомов гелия потоком электронов, эмитируемых прямонакальным танталовым катодом. Установка даёт возможность работать в многочасовом режиме при постоянных параметрах разряда: давление плазмообразующего газа в камере до  $10^{-1}$  торр, ток разряда до 30 А. Тепловая нагрузка на поверхность мишени до  $5 \text{ МВт/м}^2$ .

В данной работе проведены экспериментальные измерения параметров стационарного плазменного потока в установке ПЛМ-М при помощи электрического зонда Ленгмюра и оптической эмиссионной спектроскопии. Разработанные зонды диаметром 0,5 мм и длиной 6 мм могут перемещаться поперек плазменного потока с помощью магнитного манипулятора. Для регистрации оптического спектра излучения плазменного потока использован монохроматор-спектрограф MS7504(i), который имеет высокое спектральное (0,013 нм), пространственное ( $\sim 100$  мкм) и временное (от 2 мкс) разрешения. Давление гелия в разрядной камере ПЛМ-М  $6 \div 8 \cdot 10^{-2}$  торр, ускоряющий потенциал на катоде около -160 В. Ток разряда варьировался от 5 А до 20 А. Мощность разряда достигала 3,5 кВт.

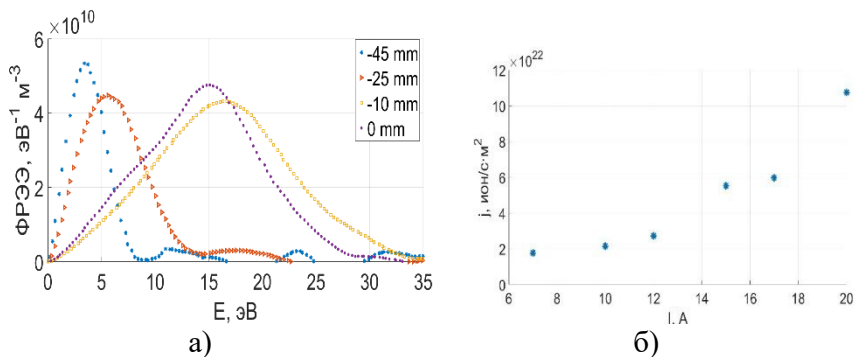


Рис. 1. а) Функции распределения электронов по энергии на разных расстояниях от оси разряда;  
 б) Зависимость плотности ионного потока от силы тока разряда.

На рисунке 1а показаны функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) при силе тока разряда 20 А. Видно, что при приближении к оси разряда увеличивается количество высокоэнергетичных электронов. На расстоянии 10 мм от оси разряда ФРЭЭ имеет максимум в диапазоне энергий  $\sim 17$  эВ. На рисунке 1б показана зависимость плотности ионного потока от силы тока разряда. Плотность ионного потока достигала  $1,1 \cdot 10^{23}$  ионов/ $\text{с} \cdot \text{м}^2$ .

На рисунке 2 представлен фрагмент оптического спектра в одном радиальном сечении вблизи оси разряда с отображением линий иона (HeII 468.5 нм) и атома (HeI 471.3 нм) гелия при силе тока разряда 20 А.

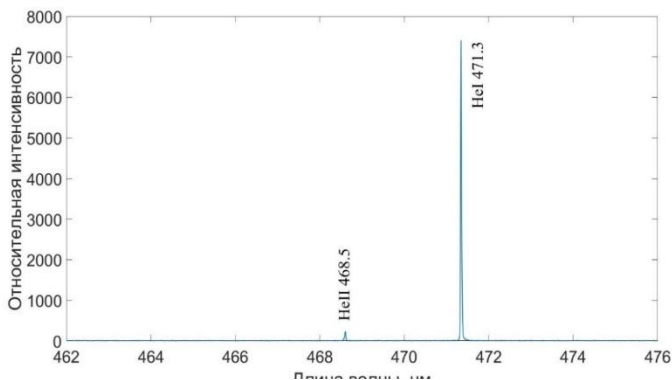


Рис. 2. Зарегистрированные оптические спектры плазмы.

На основе зарегистрированных оптических спектров в рамках корональной модели описания плазмы определено диаметральное распределение электронной температуры, которая меняется от 2,5 эВ до 5 эВ. Полученные данные зондовой диагностики позволяют определить температуру электронов плазмы, меняющуюся в диапазоне от 3 эВ до 10 эВ, плотность электронов составляет  $(0,5 \div 3) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Плотность ионного потока  $(0,2 \div 1,1) \cdot 10^{23} \text{ ионов}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ .

Результаты диагностики подтверждают возможность работы источника плазмы в широком диапазоне плотности тепловой нагрузки. Плазменная установка отвечает требованию для полномасштабного испытаний материалов первой стенкой и дивертора токамака.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 21-79-10281 и Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2023-0016).

### Литература

- [1]. V.P. Budaev, S.D. Fedorovich, A.V. Dedov, A.V. Karpov et al. // Erosion of Fuzz Layers Formed in Steady-State Plasma Discharge // Fusion Science and Technology, October 2022. – Special Issue, 2118471.
- [2]. D. I. Kavyrshin, S. D. Fedorovich, V. P. Budaev, Quang Vinh Tran et al. // Development of Methods for Determining Near-Surface Plasma Parameters During Tests of Fusion Reactor First-Wall Prototypes Using the PLM Device // Fusion Science and Technology, 2022. – Special Issue, 2138085

# ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОДСИСТЕМ ИТЭР НА ПРИМЕРЕ СТЕНДА ИСПЫТАНИЙ ПОРТ-ПЛАГОВ (PRTF)

Соловьева О.В.

*ООО «НПО «Группа Компаний Машиностроения и Приборостроения»*

- 1 PRTF (Port Plug Test Facility) – объем поставки в ИТЭР
  - стенды вакуумных испытаний экваториальных и верхних порт плагов ИТЭР с системой погрузки предназначены для проведения климатических и функциональных испытаний порт плагов перед их непосредственной работой в Токамаке ИТЭР. **Всего будет поставлено 4 стенда PRTF.**
  - объем работ по P.A.5.8.P1.RF.01:
    - 2 стенда в неядерном исполнении;
    - 2 стенда в ядерном исполнении;
    - 1 система понижения давления в ядерном исполнении.
- 2 Особенности изготовления некоторых подсистем
  - 2.1 Фланец камеры
    - выбор типов сварных швов, согласование с ИТЭР;
    - проведение уникального ультразвукового контроля методом фазированных решеток на аустенитную сталь 1.4404 толщиной 310мм;
    - отжиг в вакуумной печи для снятия напряжений после сварки (~1020 °C);
    - финальная м/о и контроль размеров после мехобработки (по ITER Metrology Book).
  - 2.2 Распределительная платформа
    - точная сварка швеллеров длиной 12 м;
    - послойный контроль всех швов пенетрантом;
    - проверка поводок после сварки;

- мехобработка после сварки (мобильный станок);
- размерный контроль после мехобработки.

### 2.3 Вакуумная камера

- вальцовка обечаек;
- приварка днища;
- вырезка отверстий;
- приварка патрубков;
- контроль герметичности;
- изготовление оснастки для УЗК;
- проведение УЗК по каждому шву (обечайки, патрубки, днище);
- приварка фланца;
- изготовление метизов из Инконеля 660 и 718 (мехобработка, токарные работы);
- выставление опор камеры перед сваркой с камерой с помощью лазерного трекера;
- размерный контроль камеры и патрубков.

### 2.4 Адаптер

- гибка листов 1.4404 толщиной 30 и 60 мм;
- сварка обечаек;
- размерный контроль;
- сварка обечаек между собой (30+60мм);
- НРК контроль послойный (капиллярный контроль);
- финальная мехобработка;
- размерный контроль (габариты, углы, отверстия).

### 2.5 Сварка с сильфоном

- изготовление внутренних и внешних герметизирующих фланцев EPP и UPP (4шт);
- размерный контроль (точность 0.3мм на 1м);
- сварка фланцев с сильфоном (трехслойный сильфон и сварка с аустенитной сталью 1.4404).

## 3. Выводы.



# ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛА АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Юхнов Н.М.<sup>1</sup>, Немцев Г.Е.<sup>1</sup>, Голачев В.М.<sup>1</sup>, Иванов Д.А.<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Российская Федерация, [n.yukhnov@iterrf.ru](mailto:n.yukhnov@iterrf.ru)*

Алмазные детекторы нашли широкое применение для измерения нейтронных потоков и спектров нейтронов в токамаках и нейтронных генераторах. Высокое энергетическое разрешение к 14 МэВ нейтронам, радиационная стойкость и компактные размеры обуславливают выбор алмазных детекторов в качестве надежного средства измерения физических параметров плазмы в системах нейтронной диагностики строящегося токамака ИТЭР. В частности, алмазные детекторы были разработаны для диагностической системы Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК) [1].

Обслуживание компонентов ВНК в процессе работы ИТЭР крайне затруднительно из-за значительной активации материалов. Поэтому возникает вопрос, насколько разработанные алмазные детекторы способны сохранять свои характеристики в течение всего времени эксплуатации установки ИТЭР. Одной из критических нагрузок для алмазных детекторов является высокая температура в месте расположения диагностики ВНК: в соответствии с программой работы ИТЭР, за время эксплуатации запланировано 500 циклов технологического прогрева Вакуумной Камеры до температуры 250 °С.

В работе приведены результаты испытаний работоспособности алмазных детекторов в условиях воздействия длительных термоциклических нагрузок. Прототип сборки из двух алмазных детекторов диагностики ВНК, имеющих различную чувствительность, был помещен в печь Nabetherm

Р300. Было проведено 500 последовательных циклов подъема температуры блока детекторов до 250 °С и их охлаждения до 70 °С для имитации режима технологического прогрева. Все испытания проводились в среде атмосферного воздуха. В составе каждого из детекторов в течение всей длительности испытаний находились встроенные калибровочные источники ионизирующего излучения на основе изотопов  $^{241}\text{Am}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

В ходе испытаний контролировались следующие параметры: ток утечки детекторов, форма импульсов и энергетический спектр отклика от встроенных калибровочных источников. Указанные характеристики также были сняты для внешнего  $\alpha$ -источника ( $^{238}\text{Pu}$ ). Дополнительно после испытаний был измерен энергетический спектр отклика детекторов на нейтронном генераторе ИНГ-07Д.

По результатам испытаний можно заключить, что режим технологического прогрева Вакуумной Камеры ИТЭР не является препятствием для работы алмазных детекторов ВНК.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.23.1014 от 18 января 2023 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

### Литература

- [1]. Concept Design and Integration Aspects of ITER Vertical Neutron Camera / L. Bertalot [et al.] // Proceedings of Science. — 2015.

# ТЕСТИРОВАНИЕ, СОГЛАСОВАНИЕ И СЕРИЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО КЕРАМИКИ КАРБИДА БОРА ДЛЯ ВНУТРИВАКУУМНОЙ ЗАЩИТЫ ПОРТОВ ИТЭР

Шошин А.А.<sup>1,2,3</sup>, Бурдаков А.В.<sup>1,3</sup>, Иванцовский М.В.<sup>1</sup>,  
Полосаткин С.В.<sup>1,2,3</sup>, Суляев Ю.С.<sup>1,2</sup>, Семенов А.М.<sup>1,3</sup>,  
Гавриленко Д.Е.<sup>1</sup>, Таскаев С.Ю.<sup>1,2</sup>, Касатов Д.А.<sup>1,2</sup>, Кравцов Д.Э.<sup>4</sup>,  
Сорокина Н.В.<sup>4</sup>, Овсиенко А.И.<sup>5</sup>, Румянцев В.И.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> *Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия,  
[shoshin@inp.nsk.su](mailto:shoshin@inp.nsk.su)*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет, Новосибирск,  
Россия*

<sup>3</sup> *Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, Россия*

<sup>4</sup> *Частное учреждение ГК «РосАтом» «Проектный центр  
ИТЭР», Москва, Россия*

<sup>5</sup> *ООО Вириал, Санкт-Петербург, Россия*

Для обеспечения эффективной внутривакуумной нейтронной защиты в портах строящегося во Франции экспериментального термоядерного реактора ИТЭР было предложено использовать керамику карбида бора. При жестком ограничении на массу порт-плагов и требуемого уровня радиационной защиты, керамика карбида бора имеет преимущество благодаря низкой плотности и эффективному поглощению как быстрых, так и медленных нейтронов.

Но керамика карбида бора исходно не была одобрена для использования в большом количестве в вакуумной камере ИТЭР, поэтому потребовались многочисленные исследования химического состава, тепловых и вакуумных свойств для подтверждения возможности её использования. Были проведены тесты различных видов керамики В<sub>4</sub>С нескольких российских производителей, в том числе, для большей достоверности - с

использованием значительного количества керамики. Тесты проводились согласно требованиям ITER Vacuum Handbook, условия тестов были согласованы с Вакуумной группой ИТЭР [1].

Были проведены активационные тесты керамики с использованием как медленных, так и быстрых нейтронов, которые генерировались на тандем-ускорителе для бор-нейтронозахватной терапии рака в ИЯФ СО РАН [1]. Также керамика была подвергнута длительному воздействию быстрых нейтронов с флюенсом  $10^{14}$  нейтронов/см<sup>2</sup> для изучения деградации механических свойств и демонстрации устойчивости к растрескиванию.

По результатам тестов сделан вывод о удовлетворении спеченной керамики карбида бора всех требований ИТЭР, согласована спецификация на изготовление данной керамики и начато её серийное производство на ООО Вириал.

### Литература

- [1]. A. Shoshin, A. Burdakov, M. Ivantsivskiy, et al., Test results of boron carbide ceramics for ITER port protection, Fusion Engineering and Design, 168 (2021).

# ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ С СОБСТВЕННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Сомов К.Р., Карташева А.А., Подковыров В.Л., Ярошевская А.Д.,  
Муравьева Е.А.

*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Россия, [krsomov@triniti.ru](mailto:krsomov@triniti.ru)*

Потоки плазмы, генерируемые квазистационарным сильноточным плазменным ускорителем (КСПУ) [1], используются для моделирования воздействия импульсных испытания обращенных к плазме компонентов термоядерного реактора. Решение и прикладных задач, таких как создание электрореактивных плазменных двигателей, проводится с помощью КСПУ. Важным аспектом при проектировании подобных двигателей является точное определение динамических характеристик, тяги и импульса. Целью данной работы являлась разработка и реализация схем экспериментального измерения динамических характеристик импульсного плазменного потока КСПУ на основе баллистического маятника.

Установка КСПУ представляет собой одноступенчатый квазистационарный сильноточный плазменный ускоритель с собственным магнитным полем. Основными параметрами плазменного потока принимают значения: диаметр потока -  $80 \div 100$  мм, концентрация плазмы -  $10^{-22} \div 10^{-23} \text{ м}^{-3}$ , длительность импульса - 1 мс и скорость потока  $\sim 100 \frac{\text{км}}{\text{с}}$  [2].

Для измерения динамических параметров плазменного потока была предложена схема с использованием конуса (2) в качестве баллистического маятника (рисунок 1, а). Плазменный поток (1), попадая на внутреннюю поверхность конуса, отклонял его. Луч, генерируемый лазером (5), с помощью зеркала (4) попадал на экран (6). Отклонение луча на экране

регистрировалось высокоскоростной видеокамерой Phantom v2512 с временным разрешением 6,67 мкс и пространственным - 384x288. Смещение луча позволило определить отклонение маятника под действием плазменного потока.

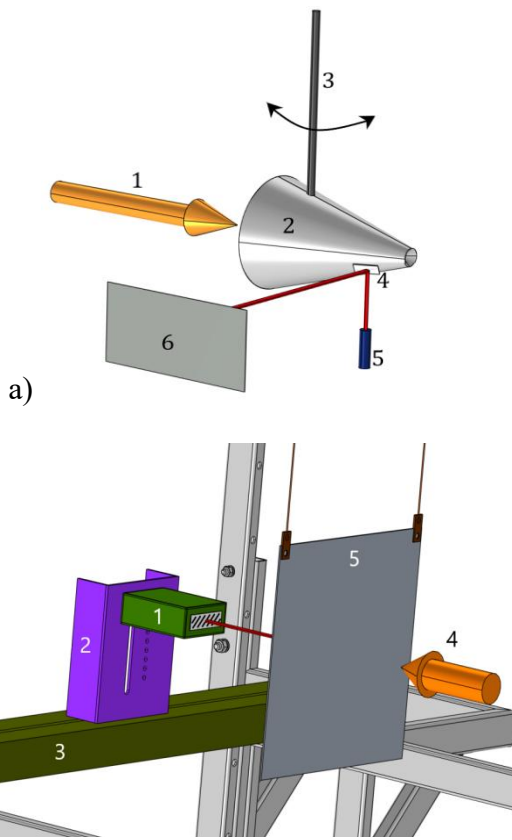


Рис. 1. Экспериментальные схемы определения динамических характеристик плазменного потока с использованием конуса (а) и пластины (б)

Для определения параметров схемы, в частности, длины оптического пути лазерного луча и порядка величины смещения маятника, проведено моделирование в среде COMSOL Multiphysics. Рассчитанное значение смещения маятника составило 0,25 мм, оптического пути - 10 м. На рисунке 2 сплошной кривой показано экспериментально измеренное значение импульса плазменного потока, пунктирной кривой -

результат моделирования. Профили экспериментальной и смоделированной зависимостей находятся в хорошем соответствии, максимальное значение импульса -  $1,1 \text{ Н} \cdot \text{с}$ . Для вычисления тяги плазменного потока необходимо определить временную зависимость смещения маятника за время существования потока равное  $1 \text{ мс}$ . Использование в предложенной экспериментальной схеме маятника весом  $2,8 \text{ кг}$  не позволили определить динамику смещения за данный промежуток времени.

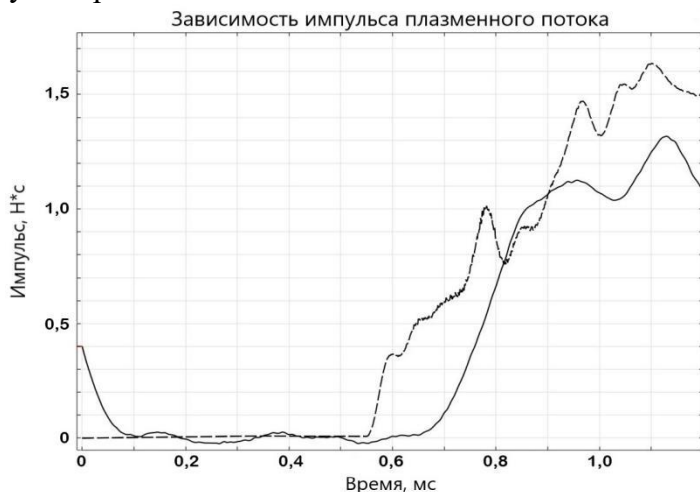


Рис. 2. Экспериментальная (сплошная кривая) и смоделированная (пунктирная кривая) временные зависимости изменения импульса плазменного потока

Для определения значения тяги была разработана схема, показанная на рисунке 1, б. Плазменный поток (4) попадает на поверхность маятника (5). Отклонения измеряются с помощью триангуляционного датчика (1), позволяющего провести измерения в диапазоне  $10 \text{ мм}$  с точностью до  $10 \text{ мкм}$  с временным разрешением равным  $14 \text{ мкс}$ . Данная схема была апробирована для измерения импульса газового потока в КСПУ. Экспериментально определенное значение отклонения маятника под действием газа имеет величину порядка  $90 \text{ мкм}$ . Использование данного метода снизить погрешность измерения

импульса до 10%, и определить тягу с погрешностью не более 25%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00153.

### **Литература**

- [1]. Климов Н. С. и др. Экспериментальное исследование интегральных характеристик потока плазмы и разряда квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя с собственным магнитным полем // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2019. – Т. 42. – №. 3. – С. 52-63.
- [2]. Коваленко Д. В. и др. Получение потоков аргоновой плазмы и преобразование их энергии в излучение на установке КСПУ-Т для моделирования радиационных нагрузок, характерных для ослабленного срыва ИТЭР // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2014. – Т. 37. – №. 4. – С. 39



# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ

Карташева А.А., Муравьева Е.А., Подковыров В.Л., Гуторов К.М.,  
Лукиянов К.С.

*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Россия*  
[alexkartasheva@triniti.ru](mailto:alexkartasheva@triniti.ru)

Квазистационарные сильноточечные плазменные ускорители (КСПУ) [1] активно используются при исследовании эрозии материалов при воздействии концентрированных потоков энергии. В качестве перспективных направлений применения КСПУ рассматриваются прикладные задачи, связанные с разработкой мощных электрореактивных плазменных двигателей. В связи с этим актуальными являются экспериментальные исследования характеристик плазмы и разряда КСПУ.

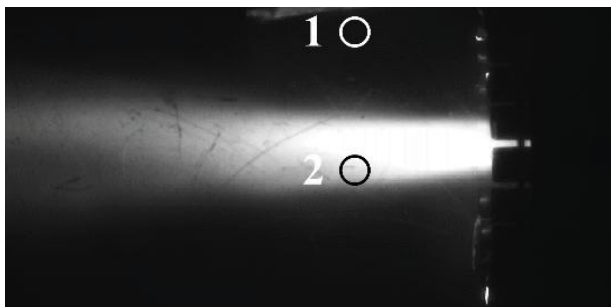
Ионизация газа в КСПУ происходит между двумя вложенными коаксиальными электродами. При взаимодействии радиального компонента возникающего при этом объёмного электрического тока с азимутальным собственным магнитным полем появляется продольная сила, которая ускоряет плазму. Основные параметры генерируемого плазменного потока имеют следующие характерные значения: диаметр потока -  $80 \div 100$  мм, концентрация плазмы -  $10^{-22} \div 10^{-23} \text{ м}^{-3}$ , длительность импульса - 1 мс и скорость потока  $\sim 100 \frac{\text{км}}{\text{с}}$  [1].

В данной работе были исследованы характеристики плазменного потока, вылетающего из ускорителя, и плазмы разряда в межэлектродном промежутке. Плазмообразующий газ - водород. Исследование структуры плазменного потока и разряда в межэлектродном промежутке производилось с помощью высокоскоростной камеры Phantom V2512. Съёмка велась с экспозицией от 1 мкс. С целью регистрации отдельных сгустков потока на выходе ускорителя была проведена видеорегистрация излучения однокадровой камерой с экспозицией от 55 нс. Состав

плазмы потока и разряда определялся путем расшифровки обзорных спектров, снятых в диапазоне 200 - 1000 нм со спектральным разрешением 1 нм. Для определения значений концентрации по уширению спектральных линий излучение регистрировалось с помощью монохроматора со спектральным разрешением 0,1 нм. На выходе монохроматора была установлена высокоскоростная камера Phantom v2640. Съемка велась с экспозицией 4 мкс и интервалом между кадрами 22 мкс. В качестве независимого метода определения концентрации использовалась лазерная интерферометрия. Рабочая длина волны лазера 1550 нм. Временное разрешение интерферометра 170 нс.

В межэлектродном промежутке с помощью съемки высокоскоростной камерой определена граница ионизации газа. С помощью зарегистрированных в этом промежутке оптических спектров излучения разряда было установлено, что на выходе ускорителя линии излучения атома водорода более интенсивны, чем в зоне ионизации.

На срезе электродов с помощью высокоскоростной съемки определена структура плазменного потока (рис. 1). Из рисунка видно, что вблизи электродов интенсивность потока в радиальном направлении неоднородна: в центре излучение имеет большую интенсивность, чем на периферии. За пределами зоны неоднородности, на расстоянии 18 см от электродов, была проведена видеорегистрация излучения с малой экспозицией, от 55 нс. Регистрация позволила сделать вывод, что плазменный поток в продольном направлении представляет собой чередующиеся во времени темные и светлые области. Характерный размер каждой области составляет величину порядка 30 мм. Частота колебания интенсивности излучения составляет величину порядка 1 МГц. Обзорные спектры показали, что центральная область (зона 2) имеет большое число примесных линий, а на периферии (зона 1) спектр излучения состоит практически целиком из линий плазмообразующего газа. Зарегистрированное с помощью монохроматора уширение спектральной линии излучения  $H_{\beta}$  позволяет определить концентрацию электронов в центре (максимум составляет порядка  $(4 \pm 0.7) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) и на периферии (максимум порядка  $(1 \pm 0.2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) плазменного потока.



Размер  
изображения  
18\*9 см

Рис. 1 Плазменный поток на выходе ускорителя. Цифрами отмечены зоны, из которых собиралось излучение на вход монохроматора

Исследование структуры потока было проведено также на расстоянии 90 см от выхода ускорителя. Полученная с помощью ФЭУ (фотоэлектронного умножителя) временная зависимость интенсивности излучения позволяет сделать вывод, что в продольном направлении колебания интенсивности излучения сохраняются. Концентрация электронов в данной области потока по данным спектроскопии составляет  $(2.5 \pm 0.5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Значение концентрации, экспериментально определенное с помощью волоконного гетеродинного интерферометра, равно  $(1.75 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3})$ . Данное значение получено в предположении равномерного распределения концентрации по всему диаметру камеры, равному 40 см. Таким образом, можно говорить о том, что на расстоянии 90 см от электродов значение концентрации находится в диапазоне от  $1.75 \cdot 10^{15}$  до  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Исследование выполнено в рамках Государственного контракта от 25.08.2022 № Н.4ф.241.09.22.1127 и Государственного контракта от 29.04.2021 № Н.4ц.241.09.21.1115.

## Литература

- [1]. Коваленко Д. В. и др. Получение потоков аргоновой плазмы и преобразование их энергии в излучение на установке КСПУ-Т для моделирования радиационных нагрузок, характерных для ослабленного срыва ИТЭР // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2014. – Т. 37. – №. 4. – С. 39.

# ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» ТОКАМАКА ИТЭР ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦИКЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК

Шаделко Ф.В.<sup>1</sup>, Федоренко Р.В.<sup>1</sup>, Кириенко И.Д.<sup>1</sup>,  
Модестов В.С.<sup>1</sup>, Тугаринов С.Н.<sup>2</sup>, Звонков А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия,  
[shadelko\\_fv@spbstu.ru](mailto:shadelko_fv@spbstu.ru)

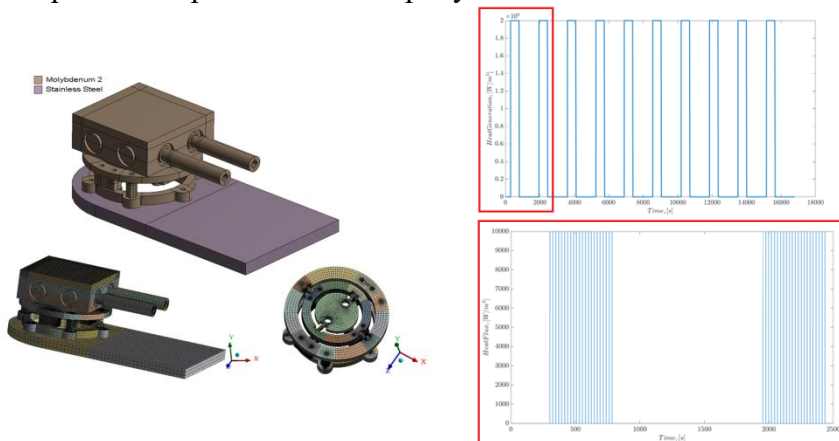
<sup>2</sup>Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

*Введение.* В настоящее время проектирования токамаков является одним из приоритетных направлений развития международной энергетики. В условиях ограниченности мировых запасов топлива и полезных ископаемых все больше исследований обращены к созданию реального термоядерного реактора нового поколения с положительной выработкой энергии. Одним из основных международных проектов в настоящий момент является экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР (International Thermonuclear Experimental Reactor), проектирование и строительство которого проходит в рамках международного сотрудничества во Франции. Данная работа посвящена разработке цифрового двойника одного из главных элементов диагностической системы «Активная спектроскопия» - первого диагностического зеркала – под действием всевозможных рабочих нагрузок. Среди некоторых ключевых особенностей работы данного диагностического элемента можно отметить:

- значительные нагрузки, связанные с значительным флюенсом нейтронов во внутривакуумном объеме, поскольку данное зеркало находится в непосредственной близости к плазме;

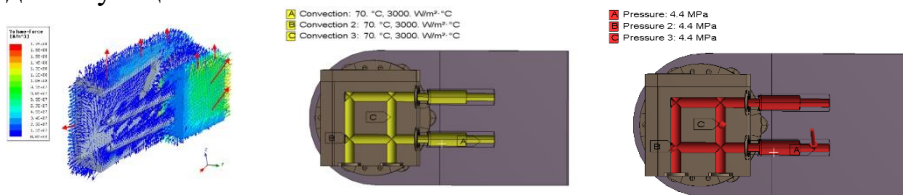
- диагностика работает в импульсном режиме: защитная шторка открывается на 3 секунды, пропуская свет для дальнейшего диагностирования плазмы, после чего закрывается на 20 секунд. Помимо этого, происходит импульсная работа самого токамака, которая усиливает «циклическую» нагрузку. Подобная работа диагностики вызывает циклические тепловые нагрузки на всю конструкцию первого зеркала, что может приводить к снижению ресурса ее использования.

*Разработка цифрового двойника.* Разработка цифрового двойника диагностического оборудования является крайне актуальной и необходимой задачей. Благодаря переносу элементов конструкций в цифровое пространство появляется возможность снижения трудоемкости и увеличения диапазона варьируемых параметров, влияние которых не всегда возможно определить на первых этапах проектирования. Проведение прочностных расчетов позволяет проводить итерационное усовершенствование конструкции, подверженной принципиально различным нагрузкам. В рамках исследования на базе разработанной конструкторами геометрической модели первого зеркала диагностики, был разработан цифровой двойник, максимально приближенный к реальному объекту. Его изображение представлено на рисунке 1.



Цифровой двойник первого зеркала      Характерная импульсная работа  
 Рисунок 1 – Особенности рассматриваемого объекта

На рисунке 2 изображены основные нагрузки, действующие в системе.



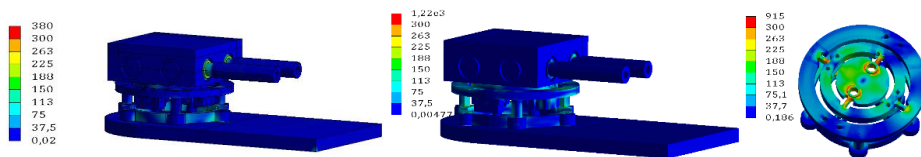
Электромагнитные нагрузки

Конвекция в каналах

Давление в каналах

Рисунок 2 – Основные нагрузки

*Анализ прочности.* На рисунке 3 представлены результаты расчетов прочности в основных режимах работы.



Тепловые нагрузки

Электромагнитные нагрузки

Рисунок 3 – Результаты расчетов прочности. Поля напряжений, МПа

В результате анализа прочности конструкции подтверждена работоспособность предложенного дизайна конструкции. В рабочих режимах расчетные напряжения не превышают допусаемых, согласно зарубежным нормам проектирования атомных и термоядерных энергетических установок RCC-MR.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ В ВЧ РАЗРЯДЕ

Варшавчик Л.А., Бочарников В.А., Старовойтов Е.А.,  
Галицын Д.Д., Мухин Е.Е.

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,*  
[lidia.varsh@mail.ioffe.ru](mailto:lidia.varsh@mail.ioffe.ru)

Диагностические зеркала ИТЭР будут подвержены загрязнению продуктами эрозии первой стенки во время разряда реактора. Для поддержания диагностик в рабочем состоянии планируется проводить периодическую чистку первых зеркал в емкостном ВЧ разряде [1], в котором очищаемая поверхность является одним из электродов. Численное моделирование физических процессов, происходящих в ВЧ разряде в условиях диагностических каналов ИТЭР, предоставит необходимую информацию для создания надежной и эффективной системы чистки.

Сложность такого моделирования обусловлена несколькими факторами. В условиях низкого давления применяются кинетические методы расчета. Необходимость учитывать сложную конструкцию узла первого зеркала приводит к требованию проведения полностью трехмерного расчета, в то время как большинство существующих кодов используют ту или иную симметрию задачи для снижения ресурсоемкости.

Для моделирования емкостного ВЧ разряда в условиях узла первого зеркала диагностик ИТЭР был разработан собственный код КИТе, ранее успешно использовавшийся для моделирования транспорта нейтральных частиц в сложных геометриях [2]. Помимо вышеперечисленных требований, отличительной особенностью является модель расчета локальных электрических полей, создаваемых заряженными частицами в разряде. Стандартная постановка задачи в форме Дирихле, в которой уравнение Пуассона дополняется заданием фиксированных потенциалов на электродах, в высокочастотном

разряде не позволяет контролировать перетекание зарядов между электродами и, следовательно, не гарантирует выполнения условия непрерывности тока на электродах. Для устранения данной проблемы при моделировании разряда в КИТе был реализован учет тока смещения с помощью внесения в систему дополнительных граничных условий. При этом заряды на электродах задаются напрямую после расчета внешней электрической цепи, а напряжение между электродами рассчитывается в процессе решения задачи.

Такой подход аналитически гарантирует выполнение условия непрерывности тока в цепи, хотя присутствует численная погрешность, обусловленная точностью разбиения расчетной сетки (т. е. точностью разложения единицы по базисным функциям сетки) и краевыми эффектами. При расчете эти факторы нужно контролировать, снижая до необходимого уровня.

Реализация расчета локальных значений электрического поля в такой постановке имеет ряд технических сложностей. При трехмерном моделировании для корректного описания поверхностей используется нерегулярная расчетная сетка, в которой каждая ячейка — треугольник или тетраэдр. Дискретизация системы уравнений проводится по составленным на расчетной сетке базисным функциям. Таким образом, приходится применять функции дифференцирования в условиях нерегулярной сетки, что не имеет аналитического представления и решается только численно. Вместе с этим, дополнительные граничные условия, введенные для учета тока смещения, делают матрицу системы уравнений нестандартной и сильно несимметричной, что затрудняет ее решение.

В плазменной части кода КИТе реализован полный цикл моделирования емкостного ВЧ разряда низкого давления: импорт произвольной геометрии, основной расчет методом частиц-в-ячейках, включающий в себя трассировку частиц во внешних полях и учет столкновений, расчет локальных электрических полей и пересчет внешней цепи, а также визуализацию результатов. Проведен первый сет технических тестов. В



настоящий момент идет работа по верификации кода на физических кейсах, а также пробный расчет ВЧ разряда на геометрии узла первого зеркала диагностики томсоновского рассеяния дивертора ИТЭР.

### **Литература**

- [1]. Shigin P. et al. RF discharge mirror cleaning system development for ITER diagnostics //Fusion Engineering and Design. – 2021. – Т. 164. – С. 112162.
- [2]. Varshavchik L. et al. Three-dimensional simulation of neutral transport in gases and weakly ionized plasmas (2021) Plasma Physics and Controlled Fusion, 63 (2), art. no. 025005

# ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ РАЗРЯДА И КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ЗЕРКАЛ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ» РЕАКТОРА ИТЭР

Капустин Ю.В.<sup>1,2</sup>, Рогов А.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>УТС-Центр, г. Москва, Россия, [kapura90@yandex.ru](mailto:kapura90@yandex.ru)

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия,  
[Kapustin\\_YV@nrcki.ru](mailto:Kapustin_YV@nrcki.ru)

Для очистки внутривакуумных зеркал реактора ИТЭР планируется использовать встроенные системы очистки, основанные на периодическом распылении отражающей поверхности ионами плазмы, создаваемой в разряде постоянного/импульсного тока или высокочастотном разряде. Среди потенциальных трудностей использования DC/PDC системы очистки зеркал оптических диагностик ИТЭР стоит выделить достаточно высокое давление, необходимое для инициации чистящего разряда, и относительно высокую энергию ионов, бомбардирующих поверхность зеркала. В случае диагностики «Активная спектроскопия» [1] давления зажигания лежат в диапазоне от 1 до 100 Па, причём при использовании дейтерия или гелия требуются наиболее высокие давления. С учётом концепции ИТЭР по заполнению всего вакуумного объёма установки газом до давления, при котором будет проводиться очистка ( $< 10$  Па) [2], для инициации разряда может потребоваться применение вспомогательных инструментов. В настоящей работе рассмотрена возможность использования импульса высокого напряжения для пробоя межэлектродного промежутка. Представлены результаты, полученные на примере полноразмерных узлов входных зеркал диагностики «Спектроскопия водородных линий» [3].

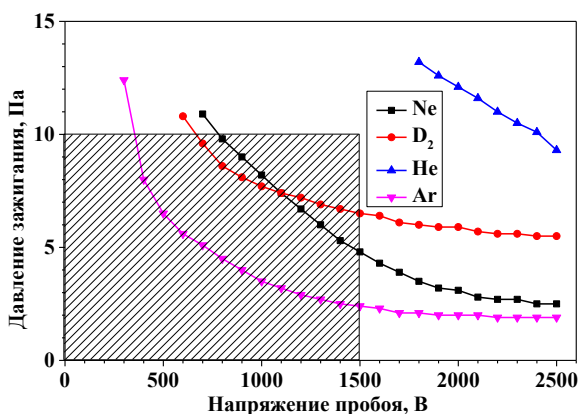


Рис. 1. Зависимость давления зажигания чистящего разряда в системе очистки первого зеркала диагностики «Активная спектроскопия» от напряжения, подаваемого на межэлектродный промежуток

Вскоре после поджига параметры разряда стабилизируются, и для определения момента окончания очистки необходимо контролировать процесс очистки. В работе исследованы три независимых метода контроля процесса очистки зеркал: по результатам измерения напряжения чистящего разряда при фиксированном токе, на основании измерения частоты возникновения микродуговых привязок при наличии диэлектрических загрязнений и посредством эмиссионной спектроскопии чистящего разряда. Показано, что все три способа могут быть использованы в системах очистки. Первый из рассмотренных методов выглядит наиболее перспективным, поскольку не требует дополнительных датчиков, используя только данные, получаемые от источника питания разряда, и применим при очистке как от электропроводящих, так и от тонких диэлектрических загрязнений. Контроль на основе измерения частоты возникновения микродуговых привязок может применяться для переключения между импульсным режимом и режимом постоянного тока при наличии слоистых металл-диэлектрических загрязнений, а также при очистке от локальных диэлектрических загрязнений, сформировавшихся в

ходе аварий. Спектроскопический метод контроля обеспечивает наиболее высокую чувствительность и позволяет определить состав загрязнений, однако предъявляет повышенные требования к регистрирующей аппаратуре. Рассмотренные методы могут быть использованы для автоматизации процесса удаления загрязнений в системах плазменной очистки входных диагностических зеркал термоядерных установок.

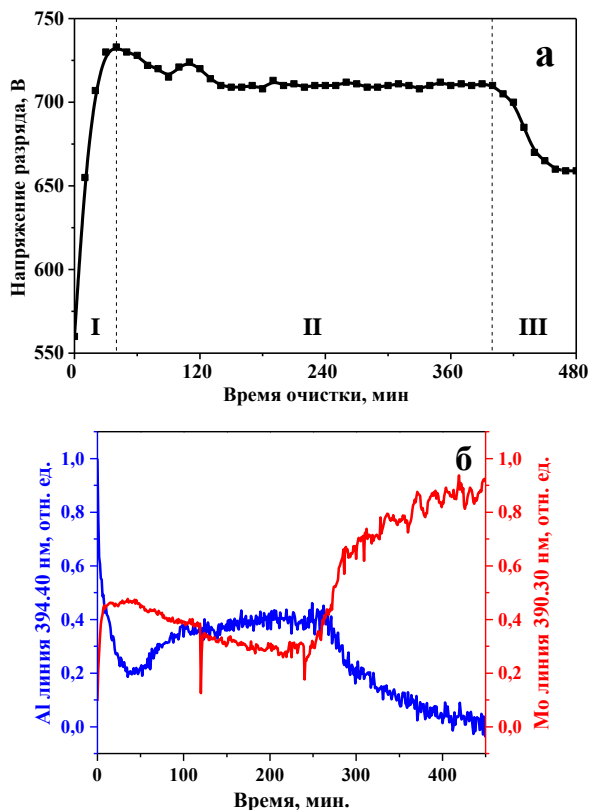


Рис. 2. Сравнение двух методов контроля процесса очистки зеркал от двухслойного загрязнения ( $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ): а – по мониторингу динамики изменения напряжения разряда; б – по результатам изменения относительной интенсивности линий Al I и Mo I.

## Литература

- [1]. Рогов А.В., Капустин Ю.В.; Приборы и техника эксперимента; 2021; № 3; С. 60-67.
- [2]. Ben Yaala M., Moser L., Steiner R., Butoi B., Dinca P., Petersson P., Marot L., Meyer E.; Nuclear Fusion; 2019; V. 59; Is. 9; 096027.
- [3]. Андреев Е.Н., Орловский И.И., Алексеев А.Г., Морозов А.А.; ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез; 2019; Т. 42, В. 3; С. 13-24.
- [4]. Szapiro B., Rocca J.J., Prabhuram T. Electron yield of glow discharge cathode materials under helium ion bombardment. Appl. phys. Lett. 1988. V. 53. Is. 358.

## ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПОРТА №11 ИТЭР В ИЯФ

Кравцов Д.Э.<sup>2</sup>, Бурдаков А.В.<sup>1,5</sup>, Буслаков И.В.<sup>3</sup>, Шарафеева С.Р.<sup>1</sup>,  
Селезнев П.А.<sup>1</sup>, Рыжанков И.С.<sup>1</sup>, Иванцовский М.В.<sup>1</sup>,  
Кириенко И.Д.<sup>3</sup>, Гавриленко Д.Е.<sup>1</sup>, Лобачев А.М.<sup>3</sup>, Логинов И.Н.<sup>3</sup>,  
Шабунин Е.В.<sup>1</sup>, Модестов В.С.<sup>3</sup>, Норышев Е.А.<sup>1</sup>, Пожилов А.А.<sup>3</sup>,  
Суляев Ю.С.<sup>1</sup>, Шагниев О.Б.<sup>3</sup>, Шиянков С.В.<sup>1</sup>, Шошин А.А.<sup>1,4,5</sup>

<sup>1</sup>*Институт Ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, РФ, e-mail: [Yu.S.Sulyaev@inp.nsk.su](mailto:Yu.S.Sulyaev@inp.nsk.su)*

<sup>2</sup>*Частное учреждение ГК «РосАтом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, РФ, e-mail: [d.kravtsov@iterrf.ru](mailto:d.kravtsov@iterrf.ru)*

<sup>3</sup>*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, РФ, e-mail: [vmodestov@spbstu.ru](mailto:vmodestov@spbstu.ru)*

<sup>4</sup>*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, РФ, e-mail: [A.A.Shoshin@inp.nsk.su](mailto:A.A.Shoshin@inp.nsk.su)*

<sup>5</sup>*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, РФ, e-mail: [A.V.Burdakov@inp.nsk.su](mailto:A.V.Burdakov@inp.nsk.su)*

На текущем этапе работы по изготовлению поставочных компонентов экваториального порта (ЭП) № 11 токамака ИТЭР происходит переход от проектирования к их непосредственному изготовлению. Организован процесс закупки материалов с учётом специальных требований ИТЭР к менеджменту качества поставщиков и к самим заготовкам. Проведено два этапа защиты готовности к производству, специалистами ИТЭР были одобрены технологии, спецпроцессы, процедуры и методы контроля, согласно которым будет изготавливаться поставочное оборудование. Был выполнен очередной этап изготовления внутривакуумных изделий, а именно глубокое сверление каналов охлаждения в корпусе диагностического защитного модуля (ДЗМ) №2. Проведены инженерные расчёты наиболее нагруженных узлов экваториального порта №11 как в вакуумной, так и во вневакуумной части. Расчёты подтверждают заложенные в техническом задании параметры температурных полей сборки из трёх ДЗМ с учётом оптимизированной балансировки теплоносителя в каналах охлаждения, а также их механическую прочность для наиболее

тяжёлых сценариев работы ИТЭР. Проведённые расчёты радиационной обстановки во вневакуумной части экваториального порта №11 за перегородкой биозащиты позволили оптимизировать его радиационную защиту таким образом, чтобы соответствовать требованиям ИТЭР по обслуживанию портовых систем.

На экспериментальном производстве ИЯФ проведена международная аттестация процедуры ручной сварки типичных для производства компонентов порт-плага ИТЭР, а также аттестация сварщиков в соответствии с требованиями серии EN ISO 15614. Освоена специализированная установка для роботизированной сварки, специалисты ИЯФ с её помощью успешно выполнили типичные для поставочных изделий ИТЭР сварные швы. Установка подготовлена к процедуре квалификации и аттестации.

На интеграционной площадке ИЯФ для окончательной сборки поставочных изделий ИТЭР был установлен опытный образец подсистемы ультразвукового контроля сварных швов сложной геометрии. Используется неиммерсионная пятикоординатная система перемещения датчика с модулем автоматической подачи контактной жидкости. Данное устройство предназначено для автоматизации позиционирования на поверхности ДЗМ сканирующей головки для ультразвукового контроля сварных швов.

Изготовлены компоненты нейтронной защиты с использованием керамических блоков из спечённого карбида бора. Производство керамики соответствует утверждённой Организацией ИТЭР спецификации ITER\_D\_457ТВН и унифицированному чертежу ITER\_D\_X2GWTZ. Вакуумные и прочностные испытания поставочных керамических блоков подтверждают возможность их использования внутри вакуумной камеры ИТЭР.

В докладе обсуждается подготовка производственных мощностей ИЯФ СО РАН к изготовлению и сборке оборудования для размещения диагностических систем в соответствии с правилами и требованиями французского кода RCC-MR 2007. В частности, идёт процесс квалификации специальных производственных процессов, используемых в процессе изготовления вакуумных изделий для ИТЭР, классифицируемых как часть объекта ядерной энергетики.

# МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ РАБОЧИХ И ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ УСТАНОВКИ ТОКАМАК Т-15МД

Образцов И.С.<sup>1</sup>, Анашкин И.О.<sup>1</sup>, Кочин В.А.<sup>1</sup>, Цыганков И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия,  
[yuganinn@yandex.ru](mailto:yuganinn@yandex.ru)

<sup>2</sup> ООО «ИТЦ ИУС», г. Воронеж, Россия

В 2023 году в НИЦ "Курчатовский институт" произведен энергетический пуск экспериментальной термоядерной установки токамак Т-15МД, которая предназначена для проведения исследований в области управляемого термоядерного синтеза. В данном типе установок для получения высокотемпературной плазмы в разрядной камере необходимо поддерживать требуемый уровень вакуума, а также контролировать уровень и состав остаточных и рабочих газов. В токамаке Т-15МД функцию создания вакуума выполняет система вакуумной откачки (СВО) [1], контроля вакуумного давления — система вакуумметрии [2], а контроля состава остаточных и рабочих газов — масс-спектрометрия.

Масс-спектрометрия установки Т-15МД состоит из 2-х масс-спектрометрических модулей, один из которых установлен на вакуумной камере, а второй размещен в откачном трубопроводе Ду400 над криосорбционным модулем. Оба модуля гальванически развязаны от металлических конструкций установки через керамический изолятор. Каждый масс-спектрометрический модуль состоит из двух ручных высоковакуумных клапанов Kinglai Group CF2.75", широкодиапазонного датчика вакуумного давления Thyasont VSM72 с диапазоном измерения  $5 \cdot 10^{-9} \div 750$  Торр и квадрупольного масс-спектрометра Extorr XT200M (см. рис. 1а, 1б).

Основные характеристики масс-спектрометра Extorr XT200M:

- диапазон анализируемых масс анализаторов  $1 \div 200$  а.е.м.;
- тип фильтра масс квадрупольный;
- разрешающая способность менее 1 а.е.м. при высоте пика 10%, настраиваемая;



- диапазон рабочих давлений от  $10^{-4}$  Торр до сверхвысокого вакуума.
- программное обеспечение VacuumPlus v34,
- интерфейс подключения RS-232C.

Откачка масс-спектрометрических модулей производится переносным безмасляным высоковакуумным откачным постом Pfeiffer HiCube80 Eco.

Масс-спектрометрические модули включены в автоматизированную систему управления СВО (АСУ СВО) [3].

Датчики Thyracont VSM72 подключаются по аналоговым линиям связи к 16-битным аналого-цифровым преобразователям сигналов 140AVI03000 Schneider Electric, установленным в шкафах распределенного ввода-вывода (ШРВВ) АСУ СВО, а масс-спектрометры подключены к Ethernet серверам последовательных интерфейсов RS-232/422/485 NPORT IA5150AI MOXA, которые также установлены в данных шкафах. Подача питания на вакуумные датчики и масс-спектрометры осуществляется через реле, управление реле производится через модуль вывода дискретных сигналов 140DDO35300.

Цифровые данные от модулей 140AVI03000 по сети Ethernet RIO поступают в установленный в шкафу ПЛК (ШПЛК) процессорный модуль Modicon Quantum 140CPU67160, в данном модуле происходит исполнение программы управления процессом вакуумной откачки токамака Т-15МД. Шкаф ПЛК по протоколу Fast Ethernet связан с локальной вычислительной сетью цифровой системы управления (ЛВС ЦСУ) установки Т-15МД. Преобразованные данные от NPORT IA5150AI MOXA также напрямую поступают в ЛВС ЦСУ.

Далее указанные выше цифровые данные от датчиков давления по ЛВС ЦСУ поступают в центр обработки данных (ЦОД) информационно-управляющей системы (ИУС) Т-15МД. В шкафу дискового массива ЦОД осуществляется их архивное хранение, а в шкафу серверном ЦОД происходит их последующая обработка и представление оператору технологических систем с применением человеко-машинных интерфейсов программного комплекса Wonderware InTouch 2014 через автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора технологических систем и АРМ оператора СВО.

В экранной форме (ЭФ) масс-спектрометрических модулей (рис. 1в) у оператора имеется возможность управлять подачей

питания на датчики давления и масс-спектрометры данных модулей (кнопки: Вкл/выкл); в режиме реального времени просматривать значения давлений в масс-спектрометрических модулях; вызывать штатную программу управления масс-спектрометром VacuumPlus v34 (кнопка: S); а также просматривать архивные данные масс-спектров с помощью запуска программы MSpectrgraph v1 (кнопка: Архив 2MS1 и Архив 2MS2). В отдельном окне с графиками можно вывести значения давления сразу от нескольких вакуумных датчиков для любого временного интервала, в том числе и от датчиков давления масс-спектрометрических модулей.

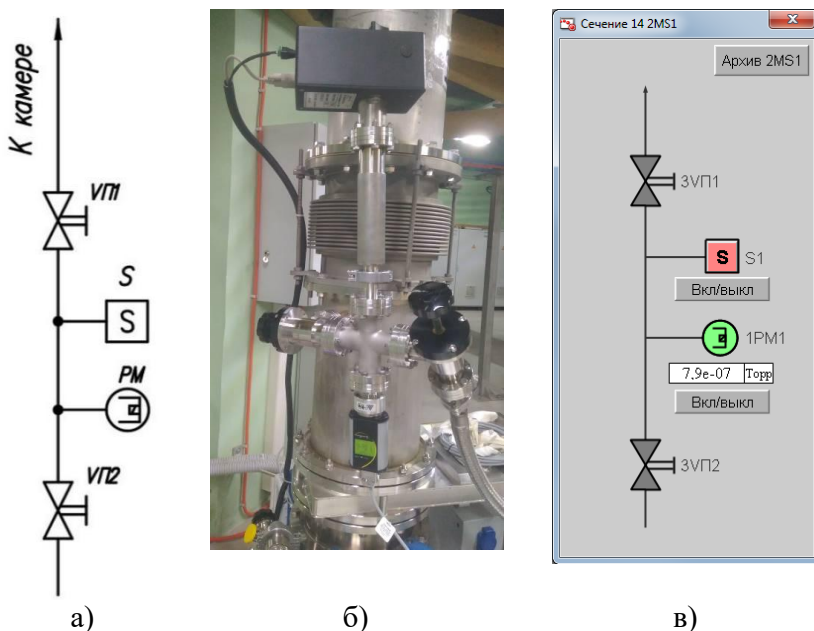


Рис. 1. Масс-спектрометрический модуль  
 а) принципиальная вакуумная схема б) фото масс-спектрометрического модуля, установленного в откачном трубопроводе Ду400 в) экранная форма управления масс-спектрометрическим модулем

Штатная программа управления масс-спектрометром VacuumPlus v34 позволяет осуществлять все основные настройки масс-спектрометра, производить измерения масс-спектров, а также сохранять измеренные данные в CSV-файлы. К сожалению,

просмотр CSV-файлов в данной программе не предусмотрен, поэтому для удобства визуального отображения архивных масс-спектрометрических данных оператором используется программа просмотра масс-спектров MSpectrgraph v1 (рис. 2). Программа MSpectrgraph v1 имеет кроссплатформенный пользовательский интерфейс и запускается через любой современный браузер. В ней реализована возможность просмотра как единичного масс-спектра, так и целой серии масс-спектров из 2-х разных файлов с наложением сразу всех или любого из них друг на друга, что позволяет с легкостью визуально оценить динамику изменения состава остаточных и рабочих газов. Кроме того, в данной программе имеется возможность сохранения масс-спектров в виде изображений в растровом и векторном формате.

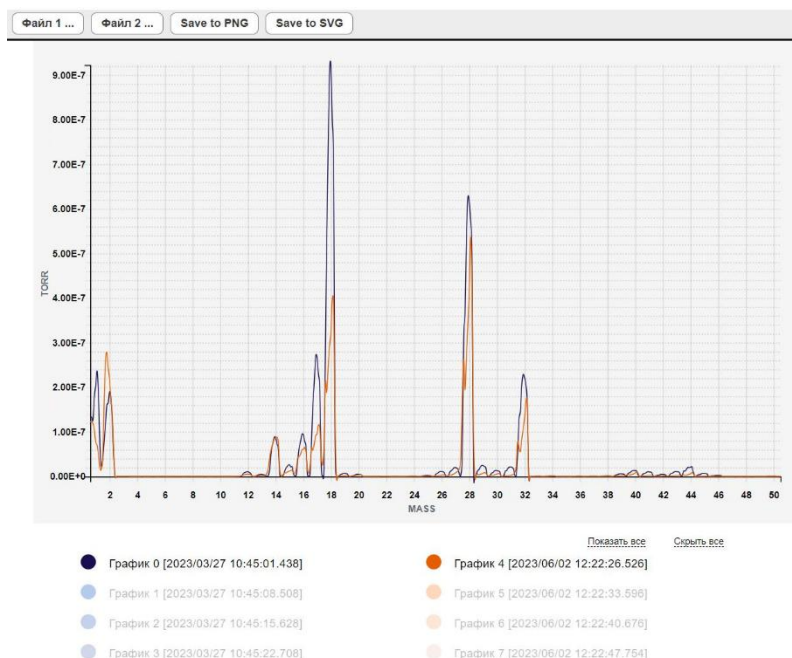


Рис. 2. Окно программы просмотра архивных масс-спектров MSpectrgraph v1

В перспективе намечена модернизация масс-спектрометрических модулей. Планируется доработка управляемого прогрева вакуумных линий с возможностью контроля температуры

нагрева, добавление в вакуумную схему регулируемых вакуумных клапанов-накателей, а также создание более продвинутой версии программного обеспечения просмотра масс-спектров с возможностью вычитания спектров и построения временной развертки парциального давления по выбранным массам. Ввиду сильных постоянных магнитных полей от обмоток токамака на данный момент в полном составе установлен только один масс-спектрометрический модуль в откачном трубопроводе Ду400. Для полноценного использования второго модуля рассматривается разработка магнитного экрана.

### Литература

- [1]. Анашкин И. О., Кочин В. А., Образцов И. С. Система откачки вакуумной камеры установки токамак Т-15МД // ВАНТ Серия: Термоядерный синтез. Том 46. Выпуск 3 (статья принята в печать).
- [2]. Образцов И. С., Анашкин И. О., Кочин В. А. Вакуумметрия разрядной камеры установки токамак Т-15МД // XIX Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», секция №8, 27 сентября – 1 октября 2021 г., Сочи, С. 290-293.
- [3]. Кузьмина Г. С., Моцкин Ю. Я., Качкин А. Г., Образцов И. С., Соколов М. М., Хвостенко П. П., Чуканов М. В. Система управления процессом технологической подготовки токамака Т-15МД к эксперименту // Мир компьютерной автоматизации. Век XXI., 2017, вып. №3. С. 49-58.

# ИМПУЛЬСНЫЙ МАНОМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ ИОНИЗАЦИОННОЙ ЛАМПЫ

Першин П.В., Багрянский П.А., Коробейникова О.А.,  
Мурахтин С.В.

<sup>1</sup>*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, Россия, [P.V.Pershin@inp.nsk.su](mailto:P.V.Pershin@inp.nsk.su)*

Большинство приборов для измерения вакуума (вакуумметры) разрабатываются для медленных газовых процессов ( $\tau > 10$  мс). Импульсные измерения вакуума вблизи границы плазмы обычно производятся магниторазрядными ячейками, ориентируемыми по магнитному полю установки [1]. Данные лампы, инверсно-магнетронного типа, использовались в экспериментах на установке ГДЛ [2] и выявили ряд эксплуатационных особенностей, связанных с чувствительностью к точности ориентации датчика по ведущему магнитному полю и его индукции в точке измерения. Нами предложена новая схема импульсного измерения концентрации остаточного газа во время рабочего импульса плазменной установки с использованием ионизационной лампы ПМИ-27. Данная лампа имеет два режима: высоковакуумный ( $2 \times 10^{-8}$  до  $1 \times 10^{-2}$  Па) и низковакуумный ( $3 \times 10^{-3}$  до 10 Па). Штатная система питания этой лампы не позволяла измерять быструю динамику газа (вакуумметр ионизационный ВИ-14). Стояла задача реализовать в эксперименте быстрый ( $< 1$  мс) и линейный отклик на изменение концентрации в рабочем объёме. Была разработана новая система питания лампы и проведены измерения чувствительности в интересующем диапазоне давлений. Абсолютная калибровка проходила на вакуумном стенде с известной скоростью откачки и напуска газа. Эксперименты показали хорошую динамику отклика лампы ( $< 1$  мс) на изменения газовых условий с помощью напуска пьезоэлектрическим клапаном. Линейность калибровалась по вакуумному измерителю фирмы Thyracont Vacuum Instruments GmbH модель VSM77DL. Измерения

показали отличную линейность в диапазоне  $3 \times 10^{-3}$  до 10 Па и даже на более глубоком вакууме, но для целей эксперимента этот диапазон не используется. В результате проделанной работы был получен быстрый ( $\tau < 1$  мс) измеритель, который может в реальном времени регистрировать изменения давления и выдавать пропорциональный аналоговый электрический сигнал, который поступает на вход системы сбора данных установки.

### Литература

- [1]. Е.Д.Бендер и др. // В сб. Вопросы атомной науки и техники, сер. Термоядерный синтез. М.: ЦНИИАТОММИНФОРМ, 1987 г., Выпуск 4, стр.41.
- [2]. С.В.Мурахтин, Динамика нейтрального газа и удержание быстрых ионов в ГДЛ, дис. на соискание учёной степени к.ф.-м.н., Новосибирск, 1997, стр. 26.

# ДИАГНОСТИКА ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ГРАФИТОВЫХ ПЛИТОК ЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКИ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ТОКАМАКА Т-15МД

Архипов И.И.<sup>1,2</sup>, Грашин С.А.<sup>1</sup>, Чудеснов А.И.<sup>1</sup>, Лукашевич А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, РФ,  
[grashin\\_sa@nrcki.ru](mailto:grashin_sa@nrcki.ru)

<sup>2</sup>ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, РФ,  
[igor\\_arkhipov\\_54@mail.ru](mailto:igor_arkhipov_54@mail.ru)

В рамках подготовки токамака Т-15МД к проведению плазменного разряда, исследовано газовыделение из графитовых плиток, которыми будет облицована внутренняя поверхность дивертора и стенок вакуумной камеры установки. Экспериментальное моделирование газовыделения из графита в условиях, сходных с условиями на токамаке, было проведено на ЭлектроВакуумном Стенде Т-15 (ЭВС Т-15) с начальным давлением не хуже  $8 \times 10^{-6}$  Торр.

При проведении отжигов на ЭВС Т-15, внутри камеры размещалась специальная платформа, на внешней поверхности которой было закреплено 19 плиток размером  $150 \times 150 \times 23$  мм<sup>3</sup>, изготовленных из графита марки SIGRAFINE «R6510P100D01» производства фирмы «SGL Carbo». Встроенный в платформу ТЭН на основе кирскабеля позволял нагревать плитки до температуры 200-220 °С в течение 4-5 часов. Для того чтобы учесть влияние десорбции газа с поверхности нагревателя и стенок, такие же отжиги были проведены после удаления графита из вакуумной камеры.

Общее количество десорбируемого газа определялось по изменению полного давления в камере, измеренному с помощью манометров Thyracont VSM72 с холодным катодом. Диагностика парциальных давлений проводилась по спектру остаточных газов, полученному квадрупольным масс-спектрометром Extorr

ХТ200М на основе специально разработанной компьютерной программы.

Расчет с использованием скорости откачки камеры ЭВС Т-15 и ее объема показал, что прирост давления на стационарной стадии отжига соответствует потоку газа с поверхности нагретого графита не более  $3 \times 10^{-2}$  (л×Торр)/с или  $1 \times 10^{18}$  молекул/с. То есть поток газа из графитовых образцов, нагретых до температуры 200-220 °С, достаточно мал и не приводит к серьезному ухудшению давления в камере. Такая величина гажения графита, по-видимому, свидетельствует о его низкой пористости, находящейся на уровне широко использованных графитов марки МПГ. Для диагностики осаждения пленок, в камере ЭВС Т-15 были размещены собирающие зонды из пластин кварца и монокристаллического кремния, расположенные над и под графитовой сборкой. Анализ зондов после прогрева графита не обнаружил осаждения углеводородных пленок, что так же свидетельствует о высоком качестве графитового материала.

Полученные данные позволяют оценить влияние нагрева графитовых плиток на вакуумные условия токамака Т-15МД в ходе его эксплуатации, зная объем вакуумной камеры, скорость откачки и число графитовых плиток (50 м<sup>3</sup>, 3000 л/с и 840, соответственно). Показано, что при первом нагреве графита до температуры 200-220 °С, увеличение давления в камере составило не более  $1.0 \times 10^{-5}$  Торр. Такое ухудшение вакуумных условий не является критичным для откачной системы и не может вывести ее из строя. Проведение отжигов в течение нескольких суток позволит удалить из графита и со стенок камеры сорбированные газы и добиться хороших вакуумных условий. При этом предварительный (до монтажа в камере) отжиг графитовых плиток до высоких температур желателен, но не является обязательным.

Действительно, проведенный в конце 2022 года прогрев камеры токамака Т-15МД с частично установленным защитным графитовым покрытием до температуры 120-140 °С в течение четырех дней, привел к улучшению вакуума в два раза с  $8 \times 10^{-6}$  до  $4 \times 10^{-6}$  Торр. Длительный (почти три месяца) отжиг весной



2023 года при таких же температурах не привел к изменению базового давления ( $4 \times 10^{-6}$  Торр). Давление в камере перед завершением прогрева установилось на уровне  $5-6 \times 10^{-6}$  Торр, то есть не сильно отличалось от давления после отжига, которое, по видимому, определяется внешним натеканием в вакуумную камеру.

Помимо прогрева стенок и «чистящего» тлеющего разряда в Ar, Ne или  $N_2$  [1], одним из эффективных методов, который позволит существенно улучшить вакуумные условия для получения устойчивого плазменного разряда в термоядерных установках, является боронизация [2, 3]. В настоящее время начата подготовка боронизации токамака Т-15МД.

### Литература

- [1]. Экспериментальная проверка эффективности удаления примесей с помощью тлеющего разряда на токамаке Т-15МД, Архипов И. И., Грашин С.А., XIX Всероссийская конференция ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ, Сочи 2021 г., сборник тезисов, страницы 225-226
- [2]. Boronization of Russian tokamaks from carborane precursors, V.M Sharapov, S.V. Smirnov, S.A. Grashin, S.V. Lebedev, I.A. Kovan, A.V. Krasilnikov, V.A. Krupin, L.S. Levin, A.N. Romannikov, A.P. Zakharov, Journal of Nuclear Materials 220-222 (1995) 730
- [3]. Boronization in textor, J. Winter, H.G. Esser, L. Könen, V. Philipps, H. Reimer, J.v. Seggern, J. Schlüter, E. Vietzke, F. Waelbroeck, P. Wienhold, T. Banno, D. Ringer, S. Vepřek, Journal of Nuclear Materials 162-164 (1989) 713

**РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСА  
СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИК ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ НА  
ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2**

Е.А. Тюхменева<sup>1</sup>, С.Ю. Толстяков<sup>1</sup>, В.В. Забродский<sup>1</sup>,  
В.А. Соловей<sup>2</sup>, В.И. Варфоломеев<sup>1</sup>, Н.С. Жильцов<sup>1</sup>,  
Г.С. Курский<sup>1</sup>, И.М. Балаченков<sup>1</sup>, В.К. Гусев<sup>1</sup>, Е.О. Киселёв<sup>1</sup>,  
В.Б. Минаев<sup>1</sup>, И.В. Мирошников<sup>1</sup>, Е.Е. Мухин<sup>1</sup>,  
А.Н. Новохацкий<sup>1</sup>, Ю.В. Петров<sup>1</sup>, Н.В. Сахаров<sup>1</sup>, А.Ю. Тельнова<sup>1</sup>,  
Н.Н. Бахарев<sup>1</sup>, О.М. Скрекель<sup>1</sup>, П.Б. Щёголев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,  
[post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)*

<sup>2</sup>*НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ, Ленинградская обл.,  
Гатчина, Россия, [dir@pnpi.nrcki.ru](mailto:dir@pnpi.nrcki.ru)*

На сферическом токамаке Глобус-М2 для исследования поведения примесей используется диагностический комплекс, состоящий из диагностики эффективного заряда  $Z_{\text{eff}}$  [1], спектроскопической диагностики, диагностики радиационных потерь  $P_{\text{rad}}$  [2] и мягкого рентгеновского излучения (SXR).

В рамках развития и расширения комплекса была модернизирована диагностика SXR и радиационных потерь. В качестве детекторов использованы SPD [3, 4] фотодиоды, имеющие чувствительность в диапазоне 1 – 15 000 эВ. Для регистрации излучения SXR в двух ракурсах были разработаны два фотодиодных массива из трех линеек по 24 пикселя, одна из которых используется для регистрации в широком диапазоне для

измерения  $P_{\text{rad}}$  и две линейки за бериллиевыми фильтрами толщиной 20 и 50 мкм используются для измерения спектра SXR, что позволяет рассчитывать электронную температуру. Хорды регистрации фотодиодных массивов лежат в одном полоидальном сечении камеры токамака, обеспечивая угол обзора  $\sim 70$  градусов при наблюдении области дивертора и  $\sim 89$  градусов для центральной линии наблюдения в экваториальной плоскости.

Такая конфигурация позволит томографическими методами восстановить двумерное распределение излучения в полоидальном сечении, включая диверторную область. Новая система сбора данных, разработанная специально для диагностического комплекса, содержит 176 гальванически развязанных каналов с частотой оцифровки до 1 МГц и позволяет записывать сигналы с каждого отдельного пикселя фотодиодных массивов, а также монохроматоров  $Z_{\text{eff}}$  и спектроскопической диагностики.

В докладе рассмотрен актуальный статус модернизации спектроскопических диагностик и продемонстрированы первые экспериментальные результаты, полученные с использованием новой системы SPD фотодиодов. На данный момент в вакуумной камере установлена одна из шести линеек (1x24 пикселей) системы измерения мягкого рентгеновского излучения на экваториальной плоскости для регистрации излучения в широком диапазоне (без фильтров). Измерения проводились для различных параметров плазмы в омических разрядах, разрядах с дополнительным нагревом [5], в разрядах с неустойчивостью «снейк» [6], тиринг [7] и альфеновскими модами [8], пилообразными колебаниями. По результатам первых измерений были проанализированы возможности применения фотодиодных массивов для регистрации различных МГД-явлений и исследования переноса примесей на токамаке Глобус-М2.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-00033.

## Литература

- [1]. A. D. Sladkomedova, A. G. Alekseev, N. N. Bakharev, V. K. Gusev, N. A. Khromov, G. S. Kurskiev, V. B. Minaev, M. I. Patrov, Yu. V. Petrov, N. V. Sakharov, P. B. Shchegolev, V. V. Solokha, A. Yu. Telnova, S. Yu. Tolstyakov, and V. V. Zabrodsky // Review of Scientific Instruments 2018 V.89, P.083509 (<https://doi.org/10.1063/1.5039801>)
- [2]. Tukhmeneva E. A. et al 2019 Plasma Sci. Technol. 21 105104.
- [3]. А. Г. Алексеев и др., // ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2022, том 48, No 12, с. 1206–1215.
- [4]. P. N. Aruev et al ., // INSTRUMENTS AND EXPERIMENTAL TECHNIQUES Vol. 64 No. 1 2021.
- [5]. A Yu Telnova et al 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1400 077015
- [6]. М.И. Патров, Ю.В. Петров, В.К. Гусев, Г.С. Курскиев, А.Н. Новохацкий, С.А. Сахаров, С.Ю. Толстяков // Журнал технической физики, 2011, том 81, вып. 9
- [7]. Alexander Yashin, Anna Ponomarenko, Ivan Balachenkov, Gleb Kurskiev, Evgenii Kiselev, Vladimir Minaev, Alexander Petrov, Yury Petrov, Nikolay Sakharov and Nikita Zhiltsov // Appl. Sci. 2023, 13, 3430. <https://doi.org/10.3390/app13063430>
- [8]. И.М. Балаченков, Ю.В. Петров, В.К. Гусев, Н.Н. Бахарев, В.И. Варфоломеев и др. // Письма в ЖТФ, 2021, том 47, вып. 12

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОГО РАДИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА L-N ПЕРЕХОД В КОМПАКТНОМ ТОКАМАКЕ

А.А. Белокуров<sup>1</sup>, Л.Г. Аскинази<sup>1</sup>, А.Д. Гурченко<sup>1</sup>, Е.З. Гусаков<sup>1</sup>,  
В.К. Гусев<sup>1</sup>, Н.А. Жубр<sup>1</sup>, Е.О. Киселев<sup>1</sup>, В.А. Корнев<sup>1</sup>,  
Д.В. Куприенко<sup>1</sup>, Г.С. Курскиев<sup>1</sup>, С.И. Лашкул<sup>1</sup>, С.В. Лебедев<sup>1</sup>,  
А.В. Петров<sup>2</sup>, Ю.В. Петров<sup>1</sup>, Д.В. Разуменко<sup>1</sup>, С.Ю. Толстяков<sup>1</sup>,  
А.С. Тукачинский<sup>1</sup>, А.Ю. Яшин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Российская Федерация, [belokurov@mail.ioffe.ru](mailto:belokurov@mail.ioffe.ru)

<sup>2</sup> СПбПУ, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Известно, что турбулентный перенос в плазме токамака подавляется сильно неоднородным радиальным электрическим полем  $E_r$  [1], при этом в плазме существуют процессы, при которых самосогласованно возникает сильно неоднородное переменное  $E_r$ , например зональные потоки и их частный случай - геодезическая акустическая мода (ГАМ) [2]. Эффективность подавления турбулентности и возможность инициирования перехода в режим улучшенного удержания (L-N перехода) зависят от пространственных и временных параметров возмущения  $E_r$ .

Зональные потоки и ГАМ наблюдались на многих токамаках [2], в том числе на трех токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе при использовании различных диагностик. На токамаке ТУМАН-3М наблюдались ГАМ с помощью диагностики пучком тяжёлых ионов [3] и диагностики доплеровского обратного рассеяния [4]. ГАМ наблюдались в L-моды в виде серии вспышек колебаний потенциала плазмы длительностью несколько мс, при этом иногда перед L-N переходом наблюдался спад частоты ГАМ [3]. В других сценариях колебания скорости полоидального вращения плазмы с периодически возрастающей и затухающей амплитудой наблюдались в течение всей L-моды [4]. Активность

ГАМ наблюдалась в основном перед L-N переходом (как вызванном импульсом газонапуска, так и спонтанном), при этом в H-моде ГАМ исчезали; таким образом ГАМ могли выступать возможным триггером L-N перехода (или способствовать L-N переходу) из-за формирования переменного неоднородного  $E_r$  [5, 6].

В токамаке ФТ-2 активность ГАМ обычно наблюдалась в сценариях с низкой плотностью при помощи диагностики доплеровского обратного рассеяния [7], при этом амплитуда ГАМ была значительно выше, чем в токамаке ТУМАН-3М, хотя в этих разрядах не наблюдался L-N переход; таким образом, амплитуда переменного  $E_r$  является не единственным фактором, отвечающим за возможность инициирования L-N перехода.

В токамаке Глобус-М также были обнаружены ГАМ при использовании нескольких диагностик (одновременное наблюдение колебаний скорости вращения плазмы при помощи диагностики доплеровской рефлектометрии, наблюдение колебаний свечения линии  $D_a$  на частоте ГАМ, а также наблюдения колебаний на частоте ГАМ на магнитных зондах) [8]. Наряду с ГАМ в токамаке Глобус-М наблюдались низкочастотные зональные потоки, которые проявлялись в виде колебаний предельного цикла (LCO) [9], и что немаловажно, в некоторых сценариях (в зависимости от частоты LCO) приводили к переходу в H-моду из I-фазы (режима с LCO).

Различные эксперименты подчеркивают связь между возможностью или невозможностью L-N перехода и параметрами переменного радиального электрического поля. Для определения взаимосвязи параметров переменного  $E_r$  и условий инициирования L-N перехода было проведено численное моделирование экспериментальных сценариев для трех токамаков ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Подход, использованный в данной работе, основан на принципах анализа уравнений переноса с нелинейными коэффициентами переноса, зависящими от градиентов плотности и давления (и, таким образом, имитирующих подавление турбулентности неоднородным  $E_r$ ) [10, 11].

С помощью данной модели для сценариев с ГАМ в токамаке ТУМАН-3М было установлено, что вспышка ГАМ с параметрами, аналогичными наблюдаемым в ТУМАН-3М, может выступать в качестве триггера L-N перехода [5, 6]. Существуют взаимосвязанные пороговые значения амплитуды, частоты, длины волны колебаний ГАМ и минимальной длительности вспышки, необходимой для инициирования L-N перехода.

Применение численного моделирования к сценариям токамака ФТ-2 показало, что, несмотря на более высокую амплитуду ГАМ по сравнению с токамаком ТУМАН-3М, L-N переход в токамаке ФТ-2 не может быть инициирован вспышкой ГАМ. Источник частиц в сценариях с низкой плотностью в ФТ-2 слишком мал, поэтому L-N переход в разрядах с низкой плотностью в ФТ-2, инициированный ГАМ, невозможен [5, 6].

Для экспериментальных параметров разрядов с LCO в токамаке Глобус-М результаты моделирования показывают, что LCO в токамаке Глобус-М могут привести к инициированию L-N перехода; частота колебаний может быть решающим фактором для LCO, определяющим сценарий перехода в токамаке Глобус-М: L-I-N или L-I-L. При одинаковой в обоих случаях амплитуде LCO меньшая частота LCO приводит к инициированию перехода в N-моду, а более высокая частота LCO не приводит к переходу, что согласуется с экспериментом [9], а также с результатами моделирования для ТУМАН-3М [5, 6].

Применение единой физической модели к различным установкам и сценариям дает результаты, хорошо согласующиеся с экспериментом, тем самым подчеркивая роль переменного электрического поля как возможного триггера L-N перехода при соблюдении условий существования N-моды.

Обеспечение работы стандартных диагностик токамака ТУМАН-3М осуществляется при поддержке гос. контракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0040-2019-0023. Эксперименты на токамаке ТУМАН-3М были осуществлены при поддержке гос. контракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0034-2021-0001. Исследования радиального электрического поля на токамаке ТУМАН-3М обеспечиваются РНФ (проект 22-12-00062). Моделирование сценариев токамака

Глобус-М обеспечивается Министерством образования и науки (соглашение 075-15-2023-380).

### **Литература**

- [1]. S-I. Itoh and K. Itoh, Phys. Rev. Lett. 60 2276 (1988)
- [2]. P. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh, and T. S. Hahm, Plasma Phys. Control Fusion 47, R35 (2005)
- [3]. L.G. Askinazi et al 2012 Tech. Phys. Lett. 38 6
- [4]. V.V. Bulanin et al 2016 Plasma Phys. Control. Fusion 58 045006
- [5]. L.G. Askinazi et al, Plasma Phys. Control. Fusion 59 014037 (2017)
- [6]. A.A. Belokurov et al, Phys. Scr. 95 115604 (2020)
- [7]. A.D. Gurchenko et al, Plasma Phys. Control. Fusion 55 085017 (2013)
- [8]. V.V. Bulanin et al, Nucl. Fusion 56 016017 (2016)
- [9]. A.Yu. Yashin et al, Nucl. Fusion 58 112009 (2018)
- [10]. F.L. Hinton and G.M. Staebler Physics of Fluids B 5 1281 (1993)
- [11]. M.A. Malkov and P.H. Diamond Phys. Plasmas 15 122301 (2008)



# ДИАГНОСТИКА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

Ермаков Н.В.<sup>1</sup>, Жильцов Н.С.<sup>1</sup>, Курские Г.С.<sup>1</sup>,  
Мухин Е.Е.<sup>1</sup>, Толстяков С.Ю.<sup>1</sup>, Ткаченко Е.Е.<sup>1</sup>, Бочаров И.В.<sup>1</sup>,  
Долгова К.В.<sup>2</sup>, Коваль А.Н.<sup>1</sup>, Николаенко К.О.<sup>1</sup>, Петров Ю.В.<sup>1</sup>,  
Рожанский В.А.<sup>2</sup>, Сахаров Н.В.<sup>1</sup>, Сениченков И.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>СПбГПУ им. Петра Великого, Санкт-Петербург

В докладе представлено описание диагностической системы дивертора открытого типа на сферическом токамаке Глобус-М2 [1] методом томсоновского рассеяния. Диагностика предназначена для локальных измерений электронной температуры  $T_e$  в диапазоне 1 – 100 эВ и плотности  $n_e$  в диапазоне от  $10^{17}$  -  $10^{20}$  м<sup>3</sup>. Измерения проводятся в окрестности X-точки преимущественно со стороны сильного магнитного поля, включая области «private flux region» и «core» плазмы. Смещение плазменного шнура в процессе разряда позволяет производить смещение X-точки по отношению к вертикальной хорде зондирования. Важность исследования этой области объясняется тем, что на пластины дивертора приходят большие плотности потоков частиц и энергии, которые направляются из «узкой» области вблизи сепаратрисы - обдирочного слоя (SOL). Основными задачами для диверторной диагностики ТР являются отработка механизмов управления режимами дивертора, отличающихся снижением взаимодействия плазмы со стенками, и оценка влияния примеси азота и других радиантов на режимы работы дивертора сферического токамака Глобус-М2. Результаты экспериментов по исследованию режимов работы дивертора Глобус-М2 планируется сопоставить с результатами моделирования кодом SOLPS-ITER [2][3]. Источником зондирующего излучения является лазер, разработанный при прототипировании аппаратуры диверторной диагностики

токамака ИТЭР [4]: Nd:YAG 1064 нм / 2 Дж / 100 Гц / 3 нс. В качестве регистрирующего прибора выступает полихроматор [5] с оптическими фильтрами, позволяющими измерять малые температуры электронов. Система сбора излучения состоит из вакуумной и вневакуумной частей. Рассеянное излучение собирается из 9 пространственных точек, вдоль хорды длиной 110 мм (Рис.1). Зондирование проходит в вертикальном направлении снизу вверх вдоль центрального столба на расстоянии  $R = 24$  см от оси токамака и попадает в лазерную ловушку, расположенную над выходным патрубком.

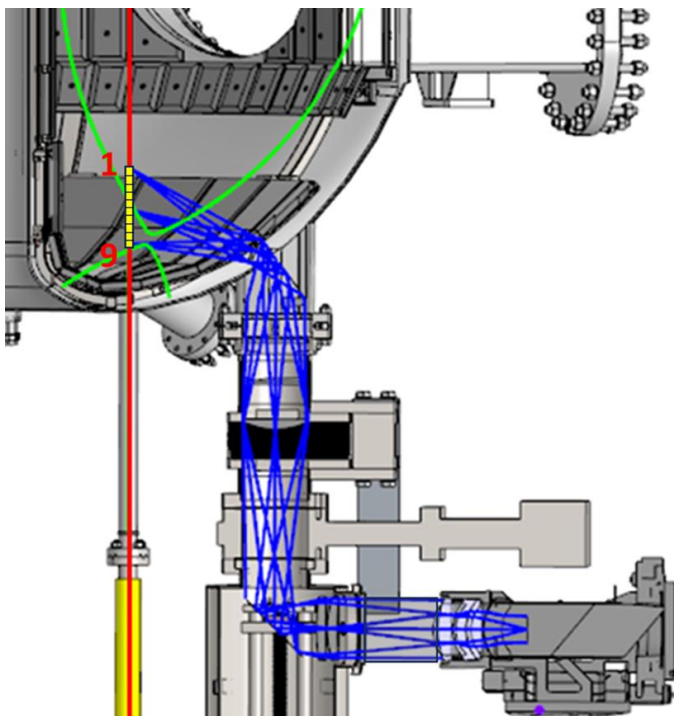


Рис.1 Схема проведения эксперимента. Красным отмечена хорда зондирования, синим – оптическая схема сбора излучения

Разработка диагностики томсоновского рассеяния дивертора токамака Глобус-М2 и проведение пилотных измерений электронной температуры выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-00033). Физическое

обоснование диагностического комплекса выполнено при поддержке госзадания РАН РФ 0034–2019–0001.

### **Литература**

- [1]. V.B. Minaev et al, 2017 Nucl. Fusion 57 066047 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa69e0>
- [2]. K. Dolgova, E. Vekshina, V. Rozhansky "Modeling of High Field Side High Density Regime in Globus-M2 Tokamak ". В редакции журнала Plasma Physics and Controlled Fusion.
- [3]. I.Yu. Senichenkov, E.G. Kaveeva, V.A. Rozhansky, N.V. Shtyrkhunov, S.P. Voskoboynikov, D.P. Coster. Contributions to Plasma Physics 2022, <https://doi.org/10.1002/ctpp.202100177>
- [4]. E E Mukhin et al // JINST 2012. (7) C02063. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/02/C02063>
- [5]. G.S. Kurskiev, A.I.P. Chernakov, V.A. Solovey et. al., Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 963 (2020) 163734 <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163734>

# МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ИЗЛУЧЕНИЯ НЕЙТРАЛЬНОГО ГЕЛИЯ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

Тимохин В. М., Ануфриев Е.А., Коробко Д. Д., Сергеев В. Ю.,  
Шаров И.А.

*Санкт-Петербургский политехнический университет имени  
Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия,  
[V.Timokhin@spbstu.ru](mailto:V.Timokhin@spbstu.ru)*

Спектроскопическая диагностика периферийной плазмы с инжекцией нейтрального гелия позволяет производить измерения распределений электронных температуры и концентрации в периферийных областях плазменного шнура по соотношениям интенсивности излучения спектральных линий нейтрального гелия (728 нм –  $1s3s(^1S)–1s2p(^1P^0)$ , 706 нм –  $1s3s(^3S)–1s2p(^3P^0)$  и 668 нм –  $1s3d(^1D)–1s2p(^1P^0)$ ) [1].

Диагностика предоставляет данные о параметрах плазмы, усреднённых вдоль хорд наблюдения; при этом размер светящейся области вдоль этих хорд определяется распределением нейтрального гелия, инжестируемого в плазму, свойствами оптической системы и параметрами плазмы в области излучения. Для правильной интерпретации результатов измерений диагностики необходим аккуратный учет и анализ вклада вышеперечисленных факторов, первые шаги к чему были сделаны в рамках построения модели излучения нейтрального гелия, описанной в данной работе.

Схема расчетов интенсивности  $I$  изображений излучения гелиевого облака с помощью 4-х канального фильтро-линзового изображающего полихроматора (ФЛИП4) [1] поясняется на рисунке. Трёхмерное распределение излучательной способности  $\varepsilon$  перечисленных выше линий нейтрального гелия

рассчитывалась с помощью простой стационарной столкновительно-излучательной модели, построенной по аналогии с описанной в работе [2] и дающей близкие результаты. Модель учитывает процессы ионизации электронным ударом, возбуждение/девозбуждение электронным ударом и спонтанные переходы 19 низших состояний нейтрального гелия, включая регистрируемые с помощью полихроматора:

$$\varepsilon(p \rightarrow q) = n_{He}(p)A(p \rightarrow q) \quad (1)$$

Здесь  $n_{He}(p)$  – населённость энергетического уровня  $p$ ,  $A(p \rightarrow q)$  – коэффициент Эйнштейна для соответствующего перехода.

Распределение концентрации нейтрального гелия  $n_{He}$  в инжектируемой струе рассчитывалось с помощью скейлинга, приведенного в [3]. Распределения  $n_e$ ,  $T_e$  в области свечения струи получались из моделирования разряда по коду SOLPS-ITER [4].

Интегральное излучение рассчитывалось внутри конуса наблюдения  $\psi$  для каждого пикселя матрицы камеры ФЛИП4. Численный расчет интегрального излучения  $I_{i,j}$  пикселя  $(i,j)$  сводится к интегрированию излучающей способности  $\varepsilon$  вдоль оси  $s$  конуса наблюдения:

$$I_{i,j} = \frac{\psi}{4\pi} \int_L \varepsilon(s) ds = \frac{\psi}{4\pi} \sum_l \Delta s_l \varepsilon_l \quad (2)$$

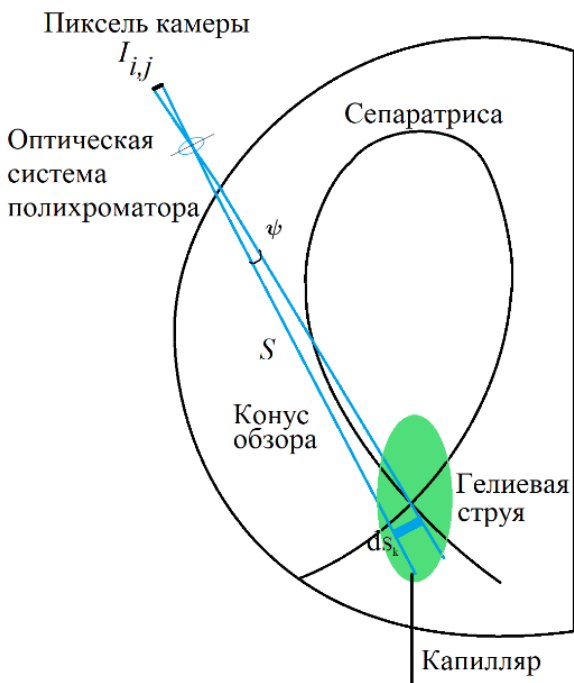
Здесь  $l$  – индекс элемента объема,  $L$  – длина хорды наблюдения,  $\Delta s$  – элемент длины вдоль конуса наблюдения.

В работе выполнен расчет геометрического фактора  $G$  – меры локальности излучения, определяющейся отношением измеренного и излученного количества фотонов из элемента объема вдоль хорды наблюдения [5]:

$$G = \frac{\int_L s^2 \varepsilon(s) ds}{L^2 \int_L \varepsilon(s) ds} \quad (3)$$

Поскольку область свечения гелия (несколько см) существенно меньше расстояния от нее до матрицы камеры ФЛИП4 (>1.5 м), фактор  $G$  согласно уравнению (3) не сильно отличается от 1 и

поэтому не включен в уравнение (2) для того, чтобы не усложнять процедуру реконструкции изображений струи.



В докладе приводится анализ рассчитанных распределений излучения гелиевой струи, а также их сравнение с экспериментальными данными. Обсуждаются дальнейшие направления развития модели и планы экспериментов.

Работа поддержана Министерством науки и высшего

образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту №0784-2020-0020 с использованием оборудования Федерального центра коллективного пользования "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" ФТИ им. А.Ф. Иоффе, включающего Уникальную научную установку "Сферический токамак Глобус-М".

### Литература

- [1]. Тимохин В. М. и др., Письма в ЖЭТФ, 116:5 (2022), 292–299
- [2]. Zholobenko W. et al., Nucl. Fusion 58 126006 (2018)

- [3]. Дулов В. Г., Лукьянов Г. А. Газодинамика процессов истечения. Новосибирск: Наука, формула (4.18), стр. 81 (1984).
- [4]. Rozhansky V. A. et al., Nucl. Fusion 41, 387 (2001)
- [5]. Frerichs H. et al., Nucl. Fusion 57, 126022 (2017)

# СТАТУС ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Н.С. Жильцов<sup>1</sup> [nisovru@gmail.com](mailto:nisovru@gmail.com), Г.С. Курскиев<sup>1</sup>,  
В.А. Соловей<sup>2</sup>, Н.Н. Бахарев<sup>1</sup>, В.И. Варфоломеев<sup>1</sup>, А.В. Воронин<sup>1</sup>,  
В.Ю. Горяинов<sup>1</sup>, В.К. Гусев<sup>1</sup>, А.А. Кавин<sup>3</sup>, Е.О. Киселёв<sup>1</sup>,  
В.Б. Минаев<sup>1</sup>, А.Б. Минеев<sup>3</sup>, И.В. Мирошников<sup>1</sup>, Е.Е. Мухин<sup>1</sup>,  
А.Н. Новохацкий<sup>1</sup>, Ю.В. Петров<sup>1</sup>, А.М. Пономаренко<sup>4</sup>,  
Н.В. Сахаров<sup>1</sup>, О.М. Скрекель<sup>1</sup>, В.В. Солоха<sup>1</sup>, А.Ю. Тельнова<sup>1</sup>,  
Е.Е. Ткаченко<sup>1</sup>, В.А. Токарев<sup>1</sup>, С.Ю. Толстяков<sup>1</sup>, Е.А. Тюхменева<sup>1</sup>,  
Н.А. Хромов<sup>1</sup>, К.Д. Шулятьев<sup>1</sup>, П.Б. Щёголев<sup>1</sup>, А.Ю. Яшин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия, [post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)

<sup>2</sup>НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ, Ленинградская обл.,  
Гатчина, Россия, [dir@npni.nrcki.ru](mailto:dir@npni.nrcki.ru)

<sup>3</sup>АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия, [mail@niiefa.spb.su](mailto:mail@niiefa.spb.su)

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого, Санкт-Петербург, Россия, [office@spbstu.ru](mailto:office@spbstu.ru)

Сферический токамак Глобус-М2 оснащён передовым комплексом диагностики плазмы методом томсоновского рассеяния (ТР) лазерного излучения [1]. Зондирующий лазер 1064 нм/330 Гц/3 Дж/10 нс, 11-ть фильтровых полихроматоров с 4-мя внешними оцифровщиками CAEN V1743 и 2-а фильтровых полихроматора с внутренними оцифровщиками [2] разрабатывались в рамках макетирования диагностического оборудования ТР проекта ИТЭР. Обработка данных диагностики ТР реализована в режиме реального времени с задержкой менее 2,4 мс при выводе в систему управления токамака. Достигнутое быстродействие удовлетворяет требованиям к диагностикам ТР ИТЭР [3]. Малая задержка при обработке данных позволяет использовать ТР для управления плазмой даже компактного токамака с относительно быстрыми процессами в плазме. В докладе представлена работа простой цепи обратной связи на основе данных ТР для стабилизации концентрации в разряде токамака Глобус-М2 [4].

На основе экспериментов на Глобус-М2 приводятся примеры применения диагностики ТР для анализа различных процессов в



плазме токамака. Диагностика ТР предоставляет достоверную информацию о динамике пространственного распределения температуры и концентрации электронов в плазме токамака. Область измерения хорошо локализована: пространственное разрешение составляет 4 мм по вертикали и 10-20 мм по большому радиусу. Экваториальная геометрия зондирования обеспечивает измерения в 10-ти пространственных точках на стороне слабого поля и 2-х – на градиенте со стороны сильного поля. Это позволяет по профилю давления электронов определять положения магнитной оси и последней замкнутой магнитной поверхности. Высокое временное разрешение диагностики ТР  $\sim 10$  нс позволяет считать измерения мгновенными в сравнении с магнитно-гидродинамическими процессами в плазме. Таким образом возможна локализация неустойчивостей плазмы, исследование динамики краевых неустойчивостей (ELM), изучение внутренних перезамыканий (IRE) и тепловых срывов плазмы. Измеренное диагностикой ТР значение радиуса инверсии пилообразных колебаний совпадает с положением поверхности  $q=1$ , рассчитанным кодом ASTRA. Разработан алгоритм, проецирующий локальные измерения диагностики ТР вдоль поверхностей равного полоидального магнитного потока. Таким образом по данным диагностики ТР определяется линейная концентрация электронов. Для неё показано хорошее соответствие с независимыми интерферометрическими измерениями вдоль вертикальной  $R=42$  см и экваториальной хорд [5]. Высокая чувствительность разработанных полихроматоров позволяет проводить измерения в области обдирочного слоя на глубине более 3 см снаружи от последней замкнутой магнитной поверхности. Для более детального исследования краевой области пространственное разрешение диагностики ТР для периферийных точек улучшено в два раза. Это позволяет изучать динамику процессов в краевой плазме, включая формирование пьедестала при переходе в режим улучшенного удержания (H-mode).

Диагностика ТР работает в мониторинговом режиме, играя важную роль в научной программе сферического токамака Глобус-М2. В частности, в исследовании эффективности нагрева плазмы при инъекции нейтрального пучка (NBI) [6]. Проведено сравнение профилей температуры и концентрации электронов для разрядов без

дополнительного нагрева и при работе NBI с энергией до 45 кэВ в диапазоне средних концентраций  $(1-16) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

Эксперименты выполнены на УНУ «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях». Подготовка оборудования частично финансировалась в рамках макетирования диагностики ТР дивертора ИТЭР: контракт Росатома № Н.4а.241.19.22. Эксперименты с омическим нагревом плазмы проведены в рамках государственного задания (тема 0040-2019-0023). Эксперименты с дополнительным нагревом проведены в рамках государственного задания (тема 0034-2021-0001).

### Литература

- [1]. Курские Г. С. и др., “Измерение температуры электронов плазмы токамака Глобус-М2 методом мультилазерного томсоновского рассеяния”, Письма в ЖТФ, 47:24 (2021), 41–45
- [2]. G.S. Kurskiev et.al., Digital filter polychromator for Thomson scattering applications, NIMA, 963 (2020)
- [3]. ITER Project, ITER System Requirements Documents for diagnostics
- [4]. Жильцов Н.С. и др., Диагностика плазмы токамака Глобус-М2 методом томсоновского рассеяния в режиме реального времени, Письма в ЖТФ, (2023), том 49, вып. 16
- [5]. Иваненко С.В. и др., Дисперсионный интерферометр для токамака Глобус-М2, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, (2023), т. 46, вып. 1, 86—94
- [6]. Курские Г.С. и др., Режим с горячими ионами в сферическом токамаке Глобус-М2, физика плазмы, (2023), том 49, № 4, с. 305–321

# ПОЛОИДАЛЬНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ТОРОИДАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МЕТОДОМ CXRS И ВОЗМОЖНЫЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ МЕХАНИЗМ НЕОДНОРОДНОСТИ

Романников А.Н.

*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, РФ, [romannikov@tiniti.ru](mailto:romannikov@tiniti.ru)*

На токамаке Торе-Супра с параметрами: ток 1 МА,  $R_0=240$  см,  $r_0=72$  см,  $\bar{n} \approx 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , были проведены измерения скорости тороидального вращения ионов углерода  $C^{+6}$  на магнитной поверхности радиуса 10 см со стороны слабого и сильного поля [1]. Был применен метод спектроскопии перезаряженных ионов на диагностическом пучке (CXRS). Разность скорости тороидального вращения на внешнем и на внутреннем обходе тора должна была составлять примерно минус 1.5 км/с в случае вращения плазмы как твердого тела при скорости вращения плазмы для данных омических разрядов минус 20-25 км/с (против тока плазмы). Этот результат соответствует традиционному подходу формирования тороидального вращения в токамаке. Измеренная же разность скоростей оказалась близкой к 3 км/с и знак разности был положительным.

Эксперименты, проведенные на токамаках ASDEX и TCV с измерением профиля тороидального вращения методом CXRS при спонтанном изменении направления скорости вращения, показали значительную асимметрию профилей вращения при положительном и отрицательном знаках [2]. Стандартный подход не позволяет объяснить подобное поведение вращения.

В работе представлен релятивистский механизм, который может создавать неравномерность радиального электрического поля со стороны внутреннего обхода и внешнего обхода тора токамака [3]. Этот механизм связан со значительной токовой скоростью электронов в плазме для многих экспериментальных режимов работы токамака. Важно, что электрические поля возникают без разделения зарядов в плазме. Традиционный подход к определению

радиальных электрических полей в плазме токамака дает однородное радиальное электрическое поле на магнитных поверхностях внутри плазмы, в то время как вне плазмы радиальных электрических полей нет. Представленный механизм приводит к появлению электрического поля вне плазмы с током, а внутри плазмы возникает неравномерность радиального электрического поля на магнитных поверхностях. При этом со стороны внешнего обхода тора появляется положительная добавка к  $E_r(r)$ , а со стороны внутреннего обхода отрицательная добавка. Эти добавки пропорциональны квадрату тока, протекающего по плазме. При этом, по абсолютной величине добавки близки друг другу, что не удивительно в рамках выполнения теоремы Гаусса.

Предложенный механизм может объяснить, как экспериментально измеренную неравномерность скоростей тороидального вращения ионов углерода  $C^{+6}$  в плазме токамака Tore-Supra [1], так и эксперименты по измерению профилей тороидального вращения методом CXRS, проведенные на токамаках ASDEX и TCV при спонтанном изменении направления скорости вращения [2].

### Литература

- [1]. Romannikov A., Fenzi-Bonizec C. /A poloidal non-uniformity of the collisionless parallel current in a tokamak plasma // Abstracts of 9th Easter Plasma Meeting on Stability and Confinement of Magnetized Plasma. Turin. Italy. 29.03-01.04. 2005.
- [2]. Y. Camenen<sup>1</sup>, C. Angioni, A. Bortolon, B.P. Duval, E. Fable, W.A. Hornsby, R.M. McDermott, D.H. Na, Y-S. Na, A.G. Peeters and J.E. Rice /Experimental observations and modelling of intrinsic rotation reversals in tokamaks// December 2016 Plasma Physics and Controlled Fusion 59(3) DOI:10.1088/1361-6587/aa543a
- [3]. A. N. Romannikov, P. P. Khvostenko/ Relativistic poloidal non-uniformity of the radial electric field in tokamak plasmas//arXiv:2302.06215

# ЛАЗЕРНАЯ ГЕТЕРОДИННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ В ДИАГНОСТИКЕ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ

Губский К.Л.<sup>1,2</sup>, Белов А.С.<sup>1</sup>, Лукьянов К.С.<sup>1</sup>, Колесников Н.М.<sup>1</sup>,  
Кузнецов А.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ», Москва, Россия, [klgubskij@mephi.ru](mailto:klgubskij@mephi.ru)*

<sup>2</sup> *ООО «Лазер Ай», Москва, Россия, [lasereye@ldlab.ru](mailto:lasereye@ldlab.ru)*

Электронная плотность является одним из основных параметров, используемых для контроля режимов работы токамаков и плазменных ускорителей. Одним из самых точных методов измерения электронной плотности импульсной плазмы является гетеродинная интерферометрия. За счёт прецизионных фазометров и многоканальности удается полноценно описать процессы, проходящие в плазме с высоким пространственным и временным разрешением.

В докладе представлены результаты разработки и испытаний гетеродинных интерферометров, используемых на коаксиальном плазменном ускорителе [1] и на малом сферическом токамаке «МИФИСТ-0» [2]. Частотное смещение в интерферометрах обеспечивается акустооптическим модулятором. Интерферометры смонтированы на рамах из немагнитных материалов и виброразвязаны от несущих конструкций плазменных установок.

На ускорителе реализована многоканальная оптоволоконная схема на длине волны 1,55 мкм, позволяющая измерять распределение плотности и скорость пучка плазмы. Особые усилия были направлены на устранение вибрационных помех от срабатывания газового клапана и разрядников.

Для токамака разработан двухволновый гетеродинный интерферометр на свободном луче. Интерферометр работает на длинах волн 10,6 мкм и 532 нм, длина диагностической хорды составляет ~ 45 см. При этом на длине волны излучения 10,6 мкм

фазовый сдвиг, вносимый плазмой плотностью  $10^{19} \text{ м}^{-3}$ , составляет  $\sim 0,12$  радиан. Разрешение измерительной системы составляет  $7 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} / \sqrt{\text{Гц}}$ , что при полосе 1 МГц соответствует точности в измерении линейной электронной плотности  $7 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$ .

Опыт работы с данными интерферометрами планируется использовать в создании многоканальной измерительной системы на токамаке Т-15МД.

### Литература

- [1]. Лукьянов К.С., Губский К.Л., Ястребцев А.А., Тищенко И.Ю., Казиева Т.В. Волоконный многоканальный гетеродинный интерферометр для исследования свойств импульсной плазмы // Письма в ЖТФ, 2023, том 49, вып. 1, стр. 17-19.
- [2]. Krat S. et al. MEFPhIST-0 Tokamak for Education and Research // Fusion Science and Technology, 2023, Vol. 0, № 0. P. 1–19.

# СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛАЗМЫ В ДИВЕРТОРЕ Т-15МД – ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ

Вуколов К.Ю.<sup>1,2,3</sup>, Андреев Е.Н.<sup>1</sup>, Орловский И.И.<sup>1</sup>,  
Толпегина Ю.И.<sup>1</sup>, Федоров Д.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия,

[Vukolov\\_KY@nrcki.ru](mailto:Vukolov_KY@nrcki.ru)

<sup>2</sup>Координационный Центр "УТС-Центр", Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский Государственный Технический Университет им.  
Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Изучение диверторной плазмы является одной из основных задач экспериментальной программы на токамаке Т-15МД. Для ее решения необходимо подготовить инженерно-технические системы установки для получения устойчивого диверторного режима и обеспечить контроль параметров плазмы, что потребует разработки и создания диагностического комплекса. Его основными задачами являются измерения концентрации и температуры плазмы, концентрации примесей и атомов водорода во всем диверторном объеме, контроль перехода в режим отрыва плазмы от диверторной пластины, положения ионизационного фронта в ногах дивертора, а также перехода из L в H моду. Кроме этого, требуется вести мониторинг давления газовой среды, эрозии и температуры диверторных пластин. Диагностический комплекс должен обеспечивать измерение указанных выше параметров с хорошим пространственным и временным разрешением во всей диверторной зоне с момента формирования диверторной конфигурации (появление X-точки и сепаратрисы) и до конца разряда. Реализация указанных выше задач диагностики диверторной плазмы может быть в значительной степени осуществлена такими спектральными методами как томсосновское рассеяние, метод теплового гелиевого пучка, пассивная спектроскопия с помощью двух ракурсов наблюдения для томографии диверторной зоны и др.

Инженерный анализ геометрии диверторной зоны Т-15МД показывает, что проведение указанных выше измерений затруднительно осуществить без использования внутрикамерной оптики и реализации тангенциальных хорд наблюдения. В частности, для томсоновского рассеяния луч лазера на практике нельзя направить вдоль ног дивертора с использованием только атмосферной оптики. Для реализации измерений в диверторной зоне существует и ряд общих проблем. К основным из них относятся: 1) проблема первого зеркала, 2) подвижки камеры относительно фундамента здания и вибрация установки, 3) наличие магнитных полей рассеяния, 4) нагрев внутрикамерных элементов и др. Для осуществления возможности применения внутрикамерной оптики (линзы, зеркала, оптоволокно и др.) на первый план выходит проблема первого зеркала, а именно запыление оптики продуктами эрозии графитовой стенки и дивертора.

В докладе предложены и проанализированы подходы к решению проблемы первого зеркала с целью построения надежного диагностического комплекса для контроля диверторной плазмы токамака Т-15МД. Анализируются инженерно-физические проблемы, вытекающие из задач, стоящих перед диагностикой плазмы в диверторе, включая организацию сбора излучения. Предлагаются варианты реализации построения систем наблюдения и конструкция оптической системы наблюдения для спектроскопии плазмы на Т-15МД. Рассмотрены возможности организации тангенциального обзора объема дивертора из соседних диверторных патрубков с использованием внутрикамерных оптических элементов.



# ОБРАБОТКА ДАННЫХ ТОМСОНОВСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА СКОРОСТИ ОТКЛИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ НА ВКЛЮЧЕНИЕ МОЩНОГО ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА В ТОКАМАКАХ

Кукушкин А.Б.<sup>1,2</sup>, Сдвиженский П.А.<sup>1</sup>, Соколов А.В.<sup>3</sup>,  
Волошинов В.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия,  
[Sdvizgenskii\\_PA@nrcki.ru](mailto:Sdvizgenskii_PA@nrcki.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН,  
Москва, Россия

Статистический анализ [1] подобия профилей параметров плазмы (температуры  $T_e$ , плотности  $n_e$  и давления  $p_e$  электронов) на квазистационарной стадии тока плазмы (т.н. стадия flat-top – плато полного тороидального электрического тока в плазме) примерно в 9000 разрядов на токамаке JET, что охватывает практически всю базу данных успешных разрядов на установке JET со стенкой, как в ИТЭР (JET-ILW), показал высокую степень самоорганизации плазмы в токамаках и подтвердил на примере данных токамака JET гипотезу [2] (и ее проверку в [3, 4]) о существовании универсальных профилей параметров плазмы, характеризующих относительную форму пространственных профилей и полученных путем нормировки профилей на их характерные значения, а именно, значения в центре плазменного шнура или среднего значения по большей части объема плазмы (об обосновании и развитии гипотезы [2] см. [5, 6]). Результаты анализа [1] основаны на базе данных томсоновской диагностики высокого разрешения (high-resolution Thomson scattering, HRTS) с использованием улучшенного описания равновесия плазмы с помощью кода EFIT++ (т.н. код EFTR [7]), так как равновесие плазмы необходимо для построения зависимости данных измерений от магнитной поверхности, координата которой

описывается переменным нормированным малым радиусом в осесимметричной тороидальной плазме.

В [1] получено, что справедливость гипотезы [2] распространяется даже на случай включения сильного дополнительного нагрева во время квазистационарной стадии разряда (плато тока, flat-top). Дополнительный нагрев с мощностью  $P_{\text{aux}} \geq 1$  МВт или 10 МВт присутствовал соответственно на 44% и 21% от общей продолжительности стадии flat-top всех изученных в [1] разрядов. Было показано, что сильные, до 100% по амплитуде, скачки  $T_e$ , вызванные включением дополнительного нагрева плазмы на стадии плато тока, могут быть описаны скачками усредненной по пространственной переменной температуры, если для описания стационарной формы (но не абсолютных значений) пространственного профиля температуры используются найденные в [1] универсальные профили. Одним из возможных механизмов сохранения формы профиля температуры даже в переходной стадии разряда (при включении мощного дополнительного нагрева) может являться быстрый нелокальный перенос тепла (БНПТ). Поскольку явления БНПТ проявляются в мгновенном (в масштабе времени обычной, т.е. броуновской диффузии тепла, описываемой уравнением теплопроводности) отклике пространственного профиля электронной температуры на ее локальное возмущение, в качестве одного из основных параметров, позволяющих идентифицировать возможную нелокальность переноса тепла, можно рассматривать время отклика температуры электронов на включение и выключение мощного дополнительного нагрева

В настоящей работе более детально проанализирована динамика поведения  $T_e$  при включении мощного дополнительного нагрева в нескольких разрядах JET, каждый из которых характеризуется большой (более 50 МВт/с) скоростью включения дополнительного нагрева. Для рассмотренных разрядов были выполнены расчеты корреляции динамики температуры и мощности дополнительного нагрева, приведены оценки характерного времени отклика пространственного профиля температуры на быстрое включение дополнительного нагрева. Полученные результаты показывают, что это время составляет величину порядка 0,1 секунды.

В расчетах использованы данные о  $T_e$  из базы данных HRTS, для их обработки применялась технология сбалансированной идентификации SvF [8]. В основе технологии SvF лежит поиск компромисса между сложностью математической модели (из заданного параметрического семейства моделей) и точностью ее соответствия экспериментальным данным. При этом используется формализация понятия сложности модели, а оценка близости к измерениям основывается на минимизации погрешности моделирования измерений.

Полученные результаты и дальнейший анализ, включающий селекцию разрядов и их отдельных временных интервалов с максимальной скоростью включения дополнительного нагрева и проведение аналогичных выполненным в данной работе расчетов на большом массиве экспериментальных данных, позволят провести сравнение с предсказаниями существующих теоретических транспортных моделей для быстрого нелокального переноса тепла.

Часть работы, связанная с расчетами с помощью технологии SvF, выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00317, <https://rscf.ru/project/22-11-00317/>

## Литература

- [1]. A.B. Kukushkin, P.A. Sdvizhenskii, J. Flanagan, D. Kos, V.S. Neverov, G. Szepesi, D.M.A. Taylor, and JET Contributors Plasma Phys. Control. Fusion, 2023, 65 075009 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6587/acd71e>)
- [2]. Coppi B. Comments Plasma Phys. Control. Fusion, 1980 5 261–70.
- [3]. Esiptchuk Yu.V. Razumova K.A. 1986 Plasma Phys. Control. Fusion 28 1253.
- [4]. Razumova K.A., et al 2008 Plasma Phys. Control. Fusion 50 105004 (13pp).
- [5]. Dnestrovskij Yu.N., et al 2005 Plasma Phys. Rep. 31 529.
- [6]. Dnestrovskij Yu.N. Self-Organization of Hot Plasmas. The Canonical Profile Transport Model. Springer, 2015.
- [7]. Szepesi G., et al. 2021 47th EPS Conference on Plasma Physics, P3.1037.
- [8]. Sokolov A. V., Voloshinov V. V. Open Computer Science, 2020, 10 — p. 283–295. <https://doi.org/10.1515/comp-2020-0116>

# ЛАЗЕРНО-АССИСТИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В СТЕНКАХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

Гаспарян Ю.М.<sup>1</sup>, Гришаев М.В.<sup>1</sup>, Дегтяренко Н.Н.<sup>1</sup>,  
Ефимов В.С.<sup>1</sup>, Ефимов Н.Е.<sup>1</sup>, Крат С.А.<sup>1</sup>, Кулагин В.В.<sup>1</sup>,  
Маренков Е.Д.<sup>1</sup>, Синельников Д.Н.<sup>1</sup>, Степаненко А.А.<sup>1</sup>,  
Раздобарин А.Г.<sup>2</sup>, Дмитриев А.Д.<sup>2</sup>, Елец Д.И.<sup>1,2</sup>, Медведев О.С.<sup>1,2</sup>,  
Минаев В.Б.<sup>2</sup>, Новохацкий А.Н.<sup>2</sup>, Петров Ю.В.<sup>2</sup>, Сахаров Н.В.<sup>2</sup>,  
Филиппов С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ», Москва, Россия, [YMGasparyan@mephi.ru](mailto:YMGasparyan@mephi.ru)*

<sup>2</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-  
Петербург, Россия, [post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)*

Лазерно-ассистированные методы широко используются для определения состава поверхности материалов в различных приложениях. В условиях токамака эти методы могут быть использованы для дистанционного мониторинга состава поверхностного слоя с пространственным разрешением [1], что позволяет производить принципиально новые исследования по изучению влияния на параметры разряда состояния поверхности обращенных к плазме элементов. Можно также контролировать содержание изотопов водорода в переосажденных слоях, в которых может удерживаться значительная доля частиц рабочего газа, что важно с точки зрения безопасности при работе с тритием.

Для анализа состава поверхности используют либо спектроскопические методы, в которых анализируется свечение вышедших с поверхности частиц в образованном в ходе лазерного воздействия плазменном факеле (ЛИЭС) или в фоновом стационарном плазменном разряде (ЛИАС, ЛИДС), либо масс-спектрометрические методы, где анализируется

увеличение парциальных давлений газообразующих элементов в вакуумном объеме при десорбции или абляции из поверхностного слоя (ЛИД, ЛИА-МС) [2].

В работе были проведены теоретические и экспериментальные исследования по изучению выхода захваченных частиц из насыщенных дейтерием материалов под действием лазерного излучения с различной длительностью импульса (от пикосекунд до миллисекунд). Продемонстрирована высокая чувствительность методов, как в режиме десорбции, так и в режиме абляции.

В режиме десорбции не происходит повреждения поверхности, глубина анализа может варьироваться от десятков нанометров до десятков микрон в зависимости от длительности лазерного импульса. Получены оценки погрешности определения концентрации изотопов водорода в поверхностном слое при наличии неопределенности в теплофизических свойствах материала и концентрации ловушек для водорода. Экспериментально продемонстрированы возможности контроля содержания изотопов водорода в поверхностном слое, а также активное замещение изотопов водорода на поверхности и снижение интегрального количества дейтерия в вольфрамовых пленках при взаимодействии с парами воды в результате контакта с атмосферой или выдержки в формакууме.

С увеличением плотности энергии в лазерном импульсе наблюдается монотонный рост интегрального выхода захваченного дейтерия и постепенный переход в режим абляции. В данном случае возможно совмещение масс-спектрометрии и оптических методов, что позволяет проводить одновременное определение содержания изотопов водорода и элементного состава поверхностного слоя. Проанализирована зависимость глубины кратеров от плотности энергии, а также сравнение количественных результатов измерений с данными термодесорбционной спектроскопии для исследуемых материалов.

Проведены первые успешные испытания масс-спектрометрических измерений в условиях токамака Глобус-М2

при использовании лазерного излучения с наносекундной длительностью импульса. Реализована система сканирования лазерного луча по поверхности тайлов, продемонстрирована высокая чувствительность измерений. В рамках ближайших экспериментальных кампаний планируется более детальное изучение возможностей методики.

### **Литература**

- [1]. E.E. Mukhin, P. Andrew, A.D. Anthoine, et al. In situ monitoring hydrogen isotope retention in ITER first wall, Nucl. Fusion. 56 (2016), 036017.
- [2]. А. Г. Раздобарин, Ю. М. Гаспарян, Д. Л. Богачев и др. Комплекс диагностик первой стенки и дивертора токамака с реакторными технологиями: контроль эрозии, температуры и мониторинг накопления термоядерного топлива. Физика плазмы, 2022, том 48, № 12, с. 1216–1232.

# ПРИМЕНЕНИЕ ГЕЛИЕВОГО ТЕРМОМЕТРА В КАЧЕСТВЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РАБОЧЕГО ГАЗА В МАКЕТЕ БПРД

Шуровский Д.О., Лисица В.С., Нагель Н.Н., Хуснутдинов Р.И.,  
Брагин Е.Ю.

<sup>1</sup>НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия,  
[Nagel\\_NN@nrcki.ru](mailto:Nagel_NN@nrcki.ru)

В настоящее время безэлектродные плазменные ракетные двигатели являются наиболее перспективными. Такие двигатели обладают высокими показателями тяги, удельного импульса, плотности мощности и ресурса, что выгодно выделяет их относительно других электрических двигателей.

Геликонные двигатели являются одной из разновидностей БПРД и в настоящее время активно исследуются [1]. Геликонный двигатель представляет собой геликонный источник плазмы, в котором в магнитном поле плазма создается с помощью радиочастотного излучения.

Основой макета БПРД – установки ПН-3 служит вакуумная разрядная камера, представляющая собой кварцевую трубу, к одному из концов которой присоединен газовый объем. В этот объем осуществляется напуск рабочего газа (аргона). Задача определения основных характеристик создаваемого плазменного потока, является необходимой и актуальной. Основная часть диагностик установки ПН-3 сосредоточена на входе в откачном объеме (имитаторе космического пространства), что дает необходимое, но недостаточное описание создаваемого плазменного потока.

Оптическая эмиссионная спектроскопия установки ПН-3 (спектрометра Avaspec-mini и монохроматора/спектрографа М-522 является пассивной оптической диагностикой, что позволяет исследовать параметры потока в кварцевой трубе под геликонной и ИЦР антеннами. Для определения плазменных характеристик

оптическим методом наиболее важным вопросом является выбор атомной системы.

Наиболее удобными для измерения электронной температуры атомными системами являются нейтральный гелий и гелиеподобные ионы. Это связано со значительным различием формы функций возбуждения для синглетных и триплетных уровней. Возбуждение триплетного состояния происходит с переориентацией спина, и функция возбуждения в этом случае носит резонансный характер, в то время как уменьшение вероятности возбуждения синглетных уровней с возрастанием энергии происходит более плавно. Усредняя функцию возбуждения по максвелловскому распределению и подставляя результат в (1) можно определить электронную температуру по измеренным значениям отношения интенсивностей [2].

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\nu_1 \cdot \langle \sigma_1 \cdot \nu \rangle_1 \cdot A_1 \cdot \sum A_k^{(2)}}{\nu_2 \cdot \langle \sigma_1 \cdot \nu \rangle_2 \cdot A_2 \cdot \sum A_k^{(1)}}$$

( $\nu_1, \nu_2$  – частота перехода,  $\langle \sigma_1 \cdot \nu \rangle_1, \langle \sigma_1 \cdot \nu \rangle_2$  – усредненные по максвелловскому распределению эффективные сечения возбуждения,  $A_1, A_2, A_k$  – вероятности переходов). Такой метод используется в [3] и в экспериментах с условиями, близкими к условиям экспериментов на установке ПН-3 [4]. Результаты работы [5] подтверждают отсутствия влияния ударов второго рода, при которых для каждого акта возбуждения электронным ударом следует девозбуждение с испусканием кванта.

Для определения  $T_e$  в поток аргоновой плазмы (расход аргона 174 мл/мин.) дополнительно подавался гелий (расход газа 20 мл/мин.) С помощью спектрометра Avaspec были определены интенсивности двух близко расположенных линий гелия 492,1 нм и 471,3 нм.

Для восстановления профиля светимости использован подход матриц переноса лучей [6], получена система линейных алгебраических уравнений, из которой определяется распределение коэффициентов интенсивности по радиусу кварцевой трубы через площадь секторов сечения плазменного шнура.



В соответствии с [7] по определенной зависимости относительной интенсивности линий 492,1 нм и 471,3 нм восстановлено радиальное распределение электронной температуры для плазмы макета безэлектродного плазменного ракетного двигателя - установки ПН-3. Полученные результаты для электронной температуры необходимы для дальнейшего решения задачи о получении радиальных профилей концентраций основных компонент рабочего газа БПРД –Ar I, Ar II и Ar III.

### Литература

- [1]. M.D. Carter, J.P. Squire, F.R. Chang Díaz, A.M.H. Corrigan, L.Dean, J.Farrias, M.Giambusso, G.McCaskill, T.Yao, “Physics Foundations and Testing of a VASIMR® Engine”, AIAA Propulsion and Energy Forum July 9-11, 2018, Cincinnati, Ohio 2018 Joint Propulsion Conference.
- [2]. И.М. Подгорный. Лекции по диагностике плазмы. М. Атомиздат, 1968.
- [3]. A.S. Chuvatin; S.A. Danko; B. Etlicher; M.V. Fedulov; V.O. Michensky; G.S. Volkov; V.I. Zaitsev; P. Zehnter. Spectroscopy of composite Z-pinch on ANGARA-5-1 installation Plasma Physics Reports. 1999. Т. 25. № 1. С. 34-40.
- [4]. Masahiro V.J. Phys. Japan, 18, 419 (1963).
- [5]. Шуровский Д.О., Д.С. Кутузов, Е.А. Бунин, А.Е. Сухов, Е.Ю. Брагин. Оптические методы диагностики для измерения параметров плазмы в геликонном разряде. ВАНТ. Термоядерный синтез. Т. 45. Вып. 5. Стр. 97-104.
- [6]. Э.И. Кузнецов, Д.А. Щеглов. Методы диагностики высокотемпературной плазмы. М.: Атомиздат, 1974.
- [7]. Thoneman P.S. In: Dickerman «Optical Spectrometric Measurements of High Temperature». Chicago, Un. Chicago Press, 1961, p. 56.

# ДОПЛЕРОВСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В ГЕЛИКОННОМ РАЗРЯДЕ

Шуровский Д.О.<sup>1</sup>, Кутузов Д.С.<sup>1</sup>, Нагель Н.Н.<sup>1</sup>, Бунин Е.А.<sup>1</sup>,  
Янченков С.В.<sup>1</sup>, Денисов А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*НИИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия,*  
[Shurovskiy@nrcki.ru](mailto:Shurovskiy@nrcki.ru)

В работе представлены результаты определения температуры иона гелия He II и атома водорода H I путем обработки измеренных профилей спектральных линий излучения указанных газов для двух плазменных установок с геликонными источниками плазмы. Установки ПН-3 [1] и ПС-1 объединяет общая конструкция: использование магнитных полей величиной до 0.2/0.5 Тл, двухступенчатый ввод ВЧ мощности в плазму на частотах 10/13.56 МГц для создания плазмы (геликонный разряд) и 1.7-2.0 МГц для нагрева на частотах ионного циклотронного резонанса (ИЦР).

Измерения проводились при помощи спектрографа-монокроматора SolarLS M-522. Использовалась решетка 2400 штр/мм, входная щель монокроматора работала при раскрытии от 10 до 50 мкм, что обуславливало аппаратную функцию прибора с шириной на полувысоте в диапазоне от 10 до 27 пм, в интересующих нас областях видимого спектра. Аппаратная функция монокроматора определялась по излучению линий металлов (Cu I и Ag I), а также гелий-неонового лазера для красной области спектра.

Для регистрации в работе были выбраны линии 468.57 нм для He II и линия H $\beta$  486.1 нм. Наблюдались зависимости температуры атомов и ионов от таких параметров как вводимая мощность дополнительного ИЦР нагрева и величина магнитного поля в области ИЦР антенны, с целью определения эффективности работы системы нагрева плазмы и подбора оптимальных параметров разряда.

Измеренные температуры [2] находятся в диапазоне от 0,5 до 3 эВ для He II и от 0,4 до 1 эВ для атома водорода H I. При моделировании спектров были учтены наборы переходов, составляющие видимый контур указанных линий [3].

### Литература

- [1]. Шуровский Д.О. и др., ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 2, стр. 97-104.
- [2]. Очкин В.Н., Спектроскопия низкотемпературной плазмы, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006, с. 472.
- [3]. National Institute Of Standards And Technology, Atomic Spectra Database, <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ СВЕТИМОСТИ ЛИНИЙ АТОМОВ И ИОНОВ ГЕЛИКОННОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ПРОТОТИПА БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ МАТРИЦ ПЕРЕНОСА ЛУЧЕЙ

Хуснутдинов Р.И.<sup>1,2</sup>, Шуровский Д.О.<sup>1</sup>, Нагель Н.Н.<sup>1</sup>,  
Жильцов В.А.<sup>1</sup>, Сухов А.Е.<sup>1</sup>, Бунин Е.А.<sup>1</sup>, Брагин Е.Ю.<sup>1</sup>,  
Левашова М.Г.<sup>1</sup>, Неверов В.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия,

[Khusnutdinov RI@nrcki.ru](mailto:Khusnutdinov_RI@nrcki.ru)

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

На установке ПН-3 была проведена серия экспериментов по исследованию зависимости параметров плазмы геликонного разряда от величины магнитной индукции и профиля магнитного поля [1]. Определение параметров плазмы геликонного разряда с использованием оптических диагностик актуально, так как данные диагностики являются бесконтактными и не подвержены влиянию мощных высокочастотных полей. В каждом разряде в сечении С (см. рис. 2 в [1]) на хорде наблюдения измерялся спектр излучения. После каждого идентичного разряда хорда сдвигалась перпендикулярно линии наблюдения. Таким образом, был получен набор данных для интенсивности излучения в различных спектральных линиях с пространственным разрешением вдоль радиуса в поперечном сечении установки.

Для решения обратной задачи был применен подход матриц переноса лучей [1]. Этот метод точнее часто используемого метода Пирса, включающего преобразование Абеля, так как он учитывает отражение и преломление света стенками кварцевой трубки. Матрица переноса лучей содержит коэффициенты трансформации светимости единичных источников света в сигнал на детекторе. Восстанавливался

радиальный профиль светимости в спектральных линиях излучения водорода, аргона и гелия. Задача решалась с регуляризацией, требующей гладкости профиля светимости. Для расчета матриц переноса лучей и решения обратной задачи использовалась библиотека для моделирования спектроскопических диагностик плазмы Cherab [1], основанная на библиотеке Raysect [1] для расчёта спектров излучения методом трассировки лучей.

Результат решения такой задачи в случае водорода показан на рисунке 1. На левом графике изображены восстановленные радиальные профили светимости водорода в линиях серии Бальмера. Цветами показаны разные спектральные линии. На правом – результат подгонки в ходе решения обратной задачи. Цвета аналогичны левому графику, крестиками обозначены экспериментальные данные, пунктирной линией – свертка матрицы переноса лучей с найденным профилем светимости.

Аналогичная задача решалась и для случая аргона (рис. 2). Были взяты 5 наиболее ярких линии в диапазоне спектрометра 350-500 нм.

Используя полученные профили светимости и коэффициенты эмиссии фотонов из баз атомных данных, возможно восстановить профили температуры электронов и излучающих атомов/ионов.

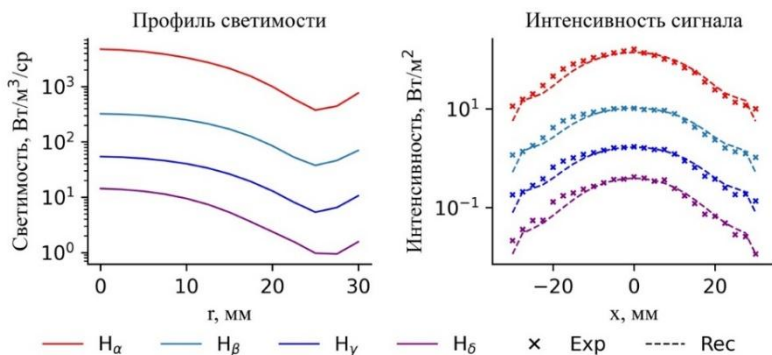


Рис. 1 – Результат реконструкции радиального профиля светимости для линий водорода (слева) и соответствующая подгонка измеряемой интенсивности излучения.

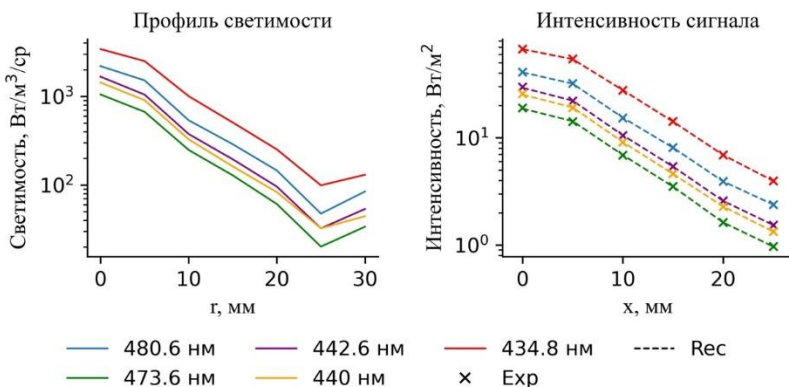


Рис. 2 – Результат реконструкции радиального профиля светимости для линий аргона (слева) и соответствующая подгонка измеряемой интенсивности излучения.

## Литература

- [1]. Д.О. Шуровский, Д.С. Кутузов, Е.А. Бунин, А.Е. Сухов, Е.Ю. Брагин, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 2, с. 97-104
- [2]. Kajita S., Veshchev E., Barnsley R. and Walsh M. 2016 Contrib. Plasma Phys. 56 (9), 837
- [3]. Polevoi A.R. et al 2018 Proc. 45th EPS Conf. on Plasma Phys. (Prague, Czech Republic, July 2–6 2018) P4.1009
- [4]. V.S. Neverov et al 2020 Plasma Phys. Control. Fusion 62 115014
- [5]. Carr M., Meakins A. et al 2018 Rev. Sci. Instrum. 89 083506, <http://cherab.info>
- [6]. Meakins A., Carr M. (2020, November 7). raysect/source: v0.7.0 Release (Version v0.7.0). Zenodo, <http://raysect.org>

# АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ SWIR КАМЕРЫ В ДИАГНОСТИКЕ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ТОКАМАКЕ Т-15МД

Панфилов Д.С.<sup>1,2</sup>, Асадулин Г.М.<sup>1</sup>, Горшков А.В.<sup>1</sup>, Бельбас И.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия,

[Panfilov\\_DS@nrcki.ru](mailto:Panfilov_DS@nrcki.ru)

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

В работе обсуждается использование SWIR камеры в качестве детектора рассеянного излучения в диагностике томсоновского рассеяния (ТР). Особенностью камеры является возможность работы в диапазоне длин волн 900-1700 нм, а в случае детектора VIS-SWIR 400-1600 нм, с высоким квантовым выходом ~80%. Данный тип детектора открывает возможность создания телевизионной системы ТР, которая будет работать в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. Это позволит сохранить высокое пространственное разрешение свойственное данному типу систем и при этом избавиться от влияния сильного фонового линейчатого излучения плазмы в видимой области. Существенным недостатком SWIR камер является отсутствие усиления сигнала и высокий уровень шума считывания (~30 фотоэлектронов в охлаждаемых камерах и ~50 в неохлаждаемых).

Для проведения оценок работоспособности SWIR камеры в качестве детектора рассеянного излучения предлагается использовать тангенциальную диагностику ТР на установке Т-15МД [1]. В схему измерений SWIR системы входит объектив, оптоволокно, спектрометр, построенный по схеме Черни-Тернера и камера. Анализ условий применимости SWIR камеры выполнен на основе синтетической диагностики. Согласно заданным значениям плотности  $n_e^{in}$  и температуры электронов  $T_e^{in}$  и характеристик диагностики рассчитывается спектр рассеяния и тормозное излучения плазмы.. Учитываются шум считывания и битность АЦП камеры. Спектр ТР получается при регистрации

двух кадров: первый, полезный - с сигналом рассеяния, тормозным излучением и шумом камеры; второй - фоновый без спектра ТР. Далее из полезного кадра вычитается фоновый. После вычитания сигнал суммируется в каналы по набору пикселей. По вертикали размер канала согласуется с размером оптоволоконной сборки, по горизонтали - с шириной входной щели спектрометра. Из полученных спектров определяется плотность  $n_e^{\text{out}}$  и температура  $T_e^{\text{out}}$  электронов. После многократного повторения процедуры генерации и обработки синтезированных экспериментальных данных определяется среднее значение  $n_{e\ m}^{\text{out}}$  и  $T_{e\ m}^{\text{out}}$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{n_e}$  и  $\sigma_{T_e}$ . Итоговая ошибка измерения оценивается как  $\sigma_{T_e} / T_{e\ m}^{\text{out}}$ .

В работе приведен анализ влияния параметров системы на ошибки измерений: уровня шума камеры, минимальной экспозиции, которая влияет на уровень регистрируемого тормозного излучения, ширины входной щели и энергии лазера. Показано, что для использования SWIR камеры в качестве детектора для измерений электронной температуры и плотности желательнее использовать многопроходную систему ввода-вывода лазерного излучения в плазму [2] и работать с менее шумными SWIR камерами.

## Литература

- [1]. Асадулин Г. М., Бельбас И. С., Горшков А. В. Тангенциальная система диагностики томсоновского рассеяния для токамака Т-15 //ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2016. – Т. 39. – №. 2.
- [2]. Asadulin G. M., Bel'bas I. S., Gorshkov A. V. Upgraded TV Thomson scattering system on the T-10 tokamak //Fusion Engineering and Design. – 2022. – Т. 177. – С. 113066.



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСЕННОЙ В ПЛАЗМЕ ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ КОДА РАВНОВЕСИЯ РЕТ, ДИАМАГНИТНЫХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Е.Е. Ткаченко<sup>1</sup> [erina.tkachenko@yandex.ru](mailto:erina.tkachenko@yandex.ru), Н.В. Сахаров<sup>1</sup>,  
Г.С. Курскиев<sup>1</sup>, А.А. Кавин<sup>3</sup>, Н.С. Жильцов<sup>1</sup>, И.В. Мирошников<sup>1</sup>,  
В.А. Соловей<sup>2</sup>, Н.Н. Бахарев<sup>1</sup>, Е.О. Киселёв<sup>1</sup>, В.Б. Минаев<sup>1</sup>,  
А.Б. Минеев<sup>3</sup>, А.Н. Новохацкий<sup>1</sup>, Ю.В. Петров<sup>1</sup>, В.В. Солоха<sup>1</sup>,  
А.Ю. Тельнова<sup>1</sup>, С.Ю. Толстяков<sup>1</sup>, Е.А. Тюхменева<sup>1</sup>,  
Н.А. Хромов<sup>1</sup>, П.Б. Щёголев<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,  
[post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)

<sup>2</sup>НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ, Ленинградская обл.,  
Гатчина, Россия, [dir@npri.nrcki.ru](mailto:dir@npri.nrcki.ru)

<sup>3</sup>АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия, [mail@niiefa.spb.su](mailto:mail@niiefa.spb.su)

Определение запасенной в плазме энергии  $W_p$  на токамаке Глобус-М2 проводится с помощью реконструкции равновесия кодом со свободной границей РЕТ [1, 2]. Код решает уравнение Грэда-Шафранова и дает возможность определять диамагнитный поток от плазмы. Задача равновесия плазмы решалась итеративным методом минимизации двух параметров – расстояния между реконструированной границей плазмы и смоделированной кодом РЕТ, а также разности диамагнитного потока от плазмы из РЕТ и экспериментального.

Измеренный диамагнитный поток использовался для определения  $\beta_{\text{dia}}$  [3] и последующего расчета запасенной в плазме энергии  $W_{\text{dia}}$  по приближенным формулам. Отличие  $W_p$  и  $W_{\text{dia}}$  в диапазоне от 6 до 16 кДж составило менее 10%.

Реконструкция крайней замкнутой магнитной поверхности плазмы осуществлялась с помощью метода токовых колец [4]. Данный метод моделирует ток плазмы набором из 19 токопроводящих колец. Входными данными являются магнитные потоки, измеренные 21 петлей, размещенной на стенке вакуумной камеры вблизи границы плазмы, ток плазмы, токи в катушках

полоидального магнитного поля и ток соленоида. Сигналы магнитных петель дополнительно используются для определения распределения токов по стенке вакуумной камеры.

Пространственное распределение полоидального магнитного потока, рассчитанное по коду РЕТ, используется для определения положения в потоковых координатах измерений локальных кинетических диагностик, в том числе диагностики томсоновского рассеяния лазерного излучения [5].

Измерения температуры и концентрации электронов диагностикой томсоновского рассеяния проводятся по 10-ти хордам со стороны слабого магнитного поля и по одной хорде со стороны сильного магнитного поля. Для зондирования плазмы используется инфракрасный лазер Nd:YAG с длиной волны 1064 нм и частотой повторения импульсов 330 Гц. Измерения со стороны сильного магнитного поля позволяют более точно описать форму профиля, а так же используются для верификации равновесия, найденного посредством кода РЕТ. Увеличение количества измерений со стороны сильного магнитного поля позволят уточнить форму профилей электронного компонента плазмы и изучить полоидальную симметрию профилей при большой скорости вращения плазмы и высокой концентрации электронов. Дополнительную информацию о виде профиля электронного давления со стороны сильного магнитного поля можно использовать для улучшения алгоритма реконструкции равновесия кодом РЕТ путем задания формы экспериментальных профилей в качестве аппроксимационных функций для зависимости производной по давлению от полоидального магнитного потока.

В докладе рассматривается развитие диагностики томсоновского рассеяния токамака Глобус-М2 с целью увеличения числа пространственных каналов со стороны сильного магнитного поля. Использование оптоволоконной сборки, разделенной на несколько областей, позволит увеличить пространственное разрешение диагностики без использования дополнительных спектрометров.

Работа выполнена на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях", в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф Иоффе (тема 0034-2021-0001). Подготовка диагностики

томсоновского рассеяния выполнена в рамках государственного задания (тема 0040-2019-0023).

### **Литература**

- [1]. S.A. Galkin, A.A. Ivanov, S.Yu. Medvedev and Yu.Yu. Poshekhonov, Nucl. Fusion, 37 (1997).
- [2]. Ткаченко Е.Е. и др., L Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 2023.
- [3]. L.L. Lao et al 1985 Nucl. Fusion 25 1421.
- [4]. V.I. Vasiliev, Yu.A. Kostsov, K.M. Lobanov et al, Nucl. Fusion 46, 625 (2006).
- [5]. Kurskiev G.S. et al 2021 Tech. Phys. Lett. 47 41.

## *Корпускулярные методы диагностики*

### **СТАТУС КОРПУСКУЛЯРНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ В ФТИ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ**

Чернышев Ф.В., Аскинази Л.Г., Афанасьев В.И., Бахарев Н.Н., Белокуров А.А., Варфоломеев В.И., Гусаков Е.З., Гусев В.К., Дьяченко В.В., Есипов Л.А., Куприенко Д.В., Корнев В.А., Лашкул С.И., Лебедев С.В., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Миронов М.И., Мирошников И.В., Наволоцкий А.С., Несеневич В.Г., Петров М.П., Петров С.Я., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Смирнов А.И., Тельнова А.Ю., Тукачинский А.С., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е., Шувалова Л.К., Шулятьев К.Д., Щеголев П.Б.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской  
академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация,  
[post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)*

Корпускулярная диагностика плазмы охватывает большое число методов, основанных на регистрации потоков частиц, испускаемых плазмой, а также методов, использующих зондирование плазмы пучками ионов и атомов. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе для исследования плазмы применяется широкий комплекс таких методов, который включает:

- анализ потоков атомов, выходящих из плазмы, с помощью анализаторов нейтральных частиц (НРА);
- изучение потоков нейтронов из плазмы, проводимое с помощью нейтронных детекторов и нейтронных спектрометров;

- зондирование плазмы с помощью пучка тяжелых ионов (НРВ);

- анализ спектров излучения возбужденных водородоподобных ионов примесей (CHERS) и быстрых атомов водорода (FIDA), возникающих при зондировании плазмы с помощью нейтральных пучков.

Эти методы позволяют получать разнообразную информацию о параметрах плазмы и ее поведении. Основными объектами исследования являются:

- термализованные ионы (ионная температура и изотопный состав);

- надтепловые ионы, возникающие в результате применения дополнительных методов нагрева (торможение и удержание ионов высоких энергий);

- общие параметры плазмы (электрический потенциал плазмы, локальное значение электрического поля, скорость вращения, распределение тока по плазме).

В докладе представлен краткий обзор методов корпускулярной диагностики, применяемых на трех токамаках, имеющих в ФТИ им. А.Ф. Иоффе: Глобус-М2, ТУМАН-3М, ФТ-2 [1]. В докладе также приводятся результаты экспериментальных исследований, проводимых в последнее время в ФТИ, которые иллюстрируют важную роль корпускулярной диагностики для изучения различных аспектов поведения плазмы. К таким результатам можно отнести:

- на токамаке Глобус-М2 – достижение рекордного значения ионной температуры при применении нейтральной инжекции в качестве дополнительного метода нагрева плазмы [2];

- на токамаке ТУМАН-3М – исследование влияния изотопного состава водородно-дейтериевой плазмы на величину температуры плазмы и на генерацию ионно-циклотронных колебаний [3], измерения эволюции потенциала плазмы и электрического поля и исследование влияния концентрации плазмы на эффективность генерации вращения и потери быстрых ионов при нейтральной инжекции [4], а также первые результаты

по изучению функции распределения быстрых ионов с помощью диагностики FIDA [5];

– на токамаке ФТ-2 – экспериментальное подтверждение изотопного эффекта локализации области нагрева ионов при дополнительном нижнегибридном нагреве плазмы [6], а также обнаружение зависимости эффективности нагрева от величины магнитного поля.

### Литература

- [1]. Bakharev N.N., Abdullina G.I., Afanasyev V.I., et al. Tokamak research at the Ioffe Institute. Nucl. Fusion, 2019, Vol. 59, No. 11, #112022
- [2]. Kurskiev G.S., Miroshnikov I.V., Sakharov N.V., et al. The first observation of the hot ion mode at the Globus-M2 spherical tokamak. 2022, Vol. 62, No. 10, #104002
- [3]. Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г., Белокуров А.А. и др. Исследование влияния изотопного состава плазмы на центральную электронную температуру на токамаке ТУМАН-3М. В сб. I Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 2023, стр. 113
- [4]. Белокуров А.А. Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г. и др. Первое применение диагностики плазмы пучком тяжелых ионов для измерения потенциала плазмы при ко-инъекции высокоэнергичных нейтральных атомов в токамак ТУМАН-3М. Письма ЖТФ 2022, т. 48, вып. 24, стр. 33
- [5]. Шувалова Л.К., Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г. и др. Диагностика FIDA для исследования функции распределения быстрых ионов при нейтральной инжекции на токамаке ТУМАН-3М. В сб. I Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 2023, стр. 90
- [6]. Lashkul S.I., Altukhov A.B., Gurchenko A.D., et al. Plasma Physics Reports. 2020, Vol. 46, No. 9, pp. 863–873

# КОМПАКТНЫЙ МОНИТОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗОТОПНОГО ОТНОШЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Афанасьев В.И.<sup>1</sup>, Козловский С.С.<sup>2</sup>, Мельник А.Д.<sup>1</sup>,  
Миронов М.И.<sup>1</sup>, Наволоцкий А.С.<sup>1</sup>, Несеневич В.Г.<sup>1</sup>,  
Петров М.П.<sup>1</sup>, Петров С.Я.<sup>1</sup>, Чернышев Ф.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Политехническая ул., д. 26, Санкт-Петербург, Россия, 194021, [post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

Для поддержания оптимальных условий горения дейтерий-тритиевого топлива в термоядерных реакторах необходимо обеспечить измерение и контроль изотопного отношения плазмы – отношения концентраций ионов дейтерия и трития. Одним из наиболее эффективных диагностических средств, позволяющих осуществлять измерение изотопного отношения плазмы, являются анализаторы атомов перезарядки [1]. Анализаторы регистрируют потоки атомов изотопов водорода, испускаемых плазмой, и в частности по соотношению потоков атомов дейтерия и трития дают возможность определить отношение концентраций ионов дейтерия и трития внутри плазмы.

Наибольший интерес представляют измерения изотопного отношения в центральной, горячей зоне термоядерной плазмы. Возможность проведения таких измерений обеспечивается появлением в плазме специфической популяции так называемых «knock-on» ионов дейтерия и трития с энергиями МэВ-диапазона [2]. Эти ионы образуются в результате лобовых упругих столкновений термоядерных альфа-частиц МэВ энергий с тепловыми ионами дейтерия и трития. Нейтрализация «knock-on» ионов за счет

процессов радиационной рекомбинации с электронами и захвата электронов от многозарядных ионов примесей приводит в свою очередь к образованию потоков атомов дейтерия и трития МэВ энергий. Потоки оказываются достаточно интенсивными, чтобы их можно было зарегистрировать с помощью анализаторов атомов перезарядки. В частности, это было показано для условий полномасштабных дейтерий-тритиевых разрядов термоядерного реактора ИТЭР [3]. Важно отметить, что проведенный анализ показал также, что энергетическое распределение потоков нейтрализованных «knock-on» ионов дейтерия и трития оказывается монотонно спадающим, а отношение потоков слабо зависящим от энергии. Это позволяет рассмотреть возможность применения упрощенного анализатора атомов перезарядки – монитора, который будет регистрировать потоки атомов дейтерия и трития только одной определенной энергии. При этом отношение этих потоков будет давать информацию об изотопном отношении плазмы.

В данном докладе мы предлагаем схему такого варианта монитора, который построен на основе использования систем электростатического отклонения ионов и времяпролетного анализа. Показано, что выбранная схема оказывается достаточно эффективной с точки зрения подавления фона радиационных излучений в детекторной системе монитора за счет применения метода совпадений и амплитудного анализа регистрируемых сигналов. Возможности монитора рассмотрены на примере его использования в условиях термоядерного реактора ИТЭР. Показано, что он может быть успешно применен для мониторинга изотопного отношения плазмы при наличии нейтронной защиты диагностического вакуумного канала, обеспечивающей подавление нейтронного потока на входе в монитор до  $10^8$   $1/\text{см}^2/\text{сек}$ .



## Литература

- [1]. S. S. Medley, A. J. H. Donné, R. Kaita, A. I. Kislyakov, M. P. Petrov and A. L. Roquemore, *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, 79, 011101.
- [2]. L. Ballabio, G. Gorini, J. Kallne, *Phys. Rev. E* 55, 1997, 3358.
- [3]. V. I. Afanasyev, F. V. Chernyshev, A. I. Kislyakov, S. S. Kozlovski, B. V. Lyublin, M. I. Mironov, A. D. Melnik, V. G. Nesenevich, M. P. Petrov, S. Ya. Petrov, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 2010, 621, p. 456.

## ДИАГНОСТИКА БЫСТРЫХ ИОНОВ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Бахарев Н.Н., Балаченков И.М., Варфоломеев В.И., Воронин А.В., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Киселев Е.О., Курский Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Тельнова А.Ю., Ткаченко Е.Е., Токарев В.А., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Хромов Н.А., Чернышев Ф.В., Шевелев А.Е., Шулятьев К.Д., Щеголев П.Б., Яшин А.Ю.

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,*  
[bakharev@mail.ioffe.ru](mailto:bakharev@mail.ioffe.ru)

В докладе рассматривается применение диагностического комплекса токамака Глобус-М2 [1] для исследования поведения ионов высокой энергии в разрядах с нейтральной инжекцией. Транспорт и потери быстрых частиц могут быть изучены с использованием следующих диагностик:

- Трех анализаторов атомов перезарядки [2]. Они позволяют получить локальное (в случае работы в активном режиме [3]), или проинтегрированное вдоль хорды наблюдения (при работе в пассивном режиме) распределение быстрых ионов, а также его эволюцию с временным разрешением до 0,1 мс. Два анализатора оснащены системой сканирования, позволяющей изменять линию наблюдения между разрядами токамака.
- Комплекса нейтронной диагностики [4], состоящего из двух абсолютно калиброванных [5]<sup>10</sup> В коронных счетчиков, двух ВС-501А сцинтилляционных спектрометров, а также двух <sup>3</sup>Не пропорциональных счетчиков.
- Набора твердотельных детекторов [6]. Помимо излучения из плазмы детекторы регистрируют поток атомов и ионов, покидающих плазму. Вклад

излучения в результирующий сигнал оценивается с помощью детекторов с фильтрами.

- Зонда Ленгмюра [7]. Зонд установлен в экваториальной плоскости и может менять радиальное положение между разрядами. Измерение тока насыщения позволяет изучать эволюцию потока ионов при различных значениях большого радиуса вблизи сепаратрисы.
- Быстрой инфракрасной камеры (тепловизора) [8]. Камера может работать в режиме полного кадра (320×256 пикселей) с временным разрешением 4,5 мс. При исследовании потерь быстрых ионов из-за МГД-колебаний используется размер кадра 40×64 пикселей, что позволяет улучшить временное разрешение до 0,3 мс.
- Двухцветного пирометра. Как и тепловизор, пирометр позволяет измерять нагрев стенки. Временное разрешение составляет 2 мкс, однако пространственное разрешение отсутствует.

При исследовании влияния неустойчивостей на удержание быстрых частиц локализация и структура МГД-возмущений может быть получена с помощью диагностики доплеровской рефлектометрии [7] и набора магнитных зондов. Магнитная зондовая диагностика представлена тороидальным массивом из 8 зондов, двумя полоидальными массивами (28 и 16 зондов), а также трехкоординатным зондом, позволяющим определять поляризацию возмущений.

В докладе рассматриваются особенности применения диагностик для изучения транспорта и потерь быстрых ионов, а также приводятся наиболее яркие результаты, полученные в разрядах без МГД-неустойчивостей и в экспериментах по исследованию пилообразных колебаний и неустойчивостей альфвеновского типа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-72-20007.

## Литература

- [1]. V. B. Minaev et al. Nucl. Fusion 2017 57 066047
- [2]. N. N. Bakharev, A. D. Melnik, F. V. Chernyshev Atoms 2023 11 53
- [3]. N.N. Bakharev et al. Plasma Phys. Control. Fusion 2021 63 125036
- [4]. M.V. Iliasova et al. NIM A 20221029 166425
- [5]. O.M. Skrekel et al. Tech.Phys. 2022 92 166425
- [6]. A.D. Sladkomedova et al. Rev. Sci. Instrum. 2018 89 083509
- [7]. V. A. Tokarev et al. Phys.: Conf. Ser. 2018 1094 012003
- [8]. Сахаров Н.В. и др. Физика Плазмы. 2015 41 115-119

# ИЗУЧЕНИЕ БЫСТРЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ ГДЛ С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИКИ ПРОДУКТОВ РЕАКЦИИ СИНТЕЗА ДЕЙТЕРИЯ

Пинженин Е.И.<sup>1</sup>, Максимов В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия,  
[e.i.pinzhenin@inp.nsk.su](mailto:e.i.pinzhenin@inp.nsk.su)*

Одной из главных особенностей установки Газодинамическая ловушка (ГДЛ) является наличие популяции горячих ионов, которая возникает в результате работы системы инжекции мощных нейтральных атомов. Такие ионы со средней энергией  $\sim 10$  кэВ и максимальной энергией, соответствующей энергии инжекции, удерживаются в адиабатическом режиме, причем все время эксперимента их функция распределения сильно анизотропна в пространстве скоростей. В некоторых экспериментальных условиях это приводит к развитию неустойчивостей и быстрому перестроению функции распределения быстрых частиц. Накопление плазмоида горячих ионов с максимальной плотностью позволило реализовать режимы удержания плазмы с рекордными значениями плазменного бета [1]. Таким образом накопление быстрых ионов, изучение их пространственных распределений, перестроение функции распределения в результате развития неустойчивостей являются одним из направлений исследований на установке ГДЛ.

Недавно на ГДЛ была реализована новая диагностика быстрых частиц по потоку продуктов реакции синтеза (при работе с дейтериевой плазмой). Для этого в дополнение к обзорным мониторам потока нейтронов на основе сцинтилляционных детекторов и спектрометру нейтронов и гамма квантов на основе стильбена были добавлены несколько детекторов 3 МэВ протонов — продуктов реакции синтеза. Такие детекторы расположены внутри вакуумной камеры ГДЛ (расставлены вдоль установки с переменным шагом), работают в режиме счета отдельных частиц и позволяют, помимо измерения

значений абсолютной интенсивности потока продуктов реакции синтеза, измерять пространственные распределения с разрешением по времени 100 мкс и несколько десятков сантиметров по пространственной координате. Такая диагностика позволяет изучать потери быстрых частиц в результате неустойчивостей (по уменьшению потока продуктов реакции) и перестроение их функции распределения (по перестроению пространственного профиля).

В докладе будет приведено описание модернизированной диагностики продуктов реакции синтеза на установке ГДЛ, продемонстрировано ее применение в плазменном эксперименте. Приведены данные по перестроению функции распределения быстрых ионов в результате развития неустойчивостей.

### **Литература**

- [1]. Bagryansky P.A. et.al. Confinement of hot ion plasma with  $\beta=0.6$  in the gas dynamic trap// Fusion science and technology. Iss. 59, No. 1T, pp 31-35, 2011.

# ДИАГНОСТИКА НЕЙТРОННЫХ ПОТОКОВ И ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Скрекель О.М.<sup>1</sup>, Балаченков И.М.<sup>1</sup>, Бахарев Н.Н.<sup>1</sup>,  
Варфоломеев В.И.<sup>1</sup>, Гусев В.К.<sup>1</sup>, Жильцов Н.С.<sup>1</sup>,  
Киселев Е.О.<sup>1</sup>, Курские Г.С.<sup>1</sup>, Минаев В.Б.<sup>1</sup>,  
Мирошников И.В.<sup>1</sup>, Петров Ю.В.<sup>1</sup>, Сахаров Н.В.<sup>1</sup>,  
Тельнова А.Ю.<sup>1</sup>, Ткаченко Е.Е.<sup>1</sup>, Толстяков С.Ю.<sup>1</sup>,  
Тюхменева Е.А.<sup>1</sup>, Хилькевич Е.М.<sup>1</sup>, Шевелев А.Е.<sup>1</sup>,  
Шулятьев К.Д.<sup>1</sup>, Щёголев П.Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,  
[skrekel@mail.ioffe.ru](mailto:skrekel@mail.ioffe.ru)

Нейтронный поток из плазмы токамака Глобус-М2 обусловлен протеканием DD-ядерных реакций высокоэнергетичных ионов, рожденных при применении методов дополнительного нагрева плазмы, с ионами основной плазмы, а также между собой. В связи с этим, нейтронные измерения позволяют получить представление о процессах транспорта и потерь быстрых частиц из плазмы [1]. Измерение спектра жесткого рентгеновского (НХР) излучения, которое возникает вследствие потерь убегающих электронов на стенку токамака, предоставляет информацию об их формировании [2].

В 2022 году на установке Глобус-М2 была проведена масштабная модернизация комплекса нейтронной и НХР диагностики. После модернизации один из двух имеющихся <sup>10</sup>В коронных нейтронных счетчиков был помещен в регулируемый коллиматор из полиэтилена низкого давления (ПНД), что позволило значительно расширить динамический диапазон измерений нейтронных потоков. Также для одного из двух имеющихся нейтронных спектрометров на основе жидкого органического сцинтиллятора ВС-501А был изготовлен коллиматор из ПНД и свинца с возможностью менять диаметр

входного отверстия для обеспечения возможности работы в условиях возросших нейтронных полей при выходе токамака Глобус-М2 на проектные значения. В дополнение к выше названным детекторам, на установке начали работать два  $^3\text{He}$  пропорциональных нейтронный счетчика, которые также были помещены в регулируемый коллиматор из ПНД и свинца. Для оценки интегрального нейтронного выхода из плазмы нейтронные детекторы после модернизации были перекалиброваны при помощи эталонного AmBe источника [3].

Потоки и спектр НХР излучения из плазмы измеряются при помощи двух сцинтилляционных спектрометров на основе кристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ . Во время модернизации для одного из спектрометров был изготовлен новый коллиматор из свинца, а для второго – коллиматор из свинца и ПНД с добавлением LiH нейтронного аттенюатора, обеспечивающего возможность НХР измерений в разрядах с высокими нейтронными полями.

В докладе представлены технические характеристики обновленного нейтронного и НХР диагностического комплекса токамака Глобус-М2, обсуждаются последние полученные экспериментальные результаты, а также планы дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-72-20007.

## Литература

- [1]. Bakharev N.N. et al. Nucl. Fusion 55 (2015) 043023
- [2]. Shevelev A.E. et al. Plasma Phys. Control. Fusion 2018 60 075009
- [3]. Скрекель О.М. и др. ЖТФ. 2022. Т.92. В.1. С. 32–35



# АНАЛИЗ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА DD-НЕЙТРОНОВ НГ-24 С ПОМОЩЬЮ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ И ПАРАТЕРФЕНИЛА

Панкратенко А.В., Кормилицын Т.М., Фридрихсен Д.С.,  
Обузовский С.Ю., Джурик А.С., Кащук Ю.А.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, [a.pankratenko@iterrf.ru](mailto:a.pankratenko@iterrf.ru)*

В работе представлены результаты исследования поля излучения генератора быстрых DD-нейтронов НГ-24, планируемого для in-situ калибровки диагностик ИТЭР. Исследование проведено при помощи двух нейтронных спектрометров на основе кристаллов  $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$  и паратерфенила (ПТФ). Регистрация быстрых нейтронов в кристалле  $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$  основана на использовании продуктов реакции  $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}_{g.s.}$ . Подробное исследование свойств кристалла  $\text{LaCl}_3$  в качестве спектрометра быстрых нейтронов представлено в работах [1-4], ПТФ в работах [5-6].

Характеристики нейтронного потока генератора были исследованы в ходе эксперимента во ВНИИА им. Духова. Каждый из кристаллов выставлялся на фиксированной дистанции под углами в 0, 60, 90 и 105 градусов к оси генератора. Анизотропия выхода нейтронного генератора обуславливает различные значения плотности потока быстрых нейтронов в зависимости от угла вылета [7-8]. В обоих случаях запись сигнала детекторов производилась быстрым АЦП частотой дискретизации 500 МГц и разрядностью 14 бит.

С помощью цифрового метода разделения сигналов по форме импульса из откликов детекторов выделены сигналы, соответствующие зарегистрированным нейтронам. Для детектора  $\text{LaCl}_3$  калибровка проведена по собственному  $\alpha$ -фону [9]. На

основе зарегистрированных спектров была получена оценка полного выхода генератора, а также исследована анизотропия. Для кристалла  $\text{LaCl}_3$  были исследованы и определены наиболее правдоподобные значения сечения реакции  $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$ , приведенные в литературе.

Полученная из эксперимента зависимость плотности потока быстрых нейтронов в поле излучения нейтронного генераторов НГ-24 от угла вылета находится в согласии с результатами моделирования с учётом погрешности. Продемонстрирована стабильная работа НГ, а также апробировано использование нейтронных спектрометров на основе сцинтилляционных кристаллов для оценки плотности потока и спектра быстрых нейтронов в передней полусфере НГ. При помощи кристалла  $\text{LaCl}_3$  успешно получены энергии нейтронных потоков, испускаемых генератором; низкое качество разделения и неопределенность сечений реакции затрудняют точную оценку выхода генератора. Оценка полного выхода проведена при помощи кристалла ПТФ.

Работа выполнена в рамках соглашения между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Организацией ИТЭР Implementing Agreement № 1 (ITER ref. IO/21/CT/4300002349) от 20 октября 2020 «Research and Detailed Design Development of the components needed for Neutron Generators suitable for ITER in-situ neutron calibration».

## Литература

- [1]. Kormilitsyn, T., Obudovsky, S., Kashchuk, Y. et al. Application of the  $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$  Scintillator to Fast Neutron Measurements. *Physics of Particles and Nuclei Letters*.
- [2]. Pankratenko, A.V., Kormilitsyn, T.M., Obudovsky, S.Y. et al. Digital Pulse Shape Discrimination Method for D–D Neutron Spectrometry Using the  $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$  Scintillator. *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 19, 66–76 (2022).
- [3]. Kormilitsyn, T. M., Obudovsky, S. Y., Rodionov, R. N., Pankratenko, A. V., Dzhurik, A. S., Kashchuk, Y. A., & Krasilnikov, A. v. (2021). Novel  $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ -based spectrometer

- for deuterium plasma neutron diagnostics. Review of Scientific Instruments, 92(4).
- [4]. A.V. Pankratenko, T.M. Kormilitsyn, Yu.A. Kashuck, S.Yu. Obudovsky, D. S.6 Fridrikhsen, A.E. Shevelev, E.M. Khilkevitch, M.V. Iliasova, N.N. Bakharev, O.M. Skrekel. Analysis of the LaCl<sub>3</sub>(Ce) scintillator response function to fast neutrons. NIM Section A, Volume 1052, 2023.
- [5]. Sardet, A., Varignon, C., Laurent, B., Granier, T., & Oberstedt, A. (2015). p-Terphenyl: An alternative to liquid scintillators for neutron detection. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 792, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.04.038>
- [6]. Кашук Ю.А., “Сцинтилляционные спектрометры нейтронного и гамма излучения для диагностики термоядерной плазмы”, диссертация, к.ф.-м.н., 2007
- [7]. J. Csikai, Zs. Lantos, Cs.M. Buczko "Investigations on the properties of D + D and D + T neutron sources, IAEA-TECDOC-410 Properties of Neutron Sources, 1987
- [8]. Сыромуков С.В., Степнов В.В., Добров Р.В., Сысоев В.И., Мельник А.В., Богатиков К.В., Старостин А.Н., Летичевский Р.Д., “ГЕНЕРАТОР НЕЙТРОНОВ НГ-24 ДЛЯ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ И ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ”, АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ, Т. 119, 58 ВЫП. 1, ИЮЛЬ 2015
- [9]. Wolszczak, W., & Dorenbos, P. (2017). Shape of intrinsic alpha pulse height spectra in lanthanide halide scintillators. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 857(February), 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.02.041>

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИКД ДМНП ИТЭР В УСЛОВИЯХ ОДНОВРЕМЕННОГО ОБЛУЧЕНИЯ DD- И DT-НЕЙТРОНАМИ

Фридрихсен Д.С.<sup>1</sup>, Кормилицын Т.М.<sup>1</sup>, Родионов Р.Н.<sup>1</sup>,  
Обуловский С.Ю.<sup>1</sup>, Кашук Ю.А.<sup>1</sup>, Портнов Д.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия, [D.Fridrikhsen@iterrf.ru](mailto:D.Fridrikhsen@iterrf.ru)*

На строящемся токамаке-реакторе ИТЭР (англ. International Thermonuclear Experimental Reactor) планируется получение ионной температуры плазмы 15-25 кэВ. В этом диапазоне сечение D-T реакции на два порядка больше сечения D-D реакции. Потому в разрядах с топливным отношением  $n_T/n_D \sim 1:1$  можно ожидать, что количество рожденных в плазме DT-нейтронов будет в разы больше. Однако на пути к кампании с таким высоким топливным отношением будет проведен ряд разрядов в дейтериевой плазме в отсутствие или с малым содержанием трития. Ввиду того, что продуктом D-D реакции в одном из каналов является тритий, даже в сценариях без напуска трития он будет постепенно нажигаться [1], а как следствие плазма станет источником как DD-, так и DT-нейтронов. В сценариях, характеризующихся этим переходным процессом, стоит вопрос корректного определения выхода быстрых нейтронов из плазмы.

Одним из мониторов полного нейтронного выхода для ИТЭР является диагностика Диверторный Монитор Нейтронного Потока (ДМНП). В ее состав входят ионизационные камеры деления с ураном-235 и ураном-238 [2]. Сечения реакций распада для этих изотопов при бомбардировке быстрыми нейтронами различаются, как следствие различаются и их эффективности. Вследствие этого представляется возможность из скоростей счета камер деления восстановить величины потока компонент смешанного поля при одновременном облучении камер DD- и

DT-нейтронами. С учётом реактивности термоядерного синтеза, отношение найденных потоков быстрых DD- и DT-нейтронов позволяет оценить топливное отношение плазмы.

В данной работе представлен и апробирован метод определения отношения  $Y_{DT}/Y_{DD}$  в диапазоне до 15% в смешанном нейтронном поле с помощью ионизационных камер деления КНТ30-5 и КНТ30-8 на основе урана-235 и урана-238. Экспериментальная кампания была проведена на стенде нейтронной диагностики «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» [3]. Для создания конфигурации смешанного нейтронного поля использовались нейтронные генераторы ИНГ-07Т (источник DT-нейтронов, ускоряющее напряжение 130 кВ) и НГ-14 (источник DD-нейтронов, напряжение 130 кВ). Максимальный выход нейтронов составлял  $\sim 2 \cdot 10^8$  н/сек и  $\sim 10^9$  н/сек соответственно. Камеры, работающие в счетном режиме, размещались в пространстве между генераторами, расположенными соосно друг напротив друга. Потоки нейтронов в области расположения камер деления варьировались с помощью токов генераторов.

Для верификации величин локального потока в области расположения камер деления было проведено сопроводительное моделирование эксперимента с помощью кодов Монте-Карло, в рамках расчёта воспроизведена геометрия эксперимента. Для учета рассеянных нейтронов в расчетах были использованы точные модели нейтронных генераторов и помещений стенда. Проведено сравнение нейтронного спектра, моделируемого средствами стенда и условий, ожидающихся в месте установки камер деления ДМНП ИТЭР.

Предложенный способ определения компонент смешанного нейтронного поля с помощью двух ИКД с разными изотопами урана может быть использован в качестве альтернативы нейтронным спектрометрам для задачи определения топливного отношения, а также в качестве дополнения к прямому методу измерения изотопного соотношения термоядерного топлива с помощью анализаторов атомов перезарядки, однако существенным ограничением метода

является необходимость доминирующего вклада прямых нейтронов в наблюдаемый спектр..

Работа выполнена в рамках государственного контракта №Н.4а.241.19.23.1014 от 18 января 2023 года на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

### **Литература**

- [1]. G.Nemtsev, V.Amosov, S.Meshchaninov, S.Popovichev & R.Rodionov, “Study of the triton-burnup process in different JET scenarios using neutron monitor based on CVD diamond”, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 87, No. 11, p. 3–6, 2016
- [2]. Yu.Kashchuk, A.Krasil'nikov, D.Prosvirin, A.Tsutsikh, V.Frunze & C.Walker, “Concept project of ITER divertor monitor of neutron flux”, *Instruments and Experimental Techniques*, Vol. 49, No. 2, p. 179-186, 2006
- [3]. S.Obudovskii, A.Batyunin, V.Sevast'yanov, V.Vorob'ev & Yu.Kashchuk, “Metrological assurance of thermonuclear neutron flux density measurements”, *Measurement Techniques*, Vol. 59, No. 3, p. 288-292, 2016

# КОНЦЕПЦИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТЕНДА ПЕРСТ ДЛЯ ОТРАБОТКИ БПРД

Бобырь Н.П.<sup>1</sup>, Казиев А.В.<sup>2,3</sup>, Тумаркин А.В.<sup>2,3</sup>, Колодко Д.В.<sup>2,3</sup>,  
Брагин Е.Ю.<sup>1</sup>, Бунин Е.А.<sup>1</sup>, Сухов А.Е.<sup>1</sup>, Кутузов Д.С.<sup>1</sup>,  
Шуровский Д.О.<sup>1</sup>, Жильцов В.А.<sup>1</sup>, Спицын А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия,

[Bobyr\\_NP@nrcki.ru](mailto:Bobyr_NP@nrcki.ru)

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

<sup>3</sup>ООО ПИНЧ, Москва, Россия

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» в рамках Федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» создается экспериментальный стенд ПЕРСТ. Целью создания стенда является формирование современной научно-исследовательской и испытательной базы для отработки и исследования прототипов нового в России типа электрического ракетного двигателя (ЭРД) – безэлектродного плазменного ракетного двигателя (БПРД). Данный тип ЭРД отличается высокими мощностью и расходом рабочего газа [1].

Одна из решаемых задач заключается в исследовании физических процессов, протекающих в магнитном сопле БПРД, в частности, ускорения и срыва истекающего плазменного потока с силовых линий неоднородного магнитного поля.

Магнитное сопло можно разделить на три области. Первая область находится в горловине магнитного сопла, и здесь необходимо определять, в какую компоненту плазмы вкладывается ВЧ энергия, а также радиальные распределения параметров плазменного потока на входе в магнитное сопло. Вторая область представляет собой всю оставшуюся часть магнитного сопла. В этой области требуется построить двухмерные карты всех параметров плазменного потока, прослеживая эволюцию этих параметров по

мере расширения плазменного потока в магнитном сопле. Третья область находится на расстоянии от горловины сопла, гарантирующем срыв плазменного потока с силовых линий магнитного поля. Здесь измеряется итоговая функция распределения ионов по энергиям, создаваемая двигателем тяга и угол срыва плазменного потока с силовых линий магнитного поля.

В докладе будут представлены ключевые параметры спроектированного стенда ПЕРСТ, а также концепция диагностического комплекса для исследования плазменных процессов в магнитном сопле. В его состав входят следующие типы диагностик требующие разработки: подвижные зонды (двухмерные карты параметров плазмы – электронной температуры и плотности, плазменного потока), сеточный и электростатический анализаторы (локальная функция распределения ионов по энергиям), тензометрический тягомер (локальная плотность тяги, создаваемая двигателем тяга), угломер (локальный угол движения ионов плазменного потока, угол срыва плазменного потока с силовых линий магнитного поля), фильтр Вина. Кроме того, планируется использование других диагностик: оптическая эмиссионная спектроскопия, лазерно-индуцированная флюоресценция, СВЧ интерферометр.

Данный диагностический комплекс позволит проводить необходимые исследования во всех трех областях магнитного сопла и может быть рассмотрен в качестве типового комплекса для исследования физических процессов в магнитном сопле БПРД.

Разработка корпускулярных диагностик будет проводиться совместной кооперацией НИЦ «Курчатовский институт», НИЯУ МИФИ, ООО ПИНЧ.

## **Литература**

- [1]. М.В.Ковальчук, В.И.Ильгисонис, В.М.Кулыгин, “Плазменные двигатели и будущее космонавтики” Природа, № 12, 2017.



# ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА АТОМОВ В ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

В.А. Астапенко<sup>1</sup>, А.В. Горбунов<sup>2</sup>, П.А. Гусева<sup>3</sup>, В.С. Лисица<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МФТИ, г. Долгопрудный, Московская область, Россия

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва Россия

<sup>3</sup> НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия

Проведен анализ зависимости интенсивностей излучения спектральной линии  $H-\alpha$  под воздействием лазерных импульсов различной длительности и интенсивности. Расчеты проведены для типичных значений параметров термоядерной пристеночной плазмы токамаков [1]:  $T=10$  эВ,  $N_e=10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Рассмотрены случаи как малой, так и большой длительностей импульсов по сравнению с временами радиационно-столкновительной релаксации возбужденных атомных состояний. Интенсивности лазерного излучения также изменялись от малых значений, отвечающих отсутствию насыщения уровней, так и до значений в случае насыщения.

В задаче присутствует серия параметров, влияющих на вероятности переходов и величину населенности атомных уровней: параметры радиационно-столкновительной релаксации (радиационные распады и частота электронных столкновений, определяющие населенность состояний в отсутствие лазерного импульса), длительность лазерного импульса  $\tau$ , частота Раби  $\Omega_0$ , определяющая переход к режиму насыщения уровней, величина доплеровского уширения уровней. Взаимодействие с лазерным полем в простейшем приближении учитывалось формулами [2], отвечающими 1-му и 2-му стандартному подходу

$$w_{1st}(t) = \pi G(\omega_c) \Omega_0^2 \tilde{E}^2(t, \tau), \quad (1)$$

$$w_{2st}(t) = \pi \Omega_0^2 \frac{\tau}{\pi} \tilde{E}^2(t, \tau). \quad (2)$$

где  $G(\omega)$  – гауссовский контур линии поглощения,  $\Omega_0$  – частота Раби,  $\tilde{E}(t, \tau)$  – форма лазерного импульса. 1-й подход учитывает форму линии и корректен в случае длинных

импульсов, когда длительность  $\tau$  существенно превосходит обратную ширину линии перехода, второй подход применим в противоположном случае ультракоротких импульсов. Последовательное описание, развитое в статье [2], корректно описывает процесс для произвольных длительностей лазерного импульса.

Наиболее ясные предельные случаи временной эволюции населенности верхнего уровня  $n=3$  линии  $H-\alpha$  представлены на рис.1,2 соответственно для случая коротких и длинных (по сравнению с временами релаксации). В случае рис.1 можно пренебречь релаксацией на малых временах – населенность резко возрастает под действием импульса с последующим медленными спадом. На рис.2 населенность следует форме медленно изменяющегося лазерного импульса. Представлены данные для широкого диапазона изменения указанных параметров. Абсцисса – в наносекундах.

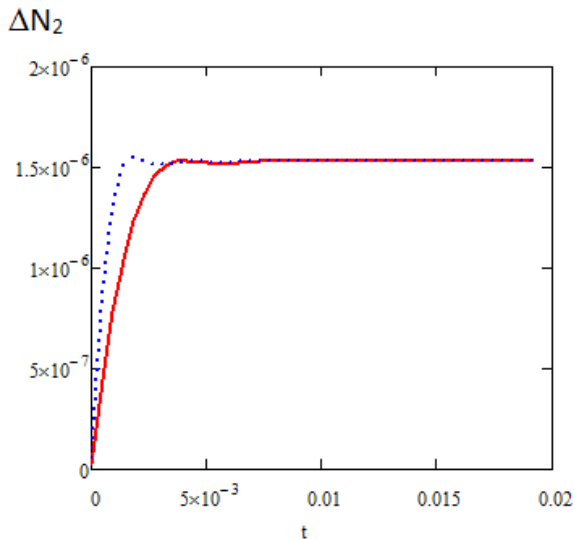


Рис.1 Зависимость населенности возбужденного уровня от времени (произвольные единицы) в случае коротких лазерных импульсов  $\tau \ll T_2$ , сплошная кривая – последовательное описание [2], пунктир – расчет по формуле (2).

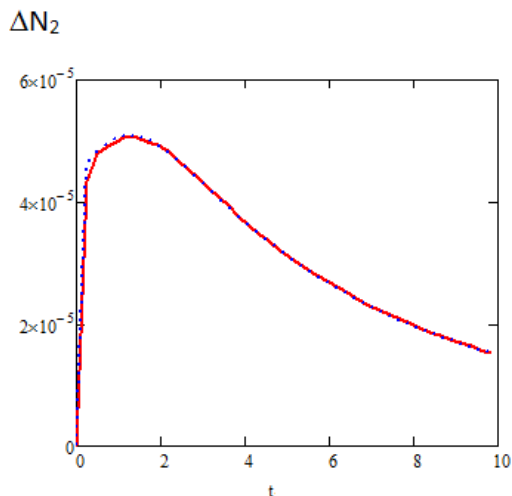


Рис.2. То же, что на рис.1. для длинных импульсов  $\tau \gg T_2$ , пунктир – расчет по формуле (1)

$\Delta N_2$  – превышение населенности верхнего уровня над стационарным значением (относительные единицы).

### Литература

- [1]. Gorbunov et al Laser-induced quenching diagnostics of hydrogen atoms in fusion plasma. Plasma Phys. Control. Fusion 64 (2022)
- [2]. Astapenko V.A., Khramov E.S. Generalized kinetics model for the description of photoprocesses induced by ultrashort laser pulses. Appl. Phys. B 2023 (accepted for publication)

# РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МАГНИТНОМ СОПЛЕ МАКЕТА БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Брагин Е.Ю., Бунин Е.А., Казеев М.Н., Камин Д.В.  
Козлов В.Ф., Кугузов Д.С., Спицын А.В., Сухов А.Е.,  
Шуровский Д.О., Янченков С.В., Жильцов В.А.

НИИ «Курчатовских институт», г. Москва, РФ,  
[bragin\\_ey@nrcki.ru](mailto:bragin_ey@nrcki.ru)

На стенде ПН-3 проводятся исследования в поддержку создания отечественного безэлектродного плазменного ракетного двигателя (БПРД). Одна из решаемых задач заключается в исследовании физических процессов, протекающих в магнитном сопле БПРД, в частности, ускорения и срыва истекающего плазменного потока с силовых линий неоднородного магнитного поля.

Магнитное сопло можно разделить на три области. Первая область находится в горловине магнитного сопла, и здесь необходимо определять, в какую компоненту плазмы вкладывается ВЧ энергия, а также радиальные распределения параметров плазменного потока на входе в магнитное сопло. Вторая область представляет собой всю оставшуюся часть магнитного сопла. В этой области требуется построить двухмерные карты всех параметров плазменного потока, прослеживая эволюцию этих параметров по мере расширения плазменного потока в магнитном сопле. Третья область находится на расстоянии от горловины сопла, гарантирующем срыв плазменного потока с силовых линий магнитного поля. Здесь измеряется итоговая функция распределения ионов по энергиям, создаваемая двигателем тяга и угол срыва плазменного потока с силовых линий магнитного поля.

Разработан диагностический комплекс для исследования плазменных процессов в магнитном сопле. В его состав входят: диамагнитная катушка (изменение энергосодержания плазменного потока), подвижные зонды (двухмерные карты параметров плазмы – электронной температуры и плотности, плазменного потока) и специальные (функция распределения ионов по вращательной энергии) зонды, оптическая эмиссионная спектроскопия (радиальные распределения электронной температуры, плотности и состава плазмы, степени ее ионизации), лазерно-индуцированная флюоресценция (радиальное распределение плотности плазмы), СВЧ интерферометр (эволюция во времени линейной плотности плазмы), сеточный и электростатический анализаторы (локальная функция распределения ионов по энергиям), тензометрический тягомер (локальная плотность тяги, создаваемая двигателем тяга), угломер (локальный угол движения ионов плазменного потока, угол срыва плазменного потока с силовых линий магнитного поля), а также обсуждается возможность использования других диагностик.

Данный диагностический комплекс позволяет проводить необходимые исследования во всех трех областях магнитного сопла и может быть рассмотрен в качестве типового комплекса для исследования физических процессов в магнитном сопле БПРД.

## АНАЛИЗАТОР CNPA-09 НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Шулятьев К.Д., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К.,  
Жильцов Н.С., Курский Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б.,  
Мирошников И.В., Несеневич В.Г., Петров Ю.В., Сахаров Н.В.,  
Скрекель О.М., Солоха В.В., Тельнова А.Ю., Ткаченко Е.Е.,  
Тюхменева Е.А., Чернышев Ф.В., Щеголев П.Б.

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,*  
[shulyatiev.kd@mail.ioffe.ru](mailto:shulyatiev.kd@mail.ioffe.ru)

В 2022 году на токамаке Глобус-М2 [1] в комплекс корпускулярной диагностики [2] был включен новый компактный анализатор атомов перезарядки CNPA-09 [3], который регистрирует дейтерий в диапазоне энергий  $0,8 \div 60$  кэВ или водород в диапазоне  $0,8 \div 120$  кэВ при помощи 44 детекторов, расположенных в одной линейке. Для обоих случаев максимальная измеряемая энергия выше энергии инжекции (до 50 кэВ).

В рамках экспериментальных кампаний были проведены измерения атомарных потоков из плазмы в омических разрядах и разрядах с дополнительным нагревом пучками атомов высокой энергии. Проведено сравнение ионной температуры, определенной по наклону тепловой части спектра, с данными анализаторов АКОРД-12 и АКОРД-24М. Хорошее совпадение показано в омическом режиме и в режиме с включением нового инжектора (преимущественно пассивный режим измерений для всех анализаторов). В случае с включением двух инжекторов по данным CNPA-09 происходит занижение ионной температуры в 1,5 раза. Предположительно, это связано с отсутствием заметной активной мишени на линии наблюдения анализатора, и, следовательно, измерением усредненной температуры. Анализаторы АКОРД регистрируют активный сигнал атомов перезарядки из центральной области плазмы, и, как следствие,

измеряется локальная ионная температура, значение которой заметно выше усредненного.

Проведена работа по исследованию вклада фонового излучения плазмы (преимущественно рентгеновского диапазона) в регистрируемый детекторами сигнал. Верхняя граница энергетического диапазона анализатора CNPA-09 заметно выше максимальной энергии инжекции. Отсчеты в последних каналах в основном обусловлены регистрацией фоновых событий. В серии экспериментов было определено типичное распределение фоновых событий по всем каналам анализатора. Нормировка этого распределения на счеты в последних каналах позволяет определить и учесть вклад фона в разряде, в котором проводилась регистрация полезного сигнала.

Анализатор позволяет изучать поведение частиц с энергиями выше инжекционной. Такие частицы возникают в плазме в результате столкновений быстрых ионов с ионами и электронами плазмы. Энергетический спектр таких ионов имеет вид  $F(E) \sim \exp(-E/T_{\text{eff}})$ , где  $T_{\text{eff}} = (T_i + (E_{\text{NBI}} \div E_{\text{crit}})^{3/2}) \times (1 + (E_{\text{NBI}} \div E_{\text{crit}})^{3/2})^{-1}$  – эффективная температура плазмы, определяемая температурами ионного и электронного компонентов. В серии экспериментов было проведено измерение эффективной температуры по наклону зарегистрированного спектра в диапазоне энергий выше инжекционной. Выполнено сравнение со значением  $T_{\text{eff}}$ , рассчитанным с использованием данных диагностики Томсоновского рассеяния и корпускулярной диагностики. Оно показало схожее поведение во времени, но завышенное (до 30%) значение температуры по данным CNPA. Причины обнаруженного расхождения в процессе изучения.

Временное разрешение прибора составляет 0,1 мс. Этого достаточно для изучения влияния таких неустойчивостей как пилообразные колебания (характерный период составляет несколько мс) и неустойчивостей альфвеновского типа (характерная длительность составляет сотни мкс) на удержание ионов. В качестве примера в докладе представлены результаты измерений потоков атомов перезарядки во время тороидальных

альфвеновских мод, полученные анализаторами CNPA-09 и АКОРД-24М.

Работа выполнена на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях", в рамках государственного задания ФТИ им. А. Ф. Иоффе (тема 0034-2021-0001). Эксперименты с дополнительным нагревом выполнены в рамках государственного задания (тема 0040-2019-0023).

### **Литература**

- [1]. V. B. Minaev et al. Nucl. Fusion 2017 57 066047
- [2]. N. N. Bakharev, A. D. Melnik, F. V. Chernyshev Atoms 2023 11 53
- [3]. Chernyshev F.V. et al. Instrum. and Exp. Tech. 2004. T. 47. No2. С. 214–220



# ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИИ БЫСТРЫХ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-NB

Полосаткин С.В.<sup>1,2,3</sup>, Баткин В.И.<sup>1,3</sup>, Гороховский Р.Г.<sup>1,2</sup>,  
Иванов И.А.<sup>1,3</sup>, Куклин К.Н.<sup>1</sup>, Полозова П.А.<sup>1,3</sup>, Поступаев В.В.<sup>1,3</sup>,  
Ровенских А.Ф.<sup>1</sup>, Сковородин Д.И.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*ИЯФ СО РАН, 630090, пр-т Лаврентьева, 11, Новосибирск,  
Россия, [s.v.polosatkin@inp.nsk.su](mailto:s.v.polosatkin@inp.nsk.su)*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
630073, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирск, Россия*

<sup>3</sup>*Новосибирский государственный университет, 630090,  
Пирогова, 1, Новосибирск, Россия*

Установка ГОЛ-NB [1] представляет собой линейную осесимметричную открытую ловушку с многопробочными секциями для удержания плазмы. Основной целью экспериментов, проводимых на этой установке, является исследование удержания плазмы в многопробочном (периодически модулированным вдоль оси) магнитном поле. Установка ГОЛ-NB состоит из центральной ловушки (пробкотрона) длиной 2.5 м с полем в центре  $B = 0.3$  Тл и пристыкованных к ней секций сильного поля длиной около 3 м каждая с  $B = 4.5$  Тл. Плазма в установке создается плазменной пушкой, расположенной в расширителе на одном из торцов установки, и нагревается с помощью инъекции пучков быстрых атомов водорода. Два инжектора [2] с суммарной мощностью 1,1 МВт инжектируют в плазму пучки быстрых атомов с энергией 25 кэВ, формируя в центральной секции популяцию быстрых ионов.

Проходя через плазму, пучки быстрых атомов вследствие столкновений с электронами и ионами плазмы частично ионизируются, и возникающие быстрые ионы захватываются магнитным полем установки. Захваченные ионы осциллируют вдоль оси установки между точками останова (совпадающими с точками инъекции) и постепенно передают свою энергию

электронам плазмы за счет упругих столкновений. Еще одним важным эффектом, приводящим к потере быстрых ионов, является перезарядка на нейтральном газе. Присутствие нейтрального газа в вакуумной камере и его проникновение в плазму приводит к потерям быстрых ионов вследствие резонансной перезарядки, снижающим эффективность нагрева плазмы.

Основным средством диагностики быстрых ионов на установке является анализатор нейтралов перезарядки [3], расположенный в одной из точек инжекции. Анализатор имеет 11 энергетических каналов, регистрирующих нейтралы в диапазоне от 5 до 25 кэВ. Интерпретация сигналов анализатора проводится путем сравнения измеряемых сигналов с ожидаемыми при заданной модельной функции распределения быстрых ионов и определения параметров этой функции распределения. Кроме того, анализатор позволяет прямо измерять время жизни ионов в плазме по спаду потока нейтралов после выключения инжекции.

Измерения динамики популяции быстрых ионов показали, что значительная доля захваченных ионов теряется из плазмы, не успевая передать свою энергию плазменным электронам. Наиболее вероятный механизм потерь ионов – перезарядка на нейтральном газе, десорбирующемся со стенок вакуумной камеры, а также возникающем в инжекторном тракте при попадании на стенку непerezарядившейся фракции пучка быстрых нейтралов.

Для количественного описания нагрева плазмы с помощью системы нейтральной инжекции была предложена модельная функция распределения быстрых ионов, описываемая одним параметром – соотношением мощности, передаваемой от ионов электронам плазмы, и мощности перезарядных потерь [4]. Полученная модель хорошо согласуется с экспериментальными данными и позволяет изучать динамику эффективной мощности нагрева плазмы нейтральными пучками в процессе инжекции. В текущих экспериментах эффективность передачи энергии от быстрых ионов плазме не превосходит 15 процентов, что ограничивает достижимую температуру плазмы. В

экспериментах обнаружено, что измеряемая эффективность передачи энергии существенно зависит от величины напряжений, подаваемых на установленные в вакуумной камере лимитеры и торцевые плазмодиоды, служащие для МГД-стабилизации плазмы.

### **Литература**

- [1]. V. Postupaev et al, Start of experiments in the design configuration of the GOL-NB multiple-mirror trap // Nuclear Fusion 62(8),086003 (2022)
- [2]. V. Batkin et al., Neutral beam injectors for the GOL-NB facility // AIP Conference Proceedings 1771,030004 (2016)
- [3]. S.Polosatkin et al., Neutral particle analyzer for studies of fast ion population in plasma // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 720, с. 42-44 (2013)
- [4]. В.В. Поступаев и др., Изучение захвата и накопления быстрых ионов в предварительных экспериментах с атомарной инжекцией на установке ГОЛ-НВ // Физика плазмы, 2022, том 48, № 11, с. 1005–1009

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ИОНОПРОВОДА ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

Крохалев О.Д.<sup>1,2</sup>, Аммосов Я.М.<sup>1,2</sup>, Вадимов Н.А.<sup>1</sup>,  
Виницкий Е.А.<sup>1,3</sup>, Драбинский М.А.<sup>1</sup>, Елисеев Л.Г.<sup>1</sup>,  
Лысенко С.Е.<sup>1</sup>, Мельников А.В.<sup>1,2,3</sup>, Саранча Г.А.<sup>1,2</sup>,  
Шелегеда И.А.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация, [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

<sup>2</sup>МФТИ (НИУ), Москва, Российская Федерация, [info@mipt.ru](mailto:info@mipt.ru)

<sup>3</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Российская Федерация, [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru)

<sup>4</sup>МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Российская Федерация, [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)

В настоящий момент идёт разработка двойного диагностического комплекса зондирования плазмы пучком тяжёлых ионов (ЗПТИ) для токамака Т-15МД [1]. ЗПТИ – диагностика для локальных измерений электрического потенциала плазмы и его колебаний, а также колебаний электронной плотности и полоидального магнитного поля [2].

Расчёты траекторий зондирующих ионов с помощью кода NIBP-SOLVER [3] показали, что для тороидального магнитного поля на оси плазмы  $V_{\text{tor}} = 1$  Тл возможны измерения с помощью ЗПТИ в диапазоне  $\rho$  от 0 до 1, с энергией пучка ионов  $\text{Ti}^+$  до 360 кэВ. Использование доступных источников напряжения без применения элегаза с напряжением до 500 кВ для ускорителя и источников напряжения с рабочим диапазоном до 50 кВ для отклоняющих пластин делает невозможным измерения в полном радиальном диапазоне при максимальном поле Т-15МД  $V_{\text{tor}} = 2$  Тл, так как это потребовало бы энергий пучка более 1МэВ. Расчёты областей плазмы, доступных для измерения, показали, что оптимальные положения вторичного ионопровода для работы в режимах с  $V_{\text{tor}} = 1$  Тл,  $I_{\text{pl}} = 1$  МА и  $V_{\text{tor}} = 2$  Тл,  $I_{\text{pl}} = 2$  МА существенно различны. Для обеспечения работы во всех режимах

предложена схема двойного вторичного ионопровода (см. рис. 1 и табл.1).

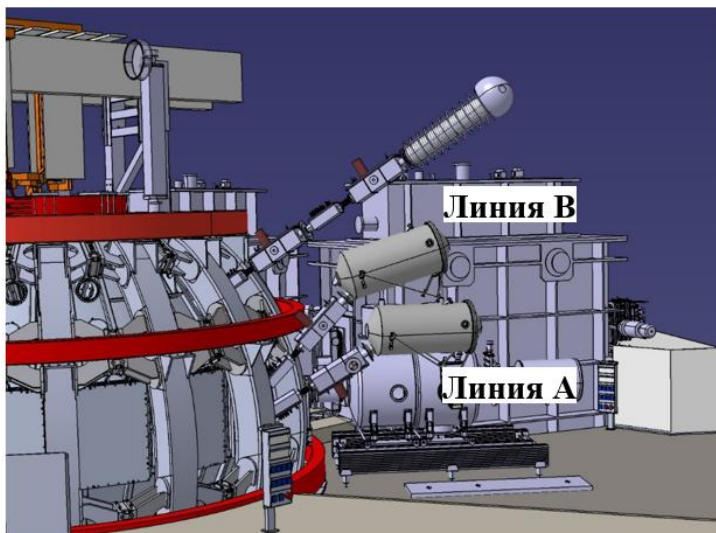


Рисунок 1. Проект размещения ЗПТИ с двойным вторичным ионопроводом на токамаке Т-15МД

Таблица 1. Положение вторичных ионопроводов

	Линия А	Линия В
Расстояние от оси токамака до точки входа в ионопровод	2.8 м	2.8 м
Высота точки входа в ионопровод над экваториальной плоскостью токамака	-0.1 м	0.2 м
Полоидальный угол наклона ионопровода от экваториальной плоскости токамака	32°	23.5°
Тороидальный угол наклона ионопровода по току плазмы	49°	26.0°

Предложенная схема позволит проводить измерения в следующих диапазонах:

- $B_{tor} = 1$  Тл,  $I_{pl} = 1$  МА:  $\rho = 0.0..1.0$ ,  $\theta_{\rho=0.7} = -40^\circ..82^\circ$ ;
- $B_{tor} = 1.5$  Тл,  $I_{pl} = 1.5$  МА:  $\rho = 0.2..1.0$ ,  $\theta_{\rho=0.7} = -23^\circ..74^\circ$ ;
- $B_{tor} = 2$  Тл,  $I_{pl} = 2$  МА:  $\rho = 0.5..1.0$ ,  $\theta = -15^\circ..50^\circ$ .

Детекторные сетки для линий А и В приведены на рис. 2.

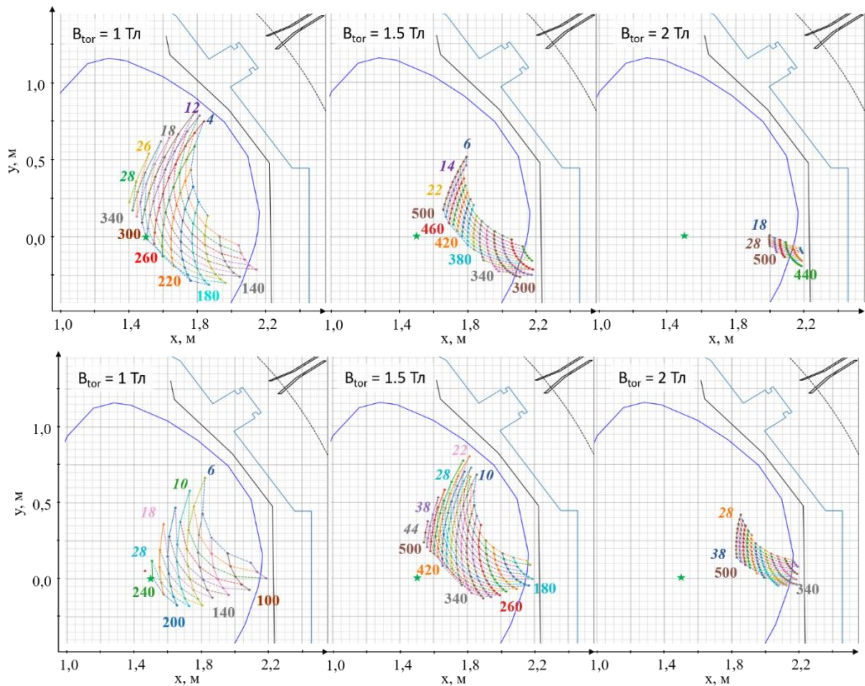


Рисунок 2. Детекторные сетки диагностики ЗПТИ на токамаке T-15MD, рассчитанные для значений магнитного поля на оси  $B_{tor}$  1, 1.5 и 2 Тл и токов плазмы  $I_{pl} = 1, 1.5$  и 2 МА для линий А и В. Курсивом подписаны напряжения на отклоняющих пластинах первичного ионопровода (кВ), прямым шрифтом – энергии пучка первичных ионов (кэВ)

## Литература

- [1]. М.А. Drabinskiy et al, Conceptual design of the heavy ion beam probe diagnostic for the T-15MD tokamak, 2019, Journal of Instrumentation
- [2]. A.V. Melnikov et al, Heavy ion beam probing—diagnostics to study potential and turbulence in toroidal plasmas, 2017, Nuclear Fusion 57 072004
- [3]. А.М. Пин, P.O. Khabanov and A. V. Melnikov, Probing ion trajectory simulations for the HIBP diagnostics at the T-15MD tokamak // Journal of Physics: Conference Series 1383 (2019) 012006

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДЕТЕКТОРА

Пурьга Е. А.<sup>1</sup>, Хильченко А.Д.<sup>1</sup>, Квашнин А. Н.<sup>1</sup>,  
Пинженин Е.И.<sup>1</sup>, Иваненко С. В.<sup>1</sup>, Зубарев П. В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, Россия, [e.a.puryga@inp.nsk.su](mailto:e.a.puryga@inp.nsk.su)*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, Россия*

На установке ГДЛ (ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия) одним из основных инструментов для регистрации продуктов термоядерной реакции является корпускулярная диагностика. Она основана на фиксации интенсивности потока частиц, возникающих в процессе взаимодействия плазмы с инжектируемыми в нее пучками нейтральных атомов. В качестве датчика используется полупроводниковый детектор производства фирмы СНИИП-ПЛЮС, формирующий токовый сигнал малой интенсивности. При напряжении смещения 40В паразитная емкость детектора имеет большую величину  $\sim 100$  пФ. Для регистрации сигнала с детектора был разработан широкополосный малозумящий предусилитель, который позволяет минимизировать влияние паразитной емкости на работу усилительного тракта [1]. Дальнейшая фиксация сигналов производится в осциллографической форме с помощью 2-канального регистратора, позволяющего оцифровывать сигналы в полосе частот 0-150 МГц, с частотой дискретизации 500 МГц и с 12-разрядным амплитудным разрешением [2].

Описанный регистратор планируется заменить на прибор с расширенным и более гибким функционалом ADC12500/2. Его цифровое ядро построено на основе ПЛИС со встроенным процессором ARM® Cortex®-A9, работающим под управлением

ОС Linux, оснащенным сетевым интерфейсом Ethernet-1000. В регистраторе реализовано несколько базовых режимов работы: однократный, страничный, ждущий циклический, с накоплением данных, а также добавлен спектроскопический режим фиксации данных. Базовые режимы работы регистратора подразумевают запись 12-разрядного потока данных от АЦП с частотой дискретизации 500 МГц в выделенную пользователем память процессора объемом до 512 Мбайт. Все параметры, характеризующие различные режимы работы (количество страниц, длительность интервала предыстории и т.д.) задаются пользователем. В спектроскопическом режиме работы в цифровом узле ADC12500/2 аппаратно реализуются алгоритмы обработки событий, направленные на фиксацию энергетического спектра частиц. При этом параллельно регистрируется энергия и временная координата каждого полезного события. Это позволяет судить об изменении интенсивности потока частиц в заданном пользователем энергетическом окне.

### **Литература**

- [1]. Пурьга Е.А., Хильченко А.Д., Квашнин А.Н., Иваненко С.В., Моисеев Д.В. // Приборы и Техника Эксперимента, Номер 1, 2022, стр. 44-57, eLIBRARY ID: 47924390
- [2]. Пурьга Е.А., Хильченко А.Д., Квашнин А.Н., Иваненко С.В., Зубарев П. В., Иванова А.А. // Приборы и Техника Эксперимента, Номер 3, 2012, стр. 75, eLIBRARY ID: 17726199



## *Микроволновые и субмиллиметровые методы диагностики*

### **СОЗДАНИЕ МОЩНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЦР ДИАПАЗОНА**

Глявин М.Ю.<sup>1</sup>, Денисов Г.Г.<sup>1</sup>, Литвак А.Г.<sup>1,2</sup>, Тай Е.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,  
Нижний Новгород, Россия, [glyavin@ipfran.ru](mailto:glyavin@ipfran.ru)*

<sup>2</sup>*ЗАО НПП ГИКОМ, Нижний Новгород, Россия*

За последние годы наметился значительный прогресс в исследовании различных конфигураций установок УТС [1], однако токамаки и стеллараторы продолжают оставаться наиболее востребованными и наиболее развитыми в плане технологических решений системами. Достижение требуемых параметров плазмы достигается с использованием различных методов, в которых существенная роль отводится электронно-циклотронному резонансному (ЭЦР) нагреву. Например, в проекте ITER было предусмотрено использование 24 гиротронных комплексов с частотой генерации 170 ГГц и мощностью в 1 МВт каждый, а сейчас обсуждается увеличение суммарно мощности ЭЦР нагрева до 70-75 МВт. В следующих поколениях термоядерных реакторов, таких как DEMO и ТРТ, требуется повышение частоты до 230-250 ГГц. Очевидно, что столь амбициозные задачи требуют как совершенствования существующих, так и создания новых гироприборов.

Современные гиротроны для УТС обеспечивают КПД комплекса на уровне 50-53% при использовании одноступенчатой рекуперации остаточной энергии электронного потока и выходной мощности 1 МВт. Дальнейшее повышение мощности во многом

ограничено тепловыми нагрузками на резонатор и коллектор. Увеличение поперечного размера резонатора требует перехода к более высоким рабочим типам колебаний и применения дополнительных методов селекции. Тепловая нагрузка на коллектор и эффективность генерации могут быть оптимизированы в системах с двухступенчатой рекуперацией энергии, однако на сегодняшний день не существует эффективных методов пространственного разделения энергетических фракций электронного потока.

Проблема повышения выходной мощности в условиях конкуренции большого числа мод может быть решена в системах использующих внешний управляющий сигнал, позволяющий осуществить работу генератора в режимах с захватом частоты. Как показали теоретические исследования [2,3] и свежие экспериментальные результаты [4,5] в режиме захвата частоты внешним сигналом мощность генерации может быть увеличена примерно на 10% за счет продвижения в область оптимальных растроек циклотронного резонанса (магнитных полей), в которой в обычных условиях наблюдалось возбуждение паразитных колебаний. Для решения этой задачи был разработан квазиоптический преобразователь мод, преобразующий входящий внешний сигнал в рабочую моду резонатора гиротрона, а также способный выводить излучение мегаваттного уровня мощности через одно или через разные вакуумные окна [6]. Отметим, что подобный преобразователь может быть использован для увеличения числа рабочих частот гиротрона, поскольку моды разного вращения могут выводиться через различные окна, каждое из которых согласовано на минимум отражений соответствующих частот.

Дополнительным бонусом работы в режиме с внешним сигналом является возможность когерентной работы большого числа гиротронов, что может быть важным для систем ЭЦР нагрева состоящих из большого числа гиротронов, поэтому обеспечение их когерентной работы является крайне важным фактором.

Как уже отмечалось, проблема создания коллектора с многоступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов пока не решена, но можно предложить альтернативный подход, связанный с формированием электронного потока с высокой долей вращательной энергии электронов и малым скоростным разбросом. Согласно теоретическим оценкам, использование оригинальной,

хотя и достаточно сложной в реализации неадиабатической системы формирования электронного потока, позволяет даже в системе с одноступенчатой рекуперацией энергии рассчитывать на достижение КПД около 65% [7].

Повышение частоты генерации требует создания сверхпроводящих магнитных систем с проходным отверстием 150-170 мм и индукцией магнитного поля 10-11 Тл. На базе магнита JASTEC 10T150 (10Тл, 150 мм) разработан разборный прототип гиротрона для ТРТ и проводятся испытания гиротрона в режиме коротких (длительность до 100 микросекунд) импульсов.

Работа финансируется в рамках проекта «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона» комплексной программы РФ "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии".

### Литература

- [1]. MKA Thumm M.K.A., Denisov G.G., Sakamoto K., Tran M.Q. // Nuclear Fusion 2019. Vol. 59 No.7. P. 073001.
- [2]. Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 9. С. 41-47.
- [3]. Bakunin V.L., Denisov G.G., Novozhilova Y.V. // IEEE Electron Device Lett. 2020. Vol. 41, No. 5. P. 777-780.
- [4]. Denisov G.G., Kuftin A.N., Manuilov V.N. et al. // Microwave and Optical Technology Letters 2020. Vol. 62. No. 6. P. 2137-2143
- [5]. Kuftin A.N., Denisov G.G., Chirkov A.V., Shmelev M.Yu., Belousov V.I., Ananichev A.A., Movshevich B.Z., Zotova I.V., Glyavin M.Yu. // IEEE Electron Device Lett. 2023. Vol. 44. DOI: 10.1109/LED.2023.3294755.
- [6]. Chirkov A.V., Denisov G.G., Kuftin A.N. // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106. No. 26. P. 263501.
- [7]. Glyavin M.Yu., Goldenberg A.L., Krupin D.S., et al. // 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 1-2

# ГИРОТРОНЫ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ С ШИРОКОПОЛОСНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ПО ЧАСТОТЕ

Зотова И.В., Глявин М.Ю., Заславский В.Ю., Федотов А.Э.,  
Розенталь Р.М., Сергеев А.С.

*Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород, Россия,*  
[zotova@ipfran.ru](mailto:zotova@ipfran.ru)

На сегодняшний день гиротроны являются наиболее мощными источниками непрерывного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн, что делает их крайне привлекательными для ряда приложений, включая диагностику плазмы и других сред. В тоже время недостатком этих приборов с точки зрения диагностических приложений является достаточно узкая (доли процента) полоса перестройки по частоте. В данном докладе представлены результаты исследований, направленных на создание гиротронов коротковолновой части миллиметрового диапазона с полосой перестройки порядка нескольких процентов при уровне выходной мощности до 10 кВт. Для этих целей предлагается два основных подхода, включая

- реализацию гиротронов с укороченными резонаторами, в которых перестройка частоты осуществляется за счет эффективного возбуждения последовательности продольных мод;
- создание гиротронов с квазиоптическими многозеркальными резонаторами, обеспечивающими большую азимутальную неоднородность поля и, следовательно, более высокую эффективность взаимодействия.

Следует отметить, что для традиционных гиротронов с закрытыми цилиндрическими резонаторами основным препятствием для реализации частотной перестройки является высокая добротность рабочего колебания с одной продольной вариацией, возбуждаемого вблизи критической частоты. С этой точки зрения обычно для обеспечения плавной частотной перестройки использовалось возбуждение высоких продольных мод с относительно низкой добротностью в длинных резонаторах [1-3].

Однако, при этом, с одной стороны, существенно увеличивается доля омических потерь, а с другой – повышается чувствительность к скоростному разбросу в электронном пучке. Обе указанные причины ведут к существенному снижению мощности генерации на высоких продольных модах. В то же время указанный недостаток может быть преодолен при использовании коротких резонаторов с длиной в несколько раз меньшей, чем оптимальная с точки зрения достижения максимального КПД [4,5]. При этом перекрытие полос генерации соседних продольных мод может быть достигнуто за счет существенного увеличения тока пучка. В этом случае мощность генерации на высоких продольных модах становится сравнима с мощностью возбуждения низшей моды, что в совокупности обеспечивает достаточно широкую полосу генерации гиротрона. Перспективность такого подхода была продемонстрирована в расчетах гиротронов с частотами 163 и 200 ГГц, а также в моделирующих экспериментах на более низких частотах [5]. К настоящему времени с использованием этого подхода изготовлен гиротрон с рабочей частотой 163 ГГц, который проходит экспериментальное тестирование.

Второй подход предполагает использование квазиоптических многозеркальных резонаторов. Следует отметить, что возможность плавной перестройки частоты для гиротронов с двухзеркальными конфокальными резонаторами показана уже достаточно давно [6]. Преимуществом таких систем является довольно низкая плотность спектра, а также возможность механической перестройки частоты за счет изменения расстояния между зеркалами. Однако основной недостаток таких систем связан с высокой азимутальной неоднородностью поля, что приводит к существенному снижению эффективности взаимодействия с трубчатыми поливинтовым электронными пучками, формируемыми на основе магнетронно-инжекторных пушек. В то же время азимутальная однородность поля может быть повышена за счет использования многозеркальных резонаторов [7]. В данной работе выполнен расчет гиротрона с рабочей частотой 200 ГГц и электродинамической системой в виде трех конфокальных резонаторов, расположенных под углом 60 градусов друг к другу. Показано, что такая конфигурация обеспечивает достаточно высокую селективность рабочего типа колебаний и одновременно позволяет существенно повысить КПД

генерации. В моделировании продемонстрирована перестройка частоты в диапазоне 200-207 ГГц с уровнем мощности 7-10 кВт.

Отметим в заключении, что в целом реализация киловаттных гиротронов с широкополосной перестройкой по частоте позволит существенно расширить область их применения, в том числе, для диагностических целей.

Работа финансируется в рамках проекта «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона» комплексной программы РФ "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии".

### Литература

- [1]. Chang T.H., Idehara T., Ogawa I., Agusu L., Kobayashi S. J.// *Appl. Phys.* 2009. Vol. 105, No. 6. P. 063304.
- [2]. Torrezan A.C., Han S.-T., Mastovsky I., Shapiro M.A., et al. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. Vol. 38, No. 6. P. 1150-1159.
- [3]. Barnes A.B., Nanni E.A., Hertzfeld J., Griffin R.G., R.J. Temkin // *J. Magn. Resonance.* 2012. Vol. 221. P. 147-153.
- [4]. Fedotov A.E., Rozental R.M., Zotova I.V., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Tarakanov V.P., Glyavin M.Yu., Idehara T.// *J. IR MM THz Waves.* 2018 Vol.39, No.10. P.975-983.
- [5]. Глявин М.Ю., Федотов А.Э., Зотова И.В., Лучинин А.Г., Проявин М.Д., Розенталь Р.М., Тараканов В.П. // *Изв. ВУЗов. Радиофизика.* 2018. Т.61, №11. С.895-899.
- [6]. Temkin R. J., Abe D. K., Barker R. J., Levush B., Nusinovich G. S., Rodgers J. C., Shapiro M., Sirigiri J. R. in *Modern Microwave and Millimeter-Wave Power Electronics*, edited by R. J. Barker, J. H. Booske, N. C. Luhmann, Jr., and G. S. Nusinovich (IEEE Press, WileyInterscience, 2005), Chap. 11.
- [7]. Nusinovich G. S.// *Physics of Plasmas.* 2018. Vol. 25 P.073104.

# ВОЗМОЖНОСТИ ГИРОТРОННОЙ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА МОЩНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

Самсонов С.В., Богдашов А.А., Гачев И.Г., Гинзбург Н.С.,  
Денисов Г.Г., Зотова И.В., Розенталь Р.М.

*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), Нижний Новгород, Россия, [samsonov@ipfran.ru](mailto:samsonov@ipfran.ru)*

В качестве одного из инструментов для диагностики высокотемпературной плазмы в современных токамаках и стеллараторах достаточно активно используются гиротроны, (см., напр., [1]), одним из существенных недостатков которых является их узкополосность. Более широкополосными разновидностями приборов гиротронного типа являются гиротронные лампы обратной волны (гиро-ЛОВ) и гиротронные лампы бегущей волны (гиро-ЛБВ). Гиро-ЛБВ, являясь усилителями, обладают возможностями генерации сигналов с произвольной модуляцией амплитуды и фазы и быстрым свипированием частоты. Данные свойства могут оказаться востребованными для улучшения ряда характеристик, используемых в настоящее время, или для развития новых методов диагностики плотной плазмы. В докладе будет представлен обзор достигнутых в настоящее время параметров giro-ЛБВ, продемонстрированных в ряде экспериментов, а также потенциальных возможностей этих приборов по увеличению выходной мощности и освоению более коротковолновых диапазонов.

В настоящее время исследования по giro-ЛБВ наиболее активно ведутся несколькими группами в КНР [2, 3], в Великобритании [4] и в Институте прикладной физики (г. Нижний Новгород) [5-9]. В США такие исследования, видимо, также ведутся, однако, с 2007 г. в открытой печати по ним практически не приводится информации. Тем не менее, именно в США giro-ЛБВ

активно используется в приложении, а именно в качестве передатчика в радаре HUSIR [10], который планируют развивать в том числе и за счет существенного (до 50 кВт) наращивания мощности gyro-ЛБВ [11].

В длинноволновой части миллиметрового диапазона (на частотах 30-50 ГГц) в экспериментах, выполненных в КНР, для gyro-ЛБВ получены импульсные выходные мощности 150-250 кВт при мгновенной ширине полосы усиления 3-4 ГГц и уровне средней мощности до 20 кВт [2]. В ИПФ РАН реализованы gyro-ЛБВ с импульсной мощностью до 160 кВт при ширине полосы усиления около 3 ГГц и средней мощности до 10 кВт. Кроме того, изготовлено несколько образцов, работающих в непрерывном режиме с мощностью более 5 кВт [5]. Важным преимуществом наших gyro-ЛБВ является работа на второй гармонике циклотронной частоты, т.е. при вдвое более низком статическом магнитном поле, что позволяет использовать несверхпроводящие соленоиды с умеренным энергопотреблением.

В 3-мм диапазоне длин волн наилучшие выходные параметры gyro-ЛБВ продемонстрированы в экспериментах группы из UESTC (КНР): выходная импульсная мощность более 100 кВт в полосе 8.5 ГГц (92-100.5 ГГц), средняя мощность 10-20 кВт, коэффициент усиления 40-60 дБ, длительность импульсов 200-2000 мкс [3].

В ИПФ РАН предложена концепция каскада из 2-х gyro-ЛБВ, который, согласно расчетам, может обеспечить импульсную выходную мощность более 200 кВт в полосе 91-99 ГГц при коэффициенте усиления 60-70 дБ и средней выходной мощности до 50 кВт [6]. В 2019 г. был испытан экспериментальный образец gyro-ЛБВ первого каскада с непрерывной выходной мощностью до 3 кВт с коэффициентом усиления 54 дБ и полосой усиления 2.5 ГГц [7].

Кроме усиления монохроматических или частотно-модулированных сигналов, gyro-ЛБВ может быть использована и в режиме автогенератора. При этом в зависимости от конфигурации цепи обратной связи могут генерироваться весьма разнообразные сигналы – от последовательности коротких (доли наносекунд) фазово-когерентных импульсов до хаотических сигналов с широким спектром [8, 9].



## Литература

- [1]. Батанов Г.М., Колик Л.В., Петров А.Е., и др. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 5. С. 395. doi: 10.1134/1.1575307.
- [2]. Y. Xu, Ya Mao, W. Wang, Y. Luo et al., IEEE Electr. Dev. Letts., 2020, v. 41, no.5, p.769. doi: 10.1109/LED.2020.2979629.
- [3]. G. Liu, W. Jiang, Y. Yao, Y. Wang, et al., IEEE Electr. Dev. Letts., 2023, v. 44, no.5, p.829. doi: 10.1109/LED.2023.3255303.
- [4]. W. He, C. R. Donaldson, A.W. Cross et al., Phys. Rev. Lett., 2017, v. 119, no. 18, p. 184801. doi: 10.1103/PhysRevLett.119.184801.
- [5]. S.V. Samsonov, I.G. Gachev, G.G. Denisov, et al. IEEE Trans. Electr. Dev., 2014, v.61, no.12, p.4264. doi: 10.1109/TED.2014.2364623.
- [6]. S.V. Samsonov, A.A. Bogdashov, G.G. Denisov, et al. IEEE Trans. Electr. Dev., 2017, v.64, no.3, p.1305. doi: 10.1109/TED.2016.2646065.
- [7]. S.V. Samsonov, G.G. Denisov, I.G. Gachev, A.A. Bogdashov, IEEE Electr. Dev. Lett., 2020, v.41, no.5, p. 773. doi: 10.1109/LED.2020.2980572.
- [8]. N.S. Ginzburg, S.V. Samsonov, G.G. Denisov, et al. Phys. Rev. Applied, 2021, v.16, no.5, p.054045.
- [9]. С.В. Самсонов, Р.М. Розенталь, А.А. Богдашов и др. Изв. вузов. Радиофизика, 2022, т.65, № 3, с. 198-211.
- [10]. M.G. Czerwinski and J.M. Usoff, Lincoln Lab J., 2014, v.21, no. 1, p. 28. doi:10.1201/b12356-3.
- [11]. M.D. Abouzahra, M.E. MacDonald, R.K. Lee et al. 2022 IEEE/MTT-S Int. Microwave Symposium - IMS 2022, Denver, CO, USA, 2022, pp. 429-432. doi: 10.1109/IMS37962.2022.9865267.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОНИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ ДВУХ СВЯЗАННЫХ МОЩНЫХ ГИРОТРОНОВ ДИАПАЗОНА 170 ГГц

А.Б.Адилова<sup>1,2</sup>, А.Г. Рожнев<sup>1,2</sup>, Н.М. Рыскин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия*

<sup>2</sup>*Саратовский филиал ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Саратов, Россия*

*Email: [AdilovaAB@sgu.ru](mailto:AdilovaAB@sgu.ru), [RozhnevAG@info.sgu.ru](mailto:RozhnevAG@info.sgu.ru),  
[RyskinNM@info.sgu.ru](mailto:RyskinNM@info.sgu.ru)*

Гиротроны являются наиболее мощными источниками излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, способными работать в длинно-импульсном и непрерывном режимах, что позволяет успешно использовать в экспериментах по управляемому термоядерному синтезу (УТС), а также в области технологии обработки материалов [1]-[3]. Основные усилия разработчиков направлены главным образом на повышение рабочей частоты, мощности и КПД. При этом для ряда приложений предполагается использование комплекса из нескольких гиротронов, работающих на общую нагрузку. Поэтому задача о взаимной синхронизации двух и более гиротронов на сегодняшний день вызывает большой интерес. Однако при этом возникает ряд фундаментальных вопросов. Прежде всего, на сверхвысоких частотах необходимо учитывать запаздывание сигнала, распространяющегося между связанными генераторами. Картина синхронизации в системах с запаздыванием имеет ряд нетривиальных особенностей по сравнению с системами с малым числом степеней свободы [4][5].

В данной работе представлены результаты теоретического и численного исследования процесса взаимной синхронизации двух мощных гиротронов. Численное моделирование проводится

на основе подходов с фиксированной и нефиксированной структурой высокочастотного (ВЧ) поля. В качестве конкретного примера рассматривается резонатор мощного гиротрона диапазона 170 ГГц с рабочей модой TE<sub>28,12</sub> для УТС [6][9]. Сопоставление результатов, полученных в рамках теорий с фиксированной и нефиксированной структурой поля, показало, что они достаточно хорошо согласуются друг с другом. Расхождения относительно невелики, например, КПД отличается примерно на 3%.

Развита модель двух гиротронов, связанных с задержкой, в которой используется функция электронной восприимчивости, рассчитанная предварительно на основе теории гиротрона с фиксированной структурой ВЧ поля. Представлены результаты моделирования для различных параметров связанных гиротронов, исследуется влияние запаздывания на структуру областей синхронизации. Построены области синфазной и противофазной синхронизации на плоскости параметров «расстройка собственных частот — коэффициент связи», проанализированы зависимости КПД и частоты в режиме синхронизации.

Следует отметить, что согласно расчетам максимальный КПД в одномодовой модели гиротрона достигается при значениях тока пучка, которые значительно превышают рабочий ток ( $> 100$  А). В такой ситуации в режиме взаимной синхронизации амплитуды полей в резонаторах связанных гиротронов увеличиваются с увеличением коэффициента связи, по крайней мере при синфазной синхронизации. Соответственно, увеличивается и КПД. Зона генерации также расширяется в область больших расстройок циклотронного резонанса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-00109.

## Литература

- [1]. Nusinovich G.S., Thumm M.K.A., Petelin M.I. //J. Infr. Millim. Terahertz Waves. 2014. Vol. 35, No. 4. P. 325–381.

- [2]. Thumm M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42, No. 3. P. 590-599.
- [3]. Glyavin M., Sabchevski S., Idehara T., Mitsudo S. // J. Infr. Millim. Terahertz Waves. 2020. Vol. 41, No. 8. P. 1022–1037.
- [4]. Adilova A.B., Ryskin N.M. // Electronics 2022. Vol. 11, No. P. 811-814.
- [5]. Adilova A.B., Balakin M.I., Gerasimova S.A., Ryskin N.M. // Chaos. 2021. Vol. 31, No. 11. 113103.
- [6]. Litvak A.G., Denisov G.G., Myasnikov V.E., et al. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2011. Vol. 32, No. P. 337–342.
- [7]. Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 12. С. 999-1011.
- [8]. Новожилова Ю.В., Денисов Г.Г., Глявин М.Ю., Рыскин Н.М., Бакунин В.Л., Богдашов А.А., Мельникова М.М., Фокин А.П. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 1. С. 4-11.
- [9]. Bakunin V.L., Glyavin M. Yu., Denisov G.G, Novozhilova Yu.V. // J. Electromag. Waves Appl. 2021. Vol. 35, No. 1. P. 19-26.

# СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ТОКАМАКА Т-15МД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ

Дрозд А.С.<sup>1,2</sup>, Сергеев Д.С.<sup>1</sup>, Бегишев Р.А.<sup>1,3</sup>, Игонькина Г.Б.<sup>1</sup>,  
Соколов М.М.<sup>1</sup>, Коршунов Н.В.<sup>1,4</sup>, Хайрутдинов Э.Н.<sup>1</sup>,  
Мялтон Т.Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИ «Курчатовский институт», Москва, РФ, [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

<sup>2</sup>НИЯУ «МИФИ», Москва, РФ, [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru)

<sup>3</sup>МФТИ, Долгопрудный, РФ, [info@mipt.ru](mailto:info@mipt.ru)

<sup>4</sup>РУДН, Москва, РФ, [information@rudn.ru](mailto:information@rudn.ru)

Для измерения среднего значения электронной концентрации плазмы в токамаке Т-15МД используется СВЧ-интерферометр на длине волны  $\lambda = 0,9$  мм. Зондирование проводится на обыкновенной волне в вертикальном направлении, через центр вакуумной камеры установки. Дополнительный набег фазы при прохождении электромагнитной волны через плазму можно считать пропорциональным средней концентрации электронов [1]:

$$\Delta\varphi = k\lambda L \langle N_e \rangle$$

где  $\Delta\varphi$  – дополнительный набег фазы,  $\lambda$  – длина волны,  $L$  – линейный размер плазмы,  $\langle N_e \rangle$  – средняя концентрация электронов,  $k = 2,82 \times 10^{-15}$  [рад  $\times$  м].

Схема СВЧ-интерферометра и системы обработки его сигналов представлена на Рис. 1. Измерения проводятся на сигнале промежуточной частоты (ПЧ) 5 МГц, получаемого путем смешения опорной и зондирующей волн СВЧ-интерферометра. Сигнал ПЧ, вместе с сигналом кварцевого генератора 10 МГц, передаются в центральную систему регистрации, где усиливаются и подаются на два фазоизмерительных блока: аналоговый фазометр [2] на базе детекторов AD8302 и цифровой фазометр на основе высокоскоростного АЦП.

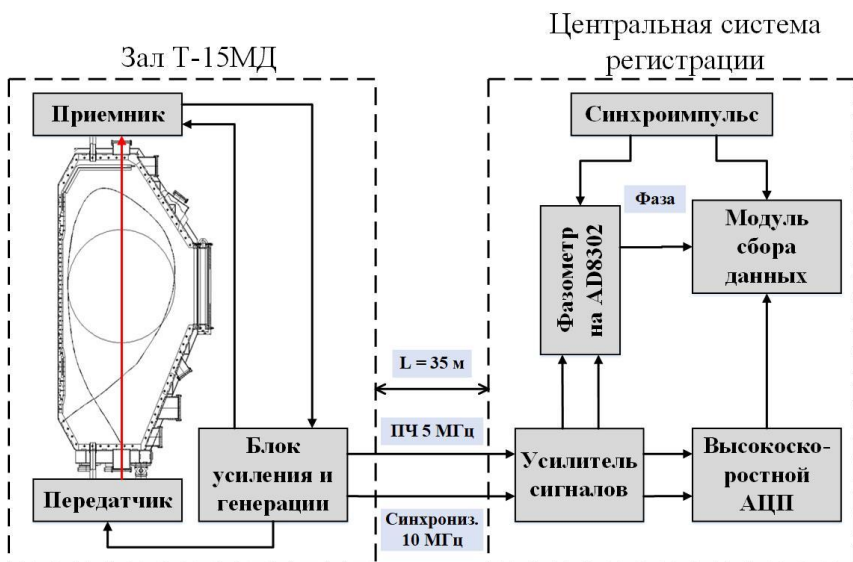


Рис. 1. Схема СВЧ-интерферометра и системы регистрации и обработки сигналов.

Отличительными особенностями интерферометра являются:

- 1) Использование твердотельной электроники, в том числе для генерации СВЧ-излучения;
- 2) Использование квазиоптических трактов только в местах ввода и приема излучения из вакуумной камеры. Все остальные сигналы (в т.ч. сигнал по опорному плечу интерферометра) передаются по коаксиальным кабелям;
- 3) Определение набега фазы фазометром на основе AD8302 осуществляется практически в режиме реального времени (с задержкой около 2 мкс). Высокое быстродействие прибора позволяет восстанавливать ход средней плотности плазмы даже при резких изменениях [3];
- 4) Для ввода и приема излучения в вакуумную камеру используются окна из плавленого кварца с резонансной толщиной для минимизации потерь мощности зондирующего излучения.

В работе представлено описание микроволнового интерферометра и система обработки сигналов СВЧ-интерферометра, представлена оценка его фазового шума и точности измерения линейной плотности плазмы токамака Т-15МД. Представлены результаты первых измерений электронной концентрации на токамаке Т-15МД. Выходные сигналы СВЧ-интерферометра представлены на Рис. 2, а на Рис. 3 – ход изменения электронной концентрации в разряде №491 на токамаке Т-15МД.

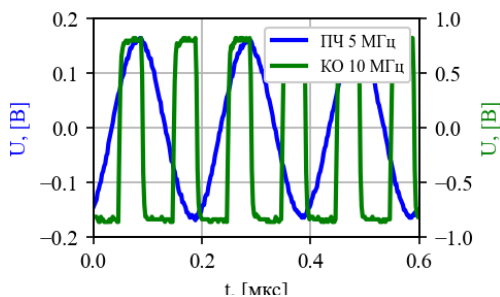


Рис. 2. Выходные сигналы СВЧ-интерферометра

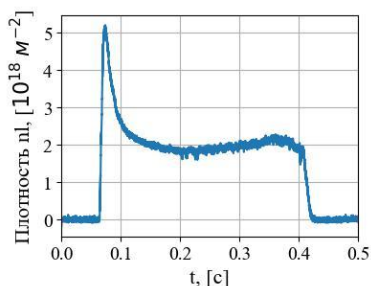


Рис. 3. Электронная концентрация в разряде №491 на Т-15МД

## Литература

- [1]. D. Veron, Opt. Commun. 10, 95–98 (1974).
- [2]. Drozd A., Sergeev D. // Rev Sci Instrum. – 2022. – Т. 93. – №. 6. – С. 063501.
- [3]. Сергеев Д.С., Дрозд А.С., Кириллов А.С., Диас Михайлова Д.Е. // ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез. – 2022. – Т. 45. – №. 3. – С. 23-28.

# РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКИ НАДТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО СПЕКТРАМ ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ И ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТОКАМАКАХ-РЕАКТОРАХ

Минашин П.В.<sup>1,2</sup>, Сдвиженский П.А.<sup>2</sup>, Кукушкин А.Б.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия,

[Minashin\\_PV@nrcki.ru](mailto:Minashin_PV@nrcki.ru)

<sup>2</sup>НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

Диагностика по электронному циклотронному (ЭЦ) излучению плазмы (ECE) и диагностика по томсоновскому рассеянию лазерного излучения (TS) успешно используются в экспериментах в различных установках (токамаки, стеллараторы) в течение многих лет. Одной из главных задач этих диагностик является измерение профиля электронной температуры плазмы. В токамаках-реакторах следующих поколений (ITER, DEMO) из-за сильного дополнительного нагрева и высоких температур плазмы (в ITER ожидается температура электронов в центре шнура  $>20$  кэВ) в работе этих диагностик могут возникнуть дополнительные проблемы. Одной из таких нерешенных проблем является существенное (не связанное с приборами или ошибками измерения) разногласие в результатах этих диагностик для плазмы с высокой электронной температурой [1], [2]. Впервые эффект систематического превышения (до 20%) электронной температуры по данным диагностики по ЭЦ-излучению по сравнению с результатами диагностики по томсоновскому рассеянию наблюдался в экспериментах на токамаке TFTR при электронной температуре  $T_e > 7$  кэВ [3], позже эффект расхождения результатов диагностик был подтвержден на токамаках JET для  $T_e > 5$  кэВ [4], [5] и FTU для  $T_e > 8$  кэВ [6] (причем в FTU температура по TS диагностике была выше на



50%, чем по данным ЕСЕ диагностики). Несмотря на то, что этот вопрос все еще остается нерешенным (см. [7], [5], [8]), ведущей гипотезой для объяснения этого эффекта является предположение о появлении в обсуждаемых экспериментах небольшой фракции электронов с немаксвелловской функцией распределения (ФР) по скоростям (хотя на данный момент нет экспериментально подтвержденного объяснения механизмов появления подобных искажений ФР по скоростям). Для повышения точности работы этих диагностик в условиях возможного отклонения ФР электронов по скоростям от максвелловской ФР была предложена комплексная диагностика надтепловых электронов по спектрам электронного циклотронного излучения плазмы и томсоновского рассеяния лазерного излучения [9].

Диагностики TS и ЕСЕ могут использоваться независимо друг от друга для определения параметров ФР электронов по скоростям [4], [10]. Для TS диагностики для восстановления параметров надтепловых электронов может использоваться алгоритм [11]. Для диагностики по ЭЦ-излучению восстановление ФР электронов по скоростям возможно с помощью измерения спектров излучения на малых гармониках ЭЦ-частоты на хордах наблюдения с наклоном относительно тороидального магнитного поля (это дает возможность проводить измерение параметров ФР для разных диапазонов энергии электронов) путем сравнения спектров ЭЦ-излучения для модельной ФР с экспериментом по алгоритму [8]. В комплексной диагностике [9] объединяются два ранее разработанных подхода [12], [11] и [13]. В объединенной диагностике TS+ЕСЕ проводится совместное самосогласованное решение обратной задачи восстановления ФР электронов по скоростям, при этом входными данными для ЭЦ-диагностики являются измеренные спектры излучения на оптически прозрачных средних и высоких гармониках основной ЭЦ-частоты.

В алгоритме [9] сначала оценивалась функция источника ЭЦ-излучения по спектральной интенсивности ЭЦ-излучения, а затем восстанавливались характеристики функции распределения

надтепловых электронов по импульсам. Здесь предложено развитие алгоритма комплексной диагностики TS+ECE [9]: (1) в качестве входных данных используются спектр ЭЦ излучения, значение температуры плазмы по данным томсоновской диагностики и заданное распределение плотности надтепловых электронов по малому радиусу плазменного шнура, (2) восстанавливаются параметры модельной ФР электронов по скоростям, представляющей собой сумму максвелловской ФР с неизвестной температурой электронов и анизотропной квазимакселловской ФР надтепловой фракции с неизвестными значениями средней продольной и поперечной энергии электронов, (3) расчеты спектров ЭЦ-излучения при решении обратной задачи выполняются с помощью кода SYNEQ [14], что позволяет точнее (по сравнению с прежним алгоритмом [9]) учитывать перенос ЭЦ-излучения от надтепловых электронов в токамаке-реакторе.

### Литература

- [1]. White A.E., et al., Proc. 17th Joint Workshop on ECE and ECRH (EC-17), 2012, EPJ Web of Conferences, 32, 03009.
- [2]. Costley A., Proc. 15th Joint Workshop on ECE and ECRH, Yosemite National Park, California, USA, 2008, World Scientific Pub Co Inc, 3-21.
- [3]. Fidone I., Giruzzi G., Taylor G., Physics of Plasmas, 1996, 3, 2331-2336.
- [4]. Beausang K.V., et al., Review of Scientific Instruments, 2011, 82, 033514.
- [5]. Fontana M., Giruzzi G., et al., Proc. 21st Joint Workshop on ECE and ECRH (EC21), 2023, EPJ Web Conferences, 277, 03006.
- [6]. Pucella G., Alessi E., Almaviva S., et al., Nuclear Fusion, 2022, 62, 042004.
- [7]. Beausang K., Ph.D. thesis, Cork, Ireland:University College Cork, 2011.

- [8]. Giruzzi G., Fontana M., et al., Proc. 21st Joint Workshop on ECE and ECRH (EC21), 2023, EPJ Web Conferences, 277, 03005.
- [9]. Sdvizhenskii P.A., Minashin P.V., Kukushkin A.B., Kurskiev G.S., et al., Proc. 42nd EPS Conference on Plasma Physics, Lisbon, Portugal, 2015, ECA, 39E.
- [10]. Taylor G., Harvey R.W., Fusion Science and Technology, 2009, 55, 64-75.
- [11]. Sdvizhenskii P.A., Kukushkin A.B., Kurskiev G.S., Mukhin E.E., et al., Journal of Physics: Conference Series, 2016, 666, 012006.
- [12]. Kurskiev G.S., Sdvizhenskii P.A., et al., Nuclear Fusion, 2015, 55, 053024.
- [13]. Minashin P.V., Kukushkin A.B., International Review of Atomic and Molecular Physics, 2013, 93-104.
- [14]. Kukushkin A.B., Proc. 14th IAEA Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Wuerzburg, Germany, 1992, IAEA, 2, 35-45

# ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЧАСТОТНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ МОД НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

А.Ю. Токарев<sup>1</sup>, А.Ю. Яшин<sup>1</sup>, Н.С. Жильцов<sup>2</sup>, К.А. Кукушкин<sup>1</sup>,  
Г.С. Курскиев<sup>2</sup>, В.Б. Минаев<sup>2</sup>, А.В. Петров<sup>1</sup>, Ю.В. Петров<sup>2</sup>,  
А.М. Пономаренко<sup>1</sup>, Н.В. Сахаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, [tokarev.ayu@edu.spbstu.ru](mailto:tokarev.ayu@edu.spbstu.ru)*

<sup>2</sup>*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

В данном докладе представлены результаты применения многочастотной диагностики доплеровского обратного рассеяния (ДОР) на сферическом токамаке Глобус-М2 для исследования периферийных локализованных мод (ELM), которые наблюдаются в режиме улучшенного удержания плазмы (H - мода) [1]. На данном токамаке установлено большое количество разнообразных диагностик для измерения параметров плазмы, в частности, два многочастотных рефлектометра с несколькими наклоненными антеннами для использования в режиме ДОР. Первый позволяет зондировать плазму на четырёх частотах: 20, 29, 39 и 48 ГГц, что соответствует периферийной области  $0.8 < \rho < 1.1$ . Второй рефлектометр использует шесть частотных каналов: 50-75 ГГц с шагом 5 ГГц, что позволяет исследовать внутренние плазменные области  $0.4 < \rho < 0.8$  [2]. Кроме того, имеется возможность использования дополнительного одночастотного рефлектометра с перестраиваемой частотой в интервале 17-26 ГГц. Благодаря одновременному использованию нескольких антенн и частот возможны наблюдения в разных областях пространства, что сильно упрощает исследования плазмы методом ДОР.

Диагностика ДОР, установленная на токамаке Глобус-М2, была использована для измерения полоидальной скорости

вращения плазмы во время и между срывами периферийных локализованных мод. Сначала были получены зависимости амплитуды и фазы принятого сигнала от времени. Они показали сильное изменение амплитуды флуктуаций концентрации и их скорости, которая с большой точностью совпадает со скоростью вращения плазмы, во время срыва ELM. Также имелась сильная зависимость наблюдаемых явлений от радиуса. По данным результатам были построены профили скорости вращения плазмы в разные фазы ELM и в разные моменты разрядов. Оказалось, что влияние ELM может быть различным: полоидальная скорость может как увеличиваться, так и уменьшаться, что соответствует разным видам ELM [3]. Кроме того, во время срыва краевой неустойчивости были обнаружены и исследованы нитевидные структуры, т.е. филаменты. По результатам измерений был сделан вывод, что установленная на сферическом токамаке Глобус-М2 диагностика ДОР является мощным средством для исследования плазмы при развитии ELM.

### Литература

- [1]. G.S. Kurskiev et al 2022 Nucl. Fusion 62 016011
- [2]. A.Y. Yashin et al 2022 JINST 17 C01023
- [3]. V.V. Solokha et al. 2023 Plasma Phys. Rep. 49 419–427

# ДИАГНОСТИКА МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ И ЛСЭ ТЕРАГЕРЦОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Сандалов Е.С.<sup>1,2</sup>, Синицкий С.Л.<sup>1,2</sup>, Аржанников А.В.<sup>1,2</sup>,  
Самцов Д.А.<sup>1</sup>, Кузнецов С.А.<sup>1,2</sup>, Калинин П.В.<sup>1,2</sup>, Степанов В.Д.<sup>1,2</sup>,  
Гинзбург Н.С.<sup>3</sup>, Песков Н.Ю.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, Россия, [E.S.Sandalov@inp.nsk.ru](mailto:E.S.Sandalov@inp.nsk.ru)*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет, Новосибирск,  
Россия, [e.sandalov@g.nsu.ru](mailto:e.sandalov@g.nsu.ru)*

<sup>3</sup> *Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,  
Нижний Новгород, Россия, [peskov@ipfan.ru](mailto:peskov@ipfan.ru)*

В настоящее время большой интерес для отечественной науки представляет задача о создании мощного источника когерентного электромагнитного излучения, работающего в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах частот. Интерес к таким источникам обусловлен большим набором фундаментальных задач и инженерно-технических приложений, среди которых можно отметить создание систем электронно-циклотронного нагрева в установках УТС и комплексов диагностики плазмы, сканирование пространства пучками излучения, визуализация скрытых объектов и т.д. В связи с этим в ИЯФ СО РАН ведутся исследования по созданию мощных источников мм- и субмм- излучения в различных схемах генерации.

В частности, на установке ГОЛ-ПЭТ (ИЯФ СО РАН) ведутся интенсивные работы по исследованию механизмов генерации ТГц излучения (диапазон 0.1-0.5 ТГц, импульсная мощность ~10 МВт, длительность ~ 0.5 мкс) при инжекции сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) (0.6-1 МэВ, 12-15 кА, 6-8 мкс, диаметр 4 см) в замагниченный

(величина магнитной индукции 4 Тл) плазменный столб с диаметром 6 см и плотностью  $n_e=10^{14}-10^{15}$  [1-3]. Применение электронного пучка (энергия электронов до 10 МэВ, ток до 2 кА, длительность до 100 нс), генерируемого в ЛИУ (ИЯФ СО РАН, РФЯЦ-ВНИИТФ) с указанными выше параметрами в сочетании с высокоселективной электродинамической системой ЛСЭ диаметром  $\sim 40-50 \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны генерируемого излучения, позволит реализовать длинноимпульсные ЛСЭ-генераторы в субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах с субгигаваттным уровнем мощности и рекордными значениями энергосодержания в импульсе излучения  $\sim 10-100$  Дж [4-6]. В исследованиях по разработке сверхмощных коротковолновых черенковских мазеров планарной геометрии, проводимых ИЯФ СО РАН и ИПФ РАН на установке ЭЛМИ, используются электронные пучки (1 МэВ / 10 кА / 3 мкс) ленточной конфигурации, поперечный размер которых достигает до 20 см [7]. Согласно теоретическим работам, использование двумерно-периодических брэгговских структур позволяет формировать волновые потоки в частотном диапазоне до 300 ГГц с субгигаваттным уровнем мощности.

Общей задачей для всех вышеописанных схем генерации мощных потоков ТГц излучения является создание частотно-селективной диагностики этого излучения. В рамках доклада будут представлены диагностические комплексы, используемые в ИЯФ СО РАН для регистрации свойств ТГц излучения: 1) система регистрации спектральных свойств широкополосного излучения из установки ГОЛ-ПЭТ- полихроматор на основе диодов Шоттки (до 0.5 ТГц), 2) двухканальный криогенный детектор ТГц-излучения из ЛСЭ в частотном диапазоне до 3 ТГц, 3) гетеродинная система для регистрации свойств излучения из МСЭ ( $\sim 75-150$  ГГц). Для выделения нужных спектральных диапазонов излучения в интервале  $0.5 \div 1.0$  ТГц будут использованы полосовые фильтры на основе частотно-селективных тонкопленочных структур, с шириной полосы пропускания 10%.

Работа в части разработки диагностики свойств излучения, формируемого в планарных генераторах с двумерной РОС, выполнена при частичном финансировании РНФ (грант № 23-19-00370).

## Литература

- [1]. Arzhannikov et al., "Beam-Plasma Interaction System Providing Ten Megawatt Power of THz Radiation Flux in Microsecond Pulse," 2021, pp. 1-2, doi: 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567120.
- [2]. A. V. Arzhannikov et al., "Energy Content and Spectral Composition of a Submillimeter Radiation Flux Generated by a High-Current Electron Beam in a Plasma Column With Density Gradients," in IEEE TPS, vol. 50, no. 8, pp. 2348-2363.
- [3]. A. Arzhannikov et al., "Source of submm wave flux with multimegawatt pulse power based on relaxation of a relativistic electron beam in a plasma column," 2023, pp. 1-2, doi: 10.1109/IVEC56627.2023.10157596.
- [4]. E. S. Sandalov et al., "Transformation and Adaptation of the Kiloampere Electron Beam Generated in the Linear Induction Accelerator for Pumping a Terahertz FEL," 2023, pp. 1-2, doi: 10.1109/IVEC56627.2023.10157836.
- [5]. Е. С. Сандалов и др., Килоамперный электронный пучок линейного индукционного ускорителя- как драйвер для субмиллиметрового лазера на свободных электронах, Известия РАН. Серия физическая, 2023, Т. 87, № 5, стр. 652-659
- [6]. Сандалов Е.С. и др., Исследование инкремента поперечной неустойчивости килоамперного электронного пучка в ЛИУ для его применения в терагерцовом ЛСЭ. СФЖ. 2022;17(2):16-29. <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-2-16-29>
- [7]. N. Y. Peskov et al., "Powerful W-band Planar Cherenkov Maser: Design, Simulations and State of Experiments," 2021, pp. 1-2, doi: 10.1109/IVEC51707.2021.9722547.



# РАЗРАБОТКА КВАЗИОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МНОГОЧАСТОТНОГО ГИРОТРОНА В ДИАПАЗОНЕ 175–250 ГГц

А.П. Гаштури, М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов, А.С. Зуев,  
Д.И. Соболев, А.П. Фокин

*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

Ключевым приложением современных гиротронов является электронно-циклотронный (ЭЦ) нагрев плазмы в установках термоядерного синтеза (УТС) [1]. Для этой задачи создаются гиротроны мегаваттного уровня мощности, работающие в режиме длинных (до 1000 секунд) импульсов. Кроме нагрева плазмы, гиротроны могут быть использованы для активной диагностики плазмы и подавления различных неустойчивостей.

В зависимости от магнитного поля токамаков и стеллараторов, гиротроны, разрабатываемые для установок УТС, значительно отличаются рабочей частотой. В частности, для проекта Tokamak Energy частота составляет 105/140 ГГц, для ITER и KSTAR — 170 ГГц, а для проектов TPT и DEMO рассматриваются частоты в интервале 230–250 ГГц. Очевидно, что в перспективе прослеживается тенденция повышения рабочей частоты (и мощности) генераторов.

В этой связи весьма привлекательной является концепция мегаваттного гиротрона с внешним сигналом. Внешний монохроматический сигнал может быть использован для стабилизации частоты излучения, повышения эффективности и мощности выходного излучения [2]. Уровень мощности внешнего сигнала, как правило, составляет несколько процентов от мощности управляемого гиротрона [3].

При разработке таких гиротронов заметно усложняется квазиоптическая система ввода-вывода излучения. В работе [4] была предложена система, предусматривающая два канала, соответствующих модам разного вращения. В такой системе

возможно использование либо общего выходного окна (тогда лучи выводятся под небольшим углом по отношению к нормали), либо двух окон. Для гиротронов мегаваттного уровня мощности вакуумные окна выполняются из синтетического алмаза. Толщина окна оптимизируется для достижения достаточной прочности и минимального отражения сигнала, что с учетом диэлектрической проницаемости алмаза, приводит к относительно узкой полосе прозрачности. Благодаря достаточному плотному спектру мод в сверхразмерных резонаторах современных гиротронов и развитым методам селекции оказывается возможным обеспечить безотражательный вывод нескольких мод через одно окно (например, 105 ГГц и 140 ГГц). Однако, для целого ряда приложений желательно обеспечить меньшую разность между генерируемыми частотами и большее количество рабочих частот от одного прибора. Использование окон разной толщины и генерация мод разного вращения, очевидно, позволяет решить указанную задачу.

В качестве примера, в докладе рассматривается вариант многочастотного генератора на базе успешно испытанного в ИПФ РАН/ГИКОМ гиротрона с частотой 250 ГГц и мощностью до 330 кВт [5, 6].

Анализ спектра собственных колебаний выявил серию рабочих мод, которые могут с примерно равной эффективностью возбуждаться при фиксированных параметрах электронного потока (радиус инжекции, доля вращательной энергии и скоростной разброс). С учетом этого анализа двунаправленный квазиоптический преобразователь оптимизировался для мод  $TE_{13,6}$  (175.7 ГГц),  $TE_{17,6}$  (201.4 ГГц),  $TE_{-15,7}$  (206 ГГц),  $TE_{18,7}$  (225.6 ГГц),  $TE_{-16,8}$  (229.8 ГГц),  $TE_{19,8}$  (249.5 ГГц). В данной записи знаки “+” и “-” соответствуют противоположным направлениям вращения рабочих мод в пространстве взаимодействия. Соответствующая толщина окон 2.51 мм и 2.45 мм. Для расчета преобразователя был использован метод оптимального синтеза [7] совместно с методом интегрального уравнения электрического поля и принципом физической оптики [8]. Методы трехмерного моделирования позволили сначала

синтезировать, а потом провести детальный анализ преобразователя, состоящего из излучателя и четырех профилированных зеркал для всех указанных мод.

Спроектированная система позволяет выводить излучение с минимальными потерями на шести указанных частотах. Разработанный преобразователь может быть встроен в существующий гиротрон [5] без модификации электронно-оптической, магнитной, коллекторной подсистем гиротрона. Такой гиротрон может быть использован как гиротрон-драйвер для гиротронных комплексов в широком диапазоне частот [1, 9].

Работа выполнена в рамках темы ИПФ РАН FFUF-2022-0007.

### Литература

- [1]. Litvak A.G., Denisov G.G., Glyavin M.Y. // IEEE Journal of Microwaves. 2020. Vol. 1, no. 1. P. 260–268.
- [2]. A.N.Kuftin, G.G.Denisov, A.V.Chirkov, et al. // Electron Device Letters, 2023, DOI:10.1109/LED.2023.3294755
- [3]. Bakunin V.L., Denisov G.G., Novozhilova Yu.V. // IEEE Electron Device Letters. 2020. Vol. 41, no.5. P. 777–780.
- [4]. Chirkov A.V., Denisov G.G. and Kuftin A.N. // Applied Physics Letters. 2015. Vol. 106, no. 26. P. 263501.
- [5]. Denisov G.G., Glyavin M.Yu., Fokin A.P., et al. // Review of Scientific Instruments. 2018. Vol. 89, no 8. P. 084702.
- [6]. Zuev A.S., Fokin A.P., Ananichev A.A., et al. // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2021. Vol. 42. P. 1131–1141.
- [7]. Sobolev D.I., Denisov G.G. // IEEE Transactions on plasma science. 2010. Vol. 38, no. 10. P. 2825–2830.
- [8]. Гаштури А.П., Соколев Д.И. // Известия вузов. Радиофизика. 2022. Т. 65, № 5–6. С. 484–493.
- [9]. Denisov G., Kuftin A., Manuilov V., et al. // Nuclear Fusion. 2022. Vol. 62. P. 036020.

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИНХРОНИЗАЦИИ ГИРОТРОНА В РЕЖИМЕ ЖЕСТКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО СИГНАЛА

Григорьева Н.В.<sup>1,2</sup>, Новожилова Ю.В.,<sup>1</sup> Рыскин Н.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,  
Нижний Новгород, Россия, [preobny@gmail.com](mailto:preobny@gmail.com)*

<sup>2</sup>*Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,  
Саратов, Россия*

Одной из наиболее важных областей применения гиротронов является электронно-циклотронный нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) [1]. В этих установках, как правило, используются комплексы из большого числа гиротронов, поэтому обеспечение их когерентной работы является крайне важным фактором. В частности, привлекла внимание идея синхронизации мощного гиротрона сигналом гиротрона-драйвера со стабилизированной частотой [2], [3]. Для решения этой задачи был разработан квазиоптический преобразователь мод, преобразующий входящий внешний сигнал в рабочую моду резонатора гиротрона, а также способный выводить излучение мегаваттного уровня мощности через одно и то же вакуумное окно [5]. Были проведены демонстрационные эксперименты в более низкочастотном диапазоне 35 ГГц [5], а в самое последнее время — эксперимент по синхронизации мощного гиротрона с частотой 170 ГГц, под действием входного сигнала маломощного стабилизированного гиротрона-драйвера [5].

Исследование синхронизации гиротрона внешним сигналом является существенно более сложной задачей по сравнению с другими радиофизическими и электронными генераторами. Прежде всего, максимальный КПД в гиротроне, как правило, достигается в режиме жесткого возбуждения. Картина синхронизации в генераторе с жестким возбуждением

имеет ряд принципиальных особенностей [7]. Кроме того, в современных гиротронах со сверхразмерными резонаторами обостряется проблема конкуренции мод. Известно, что воздействие внешним сигналом помогает подавить паразитные моды и в ряде случаев способствует повышению КПД генерации [3].

В связи с этим, исследование фундаментальных закономерностей синхронизации гиротрона при помощи методов теории колебаний и нелинейной динамики представляет очевидный интерес. Исследование синхронизации в гиротроне с фиксированной структурой ВЧ поля можно существенно упростить, если функцию электронной восприимчивости, определяющую мощность взаимодействия пучка с полем резонатора, выразить как функцию амплитуды поля. При этом ряд основных результатов можно получить аналитически, не прибегая к численному моделированию уравнений, описывающих динамику системы. В работе [9] на основе данной модели были исследованы режимы синхронизации гиротрона при различных параметрах внешнего воздействия.

В данной работе теоретически и численно исследуются режимы синхронизации мощного гиротрона диапазона 170 ГГц с рабочей модой  $TE_{28,12}$ . Выявлены основные сценарии перехода к режиму синхронизации. Исследовано влияние различных управляющих параметров (ток пучка, расстройка циклотронного резонанса, амплитуда и частота внешнего сигнала и др.) на области устойчивости синхронных режимов. Анализируется возможность повышения КПД и подавления паразитных мод. Также исследуется влияние сценария включения гиротрона на устойчивость рабочей моды.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 22-22-00603.

## Литература

- [1]. Thumm M.K.A., Denisov G.G., Sakamoto K., Tran M.Q. // Nuclear Fusion 2019. Vol. 59 No.7. P. 073001.

- [2]. Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 9. С. 41-47.
- [3]. Denisov G.G., Kuftin A.N., Manuilov V.N. et al. // Microwave Optical Technol. Lett. 2020. Vol. 62. No. 6. P. 2137-2143.
- [4]. Chirkov A.V., Denisov G.G., Kuftin A.N. // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106. No. 26. P. 263501.
- [5]. Бакунин В.Л., Гузнов Ю.А., Денисов Г.Г., Зайцев Н.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. Вып. 11. С. 38–45.
- [6]. Kuftin A.N., Denisov G.G., Chirkov A.V., Shmelev M.Yu., Belousov V.I., Ananichev A.A., Movshevich B.Z., Zotova I.V., Glyavin M.Yu. // IEEE Electron Device Lett. 2023. Vol. 44. DOI: 10.1109/LED.2023.3294755.
- [7]. Yakunina K.A., Kuznetsov A.P., Ryskin N.M. // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22. No. 11. P. 113107.
- [8]. Bakunin V.L., Denisov G.G., Novozhilova Y.V. // IEEE Electron Device Lett. 2020. Vol. 41, No. 5. P. 777-780.
- [9]. Григорьева Н.В., Рыскин Н.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2022. Т. 65, № 5. С. 406–419.

# МОЩНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ W – ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПЛАНАРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ

В.Ю. Заславский, А.В. Палицин, Ю.В. Родин, М.Б. Гойхман,  
А.В. Громов, А.Н. Панин

*Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород, Россия,  
[zas-vladislav@ipfran.ru](mailto:zas-vladislav@ipfran.ru)*

Создание мощных (10 – 100 МВт) импульсных источников когерентного электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн является актуальной задачей электроники больших мощностей. Потребность в таких источниках обусловлена рядом фундаментальных задач и практических приложений, включая электронно-циклотронный нагрев плазмы, фотохимию, биофизику, новые системы локации, визуализацию скрытых объектов и т.д. Для решения поставленной задачи в работе предлагается разработка мощных планарных генераторов поверхностной волны мм и суб-мм диапазонов на основе традиционных однопериодических [1] и новых двоякопериодических замедляющих структур, реализующих двумерную распределенную обратную связь (РОС) [2].

Генераторы поверхностной волны представляют собой одну из разновидностей черенковских генераторов, в которых прямолинейный электронный пучок возбуждает медленную волну, распространяющуюся вдоль периодически-гофрированной поверхности. Отличительной особенностью генераторов поверхностной волны является замедление основной гармоники поля, что существенно повышает импеданс связи с электронным потоком. Кроме того, системы формирования прямолинейных электронных пучков значительно упрощаются по сравнению, например, с электронно-оптическими системами гиротронов и мазеров на свободных электронах, а также снижаются требования к разбросу параметров пучков. Соответственно, очевидным достоинством генераторов поверхностной волны является простота

и компактность, что является важным фактором с точки зрения потенциальных приложений.

К настоящему времени проведено достаточно большое число экспериментальных исследований этого класса генераторов как в субрелятивистской, так и в релятивистской областях энергий частиц [3, 4]. Дальнейшее радикальное увеличение мощности, так и укорочение длины волны в этом классе источников может быть достигнуто только путем увеличения сверхразмерности пространства взаимодействия, что требует обеспечения селекции мод по поперечному индексу.

При умеренной сверхразмерности указанную трудность удается преодолеть в известной схеме многоволновых черенковских генераторов (МВЧГ), в которых когерентная структура поля формируется самим электронным потоком. В отличие от МВЧГ использование двумерной РОС предполагает обеспечение пространственной когерентности излучения за счет использования высокоселективных электродинамических систем – двумерных брэгговских резонаторов планарной геометрии. Указанные резонаторы представляют собой пластины с двоякопериодической гофрировкой. На такой структуре поперечные (по отношению к направлению поступательного движения частиц) потоки электромагнитной энергии обеспечивают синхронизацию излучения различных частей широкого электронного пучка. При этом при достаточной глубине гофра над поверхностью двумерного брэгговского резонатора формируются медленные прижатые волны, которые могут возбуждаться прямолинейным электронным потоком.

Теоретический анализ релятивистских генераторов поверхностной волны проведен на основе квазиоптического подхода, в рамках которого поля излучения представляются в виде нескольких волновых пучков, распространяющихся в различных направлениях и связанных на гофрированной поверхности [1, 2]. В каноническом варианте на однопериодической гофрированной поверхности связываются два встречных волновых пучка, формируя поверхностную волну. В новой двумерной модификации на двумерно-периодической гофрировке при специально подобранных периодах возникает связь четырех волновых потоков. Таким образом, нелинейная динамика генераторов поверхностной волны



описывается системой связанных параболических уравнений в совокупности с усредненными уравнениями движения частиц и представляет собой двух или трехмерную нестационарную нелинейную задачу. Результаты теоретического анализа с помощью усредненных моделей сопоставлены с результатами прямого численного моделирования в рамках коммерческого PIC кода CST Studio Suite.

В экспериментальной части работы проведено исследование генераторов поверхностной волны  $W$  – диапазона с ленточным сильноточным релятивистским электронным пучком формируемым ускорителем СИНУКИ (ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1 кА /600 кэВ/ 17 нс). Использование планарной геометрии пространства взаимодействия позволяет обеспечить эффективную селекцию мод по широкой поперечной координате за счет использования открытого волновода (ширина электродинамической системы  $\sim 8$  длин волн). В эксперименте получен стабильный режим одномодовой генерации на частоте 75 ГГц с длительностью импульса около 5 нс. Выходная мощность, измеренная калориметрическим методом, достигала 50 – 60 МВт, что демонстрирует возможность эффективного электронно-волнового взаимодействия в указанном классе приборов с КПД  $\sim 10\%$ .

Работа финансируется в рамках проекта «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона» комплексной программы РФ "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии".

## Литература

- [1]. N.S. Ginzburg, A.M. Malkin, A.S. Sergeev, V.Yu. Zaslavsky. // Appl. Phys. Lett., 2011, vol.99, art.no.121505, doi: 10.1063/1.3641868.
- [2]. N.S. Ginzburg, A.M. Malkin, A.S. Sergeev, V.Yu. Zaslavsky. // Appl. Phys. Lett., 2012, vol.100, no.14, art.no.143510, doi: 10.1063/1.3701580.
- [3]. V.A. Cherepenin, // Physics - Uspekhi, 2006, vol.49, no.10, pp.1097-1102, doi: 10.1070/PU2006v049n10ABEH006109.
- [4]. J. Wang, G. Wang, D. Wang, S.Li, P.Zeng, // Sci. Reports, 2018, vol.8, no.1, pp.1-7, doi: 10.1038/s41598-018-25466-w.

# **МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА НА УСТАНОВКЕ ИТЭР**

Миронов А.Ю., Нагорный Н.В., Миронова Е.Ю., Семёнов И.Б.,  
Портоне С.С.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,  
[A.Mironov@iterrf.ru](mailto:A.Mironov@iterrf.ru)*

Автоматизированная система управления и защиты гиротронного комплекса (АСУЗ ГК) является одной из частей системы электронно-циклотронного нагрева и поддержания тока, которая должна обеспечивать радиочастотный нагрев и поддержание тока в плазме установки ИТЭР. В рамках обязательств Российской Федерации в международном проекте, на площадку ИТЭР планируется поставка четырех АСУЗ ГК.

Первая АСУЗ ГК разрабатывалась более восьми лет и осенью 2022 года успешно прошла заводские приемочные испытания с участием представителей международной организации ИТЭР. Ввиду того, что часть оборудования, которое использовалось в первой АСУЗ ГК уже снято с производства, а программное обеспечение сильно устарело, появилась необходимость провести модернизацию программно-аппаратной архитектуры первой АСУЗ ГК для дальнейшего ее использования в последующих автоматизированных системах управления и защиты гиротронного комплекса.

В рамках модернизации программно-аппаратной архитектуры первой АСУЗ ГК был проведен сравнительный анализ с целью поиска современной замены в части медленных контроллеров, а также обновления программного обеспечения в части CODAC до самой актуальной версии. В результате проведенного анализа, была предложена обновленная

архитектура АСУЗ ГК, а также представлен план по ее внедрению в последующие АСУЗ ГК.

В докладе представлена обновленная программно-аппаратная архитектура автоматизированной системы управления и защиты гиротронного комплекса, а также план по ее внедрению для использования в последующих АСУЗ ГК.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» в рамках Государственного контракта № Н.4а.241.19.23.1014 от 18.01.2023 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовке к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

# ВОЛНОВОДНЫЙ РЕЖЕКТОРНЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

Палицин А.В.<sup>1</sup>, Родин Ю.В.<sup>1</sup>, Гойхман М.Б.<sup>1</sup>, Громов А.В.<sup>1</sup>,  
Гаштури А.П.<sup>1</sup>, Проявин М.Д.<sup>1</sup>, Панин А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия, [pal@ipfran.ru](mailto:pal@ipfran.ru)

<sup>2</sup>ИФМ РАН, Нижний Новгород, Россия, [panin@ipmras.ru](mailto:panin@ipmras.ru)

Узкополосное излучение мощных гиротронов используется для нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза, в частности, в проекте ITER [1] и планируется к применению в перспективном прототипе промышленного термоядерного реактора следующего поколения DEMO [2]. В системах микроволновой диагностики таких установок в целях защиты высокочувствительной приемной аппаратуры необходимо использовать режекторные фильтры [3] для подавления мощного излучения гиротронов. В докладе представлены результаты численного моделирования многорезонаторных волноводных режекторных фильтров с центральной частотой 240 ГГц, а также результаты измерения характеристик изготовленного однорезонаторного прототипа таких фильтров.

Сочетание пирамидальной формы многомодовых резонаторов и расположения отверстий связи [4] обеспечивает селективное возбуждение колебаний с единственной поперечной структурой полей, что позволяет значительно увеличить размер резонаторов и, соответственно, величину подавления и(или) частоту режекции. В предлагаемой конфигурации фильтра спектр всех собственных колебаний каждого из резонаторов состоит из более чем 20 колебаний в диапазоне частот от 200 ГГц до 285 ГГц. Тем не менее, за счет выбора расположения отверстия связи на одной из граней усеченной пирамиды, углов раскрыва пирамиды и формы верхней грани можно получить селективное возбуждение лишь одного колебания в данном диапазоне частот.

Расчеты проводились как без учета омических потерь с помощью разработанного метода [5], основанного на методе моментов с согласованием мод [6], так и с помощью коммерческого пакета ANSYS Electromagnetics Suite 2019 R3 software (Customer

Number 280108), где учитывались омические потери. Разработанный метод требует меньшее количество машинных ресурсов по сравнению с методами конечных элементов, т.к. сетка строится только на поверхности, а не в объеме. Решение соответствующего матричного уравнения полностью описывает поле внутри области моделируемого устройства, а также модовый состав на волноводных входах и выходах. Затраты памяти и количество операций также может быть снижено, соответственно, размеры поверхностей могут достигать  $10^5$  длин волн даже при расчетах на персональном компьютере. Отметим также, что для разработанного метода существуют перспективные способы ускорения, что делает его полезным инструментом для широкого круга сверхразмерных задач.

Для четырехрезонаторного фильтра с медными стенками в численном моделировании получено подавление -135 дБ при ширине полосы порядка 600 МГц по уровню -90 дБ. Однорезонаторный прототип режекторного фильтра с пирамидальной формой многомодового резонатора был изготовлен методом полимерной 3D печати с последующей металлизацией поверхности [7]. В тестовых измерениях для данного прототипа получено подавление -27 дБ на частоте 240 ГГц.

Работа финансируется в рамках проекта «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона» комплексной программы РФ "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии".

## Литература

- [1]. C. Darbos, F. Albajar, T. Bonicelli et al. Status of the ITER electron cyclotron heating and current drive system. *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*, 2016, 37, pp. 4–20.
- [2]. P.R. Garabedian, G.B. McFadden. Design of the DEMO fusion reactor following ITER. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 114(4), pp.229-236, 2009 Jul-Aug.
- [3]. Y.Y. Danilov, G.G. Denisov, M.A. Khozin et.al. Millimeter-wave tunable notch filter based on waveguide extension for plasma diagnostics. *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 42, No 6, pp. 1685–1689, June 2014.

- [4]. Гойхман М.Б., Громов А.В., Палицин А.В., Родин Ю.В. Перестраиваемый полосно-запирающий (режекторный) волноводный фильтр. Патент РФ RU2740684C1. 2021.01.19.
- [5]. A. P. Gashturi, A.V. Palitsin, M.B. Goykhman et al. Microwave Notch Filters for Plasma Diagnostics, Numerical Simulation by Method of Moments with Mode Matching. 2021 46th Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Chengdu, China, 2021, pp. 1-2
- [6]. A. Belenguer, H. Esteban, V.E. Boria et al. Hybrid mode matching and method of moments method for the full-wave analysis of arbitrarily shaped structures fed through canonical waveguides using only electric currents. IEEE TMTT, vol. 58, no. 3, pp. 537-544, 2010.
- [7]. M.D. Proyavin, M.V. Morozkin, N.S. Ginzburg et al. Experimental studies of microwave tubes with components of electron–optical and electrodynamic systems implemented using novel 3D additive technology. Instruments 6(4):81. DOI:10.3390/instruments6040081

# СВЕРХМОЩНЫЕ ЧЕРЕНКОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА С ДВУМЕРНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Песков Н.Ю.<sup>1,2</sup>, Заславский В.Ю.<sup>1,2</sup>, Гинзбург Н.С.<sup>1,2</sup>,  
Денисенко А.Н.<sup>1</sup>, Проявин М.Д.<sup>1</sup>, Сергеев А.С.<sup>1</sup>,  
Аржанников А.В.<sup>2</sup>, Калинин П.В.<sup>2</sup>, Сандалов Е.С.<sup>2</sup>,  
Синицкий С.Л.<sup>2</sup>, Степанов В.Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,  
Н.Новгород, Россия, [peskov@ipfran.ru](mailto:peskov@ipfran.ru)*

<sup>2</sup>*Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН,  
Новосибирск, Россия, [arzhani@ngs.ru](mailto:arzhani@ngs.ru)*

Создание мощных источников когерентного электромагнитного излучения, работающих в коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметровом диапазонах, является одной из ключевых задач современной электроники больших мощностей. Потребность в таких источниках обусловлена широким кругом фундаментальных задач и инженерно-технических приложений, включая создание электронно-циклотронных систем нагрева плазмы в установках УТС, а также систем стабилизации и диагностики плазмы.

Рекордный (гигаваттный) уровень импульсной мощности реализован в настоящее время в сантиметровом диапазоне длин волн в релятивистских генераторах черенковского типа на основе сильнооточных электронных пучков. Однако продвижение подобных источников в более коротковолновые диапазоны неизбежно приводит к увеличению их сверхразмерности и, таким образом, потере когерентности излучения.

Оригинальная концепция мощных импульсных пространственно-развитых релятивистских мазеров успешно развивается на протяжении ряда лет в сотрудничестве ИПФ РАН (Н.Новгород) и ИЯФ СО РАН (Новосибирск). Отличительной чертой проводимых исследований является использование

сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП) ленточной или трубчатой геометрии, что позволяет наращивать полную мощность генераторов путем увеличения одного из его поперечных размеров при сохранении умеренных плотностей тока и напряженностей электромагнитных полей. В условиях существенной сверхразмерности когерентность излучения достигается путем использования двумерной распределенной обратной связи (РОС). Для реализации последней используются двумерные (двумерно-периодические) брэгговские структуры, в которых возникают поперечные волновые потоки, синхронизирующие излучение интенсивных пространственно-развитых РЭП.

Исследование мощных черенковских генераторов цилиндрической геометрии с двумерной РОС проводится в ИПФ РАН на основе ускорителя «Синус-6» 0.5 МэВ / 5 кА / 25 нс, формирующего трубчатый РЭП с диаметром около 40 мм. В качестве режима работы генераторов выбран « $\pi$ -вид» (так называемые генераторы поверхностной волны), характеризующийся замедлением основной гармоники поля и обладающий высоким импедансом связи с электронным потоком. Ключевым элементом электродинамической системы служит двумерно-периодическая структура, которая в генераторах данного типа совмещает в себе свойства замедляющей системы, создающей условия эффективного черенковского взаимодействия с сильноточным прямолинейным РЭП, и высокодобротного резонатора, обеспечивающего селективное возбуждение рабочей моды в условиях существенной сверхразмерности пространства взаимодействия. Для однонаправленного вывода излучения используется рефлектор брэгговского типа, установленный с катодной стороны пространства взаимодействия.

В ходе проведенных экспериментов реализован черенковский генератор поверхностной волны W-диапазона (рабочая частота около 75 ГГц). При поперечном размере (диаметре) системы  $\varnothing \sim 10\lambda$  (периметр  $\sim 30$  длин волн  $\lambda$ ) получена стабильная узкополосная генерация с рекордным для указанного диапазона уровнем выходной мощности  $\sim 150$  МВт. В



соответствии с результатами моделирования в экспериментах наблюдалось возбуждение основной моды двумерно-периодической замедляющей системы, обеспечивающей азимутально-симметричную структуру выходного излучения. Длительность СВЧ-импульсов составляла до 10 нс, а измеренная с использованием метода гетеродинирования ширина спектра излучения близка к теоретическому пределу для импульсов данной длительности.

В настоящее время экспериментальные исследования цилиндрических черенковских мазеров с двумерной РОС перенесены в G-диапазон (рабочая частота 150 ГГц), сверхразмерность генераторов составляет  $\varnothing \sim 20\lambda$  (периметр  $\sim 60\lambda$ ). В начальных экспериментах в расчетной области параметров получена мощная узкополосная генерация. Проводится оптимизация параметров, а также измерения спектрального состава и мощности выходного излучения. Следует отметить, что для изготовления двумерно-периодических замедляющих структур используется новая аддитивная технология компьютерной фотополимерной печати с последующим нанесением медного слоя.

Проекты сверхмощных коротковолновых черенковских мазеров планарной геометрии разрабатываются в совместных экспериментах ИЯФ СО РАН и ИПФ РАН на основе ускорительного комплекса «ЭЛМИ» 1 МэВ / 10 кА / 3 мкс, который позволяет формировать ленточные электронные пучки с поперечным размером до 20 см. Моделирование показывает, что в данной схеме генераторов может быть достигнут ГВт-уровень мощности в W-диапазоне (рабочая частота 75 ГГц) и мощность на уровне до  $\sim 0.6$  ГВт и  $\sim 0.3$  ГВт при продвижении в G (частота 150 ГГц) и J (частота 300 ГГц) диапазоны соответственно. При этом, согласно проведенному моделированию, использование планарных замедляющих структур с двумерно-периодической гофрировкой, реализующих механизм двумерной РОС, позволяет обеспечить высокие когерентные свойства излучения и устойчивость одномодового режима генерации при поперечных размерах (ширине) системы  $L/\lambda \sim 100 - 200$ .

В настоящее время изготовлены все компоненты генератора W-диапазона, в электронно-оптических экспериментах продемонстрировано формирование ленточного РЭП с приемлемыми для дальнейшего использования в разрабатываемых генераторах параметрами. Начата сборка генератора для его тестирования на высоком уровне мощности.

Работы проводятся при поддержке Государственного задания ИПФ РАН (№ 0030-2021-0027, программа «Росатом») в части создания мощных черенковских мазеров цилиндрической геометрии и РНФ (грант № 23-19-00370) в части разработки планарных генераторов с двумерной РОС.

# РЕЗОНАТОРЫ С ФАЗОВЫМИ КОРРЕКТОРАМИ ДЛЯ МОЩНЫХ ГИРОТРОНОВ

Савилов А.В.<sup>1</sup>, Ошарин И.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород,  
Российская Федерация, [savilov@ipfran.ru](mailto:savilov@ipfran.ru)*

Использование коротких нерегулярностей (фазовых корректоров и селектирующих элементов) относительно недавно предложено для относительно маломощных гиротронов, работающих на высоких циклотронных гармониках в субтерагерцовом и терагерцовом частотных диапазонах, в качестве путей повышения эффективности и улучшения селективности генерации [1-4]. В частности, в недавнем эксперименте с импульсным 80 кВ / 0,7 А гиротроном, работающим на частоте 1 ТГц на третьей циклотронной гармонике, использование резонатора с короткой неоднородностью позволило увеличить мощность генерации с 400 Вт (результат эксперимента с традиционным гиротронным резонатором [5]) до 1,3 кВт.

Интересным кажется исследовать перспективы использования подобных подходов в гиротронах мегаваттного уровня мощности, применяемых в установках УТС. В настоящей работе описываются два подхода, связанные с использованием квазирегулярных резонаторов с фазовыми корректорами. Во-первых, описывается возможность повышения эффективности и мощности генерации за счет организации дополнительного отбора энергии электронов рабочей волной в выходной части рабочего резонатора. Как показывает анализ электронно-волнового взаимодействия, проведенный для гиротрона мегаваттного уровня мощности (70 кВ / 45 А), работающего на частоте 170 ГГц [6], в установившемся стационарном режиме работы этого гиротрона фактор возбуждения волны электронным пучком имеет второй максимум в выходной области резонатора (в области перехода от регулярной секции к коническому выходному расширению). При этом фаза этого второго максимума противоположна фазе первого, рабочего максимума, обарзованного в середине резонатора.

Использование в выходной области резонатора специального фазового корректора, «исправляющего» фазу волны, обеспечивает дополнительное электронно-волновое взаимодействие, что увеличивает электронный КПД с 30-33% до уровня 40% и даже выше. Как минимум, такой прием может рассматриваться как путь снижения рабочего тока гиротрона (при фиксированном уровне выходной мощности 1 МВт).

Отдельно исследован вопрос о влиянии дополнительного участка электронно-волнового взаимодействия на эффективность рекуперации. Показано, что использование двухступенчатой схемы рекуперации обеспечивает в таком гиротроне суммарный КПД на уровне 70%.

Кроме того, описывается возможность получения автомодуляционного выходного сигнала в мощном гиротроне. В настоящее время активно исследуются процессы многочастотного нагрева плазмы [7-10], которые требуют непрерывного излучения с уровнем мощности не менее сотен ватт. Для упомянутого выше мегаваттного гиротрона нами показано, что автомодуляция выходной мощности может быть обеспечена в высокоэффективном (десятки процентов) режиме гиротронного типа за счет использования рабочих резонаторов с размещенными в их средней части фазовыми корректорами. «Работа» фазового корректора состоит в том, что он обеспечивает примерно одинаковое (одинаково эффективное и на близких магнитных полях) взаимодействие электронов с первой и второй продольными модами резонатора. совместная генерация этих мод приводит к автомодуляционным режимам работы с высокой (мегаваттного уровня) средней мощностью.

Работы проводятся при поддержке Государственного задания ИПФ РАН (№ 0030-2021-0027, программа «Росатом») в части исследования гиротронов мегаваттного уровня мощности и РФФИ (грант № 19-19-00599) в части исследования терагерцевых гиротронов киловаттного уровня мощности.

## Литература

- [1]. I. V. Bandurkin, Y. K. Kalynov, I. V. Osharin, and A. V. Savirov, “Gyrotron with a sectioned cavity based on excitation of a far-

- from-cutoff operating mode,” *Phys. Plasmas*, vol. 23, no. 1, p. 013113, 2016.
- [2]. I.V. Bandurkin, Y.K. Kalynov, P.B. Makhalov, I.V. Osharin, A.V. Savirov, I.V. Zhelezov, “Simulations of Sectioned Cavity for High-Harmonic Gyrotron,” *IEEE Tran.Electron Devices*, vol. 64, no. 1, p. 300, 2017.
- [3]. I. V. Bandurkin, M. Yu. Glyavin, S. V. Kuzikov et al, “Method of Providing the High Cyclotron Harmonic Operation Selectivity in a Gyrotron With a Spatially Developed Operating Mode,” *IEEE Trans. El. Devices*, vol. 64, no. 9, p. 3893, 2017.
- [4]. I. V. Bandurkin, A. P. Fokin, M. Y. Glyavin, A. G. Luchinin, I. V. Osharin, and A. V. Savirov, “Demonstration of a selective oversized cavity in a terahertz second-harmonic gyrotron,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 41, no. 9, p. 1412, 2020.
- [5]. V. L. Bratman, Y. K. Kalynov, and V. N. Manuilov, “Large-orbit gyrotron operation in the terahertz frequency range,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 102, no. 24, p. 245101, 2009.
- [6]. V.E.Zapevalov, G.G.Denisov, V.A.Flyagin et al, “Development of 170 GHz/1 MW Russian gyrotron for ITER,” *Fusion Eng. and Design*, vol. 53, p. 377, 2001.
- [7]. V. Skalyga, I. Izotov, T. Kalvas et al, “Suppression of cyclotron instability in electron cyclotron resonance ion sources by two-frequency heating,” *Phys. Plasmas*, vol. 22, no. 8, Aug. 2015, Art. no. 083509.
- [8]. V. Toivanen, G. Bellodi, D. K uchler, F. Wenander, and O. Tarvainen, “Effect of double frequency heating on the lead afterglow beam currents of an electron cyclotron resonance ion source,” *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 20, no. 10, p. 103402, 2017.
- [9]. E. Naselli, D. Mascali, M. Mazzaglia et al, “Impact of two-close-frequency heating on ECR ion source plasma radio emission and stability,” *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 28, no. 8, p. 085021, 2019.
- [10]. H. P. Laqua, D. Moseev, P. Helander, P. Aleynikov, S. Marsen, N. B. Maruschenko, and T. Stange, “Generation of electrostatic oscillations in the ion cyclotron frequency range by modulated ECRH,” *Nucl. Fusion*, vol. 58, no. 10, p. 104003, 2018.

**РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ СБОРА И  
ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ  
ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Нагорный Н.В., Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Семёнов И.Б.,  
Гужев Д.И., Николаев А.И., Нестеренко В.М., Мионов А.Ю.,  
Семёнов О.И.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,  
[n.nagornyi@iterrf.ru](mailto:n.nagornyi@iterrf.ru)*

Диагностический комплекс проектируемой установки ИТЭР будет включать множество измерительных систем, для каждой из которых потребуется производительная система сбора и обработки данных. Несмотря на различия принципов выполнения измерений диагностическими системами, все системы сбора и обработки данных имеют общие цели – сохранение информации, получаемой с помощью детекторов в полном объёме и с необходимой точностью, а также выполнение потоковой обработки экспериментальных данных, получение расчётных (измерительных) параметров и обеспечение обратной связи о состоянии плазмы для центральной системы управления установкой.

Сегодня цифровые технологии активно применяются для построения систем сбора и обработки данных, и, диагностический комплекс установки ИТЭР не является исключением. В докладе представлены многие аспекты применения цифровых технологий в рамках поставленных выше

задач. Так, вся работа с кодами АЦП осуществляется с помощью методов цифровой обработки, выполняемых на различных уровнях аппаратных и программных архитектур систем сбора и обработки данных. Программное обеспечение, исполняемое на компьютерах систем, решает задачи интеграции диагностического вычислительного оборудования и получения данных, а также конечных расчётов, упаковки, буферизации и передачи данных (с учётом особенностей взаимодействия с системой хранения данных установки ИТЭР). Разработка технических проектов систем сбора и обработки данных (большинство из которых находятся на стадии финального проектирования) и программного обеспечения должна выполняться согласно современным методам и моделям циклов разработки цифровых продуктов с применением соответствующих стандартов и специализированных программных средств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» в рамках Государственного контракта № Н.4а.241.19.23.1014 от 18.01.2023 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовке к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

# СОЗДАНИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ СЕТИ ЦЕНТРОВ ДИСТАНЦИОННОГО УЧАСТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ИТЭР

О. Семенов<sup>1</sup>, А. Потапов<sup>1</sup>, Н. Нагорный<sup>1</sup>,  
А. Степанов<sup>1</sup>, С. Портоне<sup>1</sup>, Д. Тушин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», г. Москва, Россия,*

Семь равноправных партнеров и более тридцати стран-участниц – большая коллаборация ИТЭР. Равноправный доступ к эксперименту и его результатам для всех участников проекта является одной из сложной и амбициозной задач которые стоят перед этой коллаборацией. Для ее реализации предусмотрена возможность удаленного доступа к системе сбора и хранения данных установки.

Для отработки технологий и принципов взаимодействия между площадкой ИТЭР и другими участниками проекта в РФ была создана модель Центра дистанционного участия. Совместно с Международной Организацией (МО) ИТЭР проводится исследование процессов передачи данных, а также подключение к внутренним сетям МО ИТЭР с точки зрения информационной безопасности.

На данный момент Центр удаленного участия, расположенный на площадке «Проектного Центра ИТЭР» (г. Троицк), является наиболее продвинутым в плане доступной функциональности. Он обеспечивает прямое подключение к технологическим данным площадки ИТЭР.

Основным каналом передачи данных является туннель уровня L3, который показал хорошие результаты после его обновления. Также была протестирована механика совместного использования экранов операторов, просмотра архивных данных и т. д., протестированы различные решения для стриминга потокового видео в рамках закрытых сетей ИТЭР как с со стороны МО ИТЭР, так и со стороны Центром удаленного участия в РФ.



В целях развития инфраструктуры, повышения стабильности канала и улучшения связи был построен туннель уровня L2. Данное решение позволило улучшить стабильность и скорость обмена данными между МО ИТЭР и Центром удаленного участия в РФ. Проводится тестирование и сравнение различных типов канала с целью выработки стандартов для все коллаборации.

Также проводятся работы по формированию облика Центра Дистанционного Участия для экспериментальной программы. Тестируются решения виртуализации терминалов управления. Развертывание различных методов отображения и связанных с этим проблем.

Работа выполнена по государственному контракту с ГК «Росатом» от 18.01.2023 № Н.4а.241.19.23.1014»

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ДМНП

Парышкин Ю.А.

*Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ», Москва, Российская Федерация,  
[Yuriy.Paryshkin@ecsoft.mephi.ru](mailto:Yuriy.Paryshkin@ecsoft.mephi.ru)*

Программное обеспечение системы сбора и обработки данных (ССД) Диверторного монитора нейтронного потока (ДМНП) предназначено для реализации функций сбора, обработки и передачи данных в информационные сети ИТЭР. ССД ДМНП состоит из трех одинаковых подсистем, обрабатывающих сигналы детекторов нейтронов.

Проектирование программного обеспечения (ПО) ССД ДМНП осуществляется средствами, предоставляемыми международной организацией (МО) ИТЭР. Основное средство проектирования SDD Editor. Средство проектирования и запуска интерфейсов оператора - Control System Studio.

В докладе предложены варианты проектирования трех подсистем и запуска программного обеспечения. Рассматриваются варианты наименования переменных EPICS и модулей ввода/вывода в соответствии с правилами наименования переменных МО ИТЭР.

Для модулей FlexRIO с программой предварительной обработки данных в FPGA показаны способы работы с библиотекой NDSv3. Рассматриваются следующие вопросы, которые не отражены в документации МО ИТЭР:

- портирование программного обеспечения с предыдущей версии;
- инициализация начального состояния переменных EPICS;
- добавление информации о характеристиках модулей ввода/вывода;

- добавление информации о мониторинге состояний;
- изменение структуры полей EPICS для обработки строковых переменных;
- подписка на изменения внешних переменных;
- добавление информации о машине состояний модулей ввода/вывода.

Приводится пример добавления модуля синхронизации времени в проект SDD Editor и программирования событий синхронизации с помощью шаблонов МО ИТЭР.

Описывается создание конфигурации для сервера сигнализаций и журнала сообщений, способы просмотра диагностических сообщений при импорте конфигураций.

На примере разработанных для ССД ДМНП экранов оператора показываются способы добавления собственных панелей сигнализаций и управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Частного учреждения «ИТЭР-Центр» в рамках договора №17706413348230000070/10-23/01 от 05.04.2023 г.

# АДАПТИВНЫЕ СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Хильченко А.Д.<sup>1</sup>, Квашнин А. Н.<sup>1</sup>, Пурыга Е. А.<sup>1</sup>, Иваненко С. В.<sup>1</sup>,  
Зубарев П. В.<sup>1</sup>, Моисеев Д. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Организация, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО  
РАН, Новосибирск, Россия, [a.d.khilchenko@inp.nsk.su](mailto:a.d.khilchenko@inp.nsk.su)

Многоканальные модули регистрации и предварительной обработки данных последнего поколения на основе быстродействующих АЦП и программно конфигурируемого цифрового ядра, включающего в свой состав элементы FPGA и процессор семейства ARM Cortex-A9 с сетевым интерфейсом Ethernet-1000, ориентированы на построение развитых информационно-измерительных систем с распределенной архитектурой. Адаптация измерительных трактов этих приборов к параметрам сигналов датчиков производится с помощью процедур удаленной загрузки в регистры управления цифрового узла опорных констант, задающих:

- текущие значения коэффициентов передачи входных сигналов;
- положение их нулевых линий;
- полосу пропускания входных фильтров;
- текущее значение частоты дискретизации синхронно работающих трактов А-Ц преобразования;
- моду запуска цикла регистрации (программный или внешний запуск, запуск с привязкой к уровню и фронту входного сигнала любого канала);
- режим регистрации и обработки данных.

Все приборы имеют унифицированный интерфейсный узел и реализуют четыре базовых и до четырех специализированных режимов работы. Базовыми являются классические осциллографические режимы: однократный, страничный, накопительный и ждущий циклический. В их рамках формируемые 10 – 14 разрядными АЦП потоки данных с частотой дискретизации

от 1МГц до 5ГГц записываются в по каналу прямого доступа в выделенную пользователем область памяти процессора объемом до 512Мб. Характер ее разбиения на страницы, длительность интервала “предыстории” и иные параметры, конкретизирующие детали выбранного режима работы, задаются программно. Необходимые пользователю процедуры обработки данных выполняются процессором, работающим под управлением ОС Linux. Алгоритмы обработки данных - атрибут библиотечных или создаваемых пользователем программных модулей. Специализированные режимы регистрации ориентированы на поддержку конкретных диагностик. В их рамках для формирования физически значимых результатов измерений используются как аппаратные, так и программные модули обработки данных. Аппаратные строятся на элементах FPGA. Они создаются с помощью САПР и включаются в состав цифрового узла. Загрузка конфигурационного файла FPGA, реализующего этот узел “в железе”, а также вспомогательных программных модулей, производится либо с входящей в состав каждого прибора SD-карты, либо по сети Ethernet.

Пример программных модулей, - используемые в регистраторах ADC105000/8(10 бит, 5ГГц, 8 каналов) и ADC105000/4 (10 бит, 5ГГц, 4 канала) модули статической и динамической калибровки амплитудных и временной шкал. При работе этих регистраторов в составе диагностики Томсоновского рассеяния [1] может использоваться модуль вычисления локальных значений температуры/плотности электронной компоненты плазмы и фиксации характера поведения этих параметров во времени. К числу специализированных следует отнести модули обработки данных, используемые в регистраторах ADC14100/2, ADC12500/2, ADC14250/4. При работе первого в составе диагностики плотности плазмы с помощью дисперсионного интерферометра (ДИ), а остальных – в составе различного рода спектрометров. Аппаратно реализуемый модуль обработки данных ДИ восстанавливает в режиме реального времени текущие значения набега фазы, используя спектральную форму представления сигнала фотодетектора, что делает его чрезвычайно помехоустойчивым [2]. В состав этого прибора включен также модуль ПИД регулятора, ориентированный на замыкание петли обратной связи в контуре управления плотностью плазмы. К числу спектроскопических

следует отнести модули обработки данных нейтрон-гамма спектрометра с детектором на основе органического сцинтиллятора [3], нейтронного спектрометра на основе полупроводникового и удаленного алмазного детекторов [4]. В них также используется спектральная форма представления сигналов детектора и основанные на ней процедуры разделения событий (нейтрон/гамма спектрометр), вычисления их энергии и выявления наложений (нейтронные или гамма спектрометры). Помимо формирования энергетических спектров эти модули также фиксируют на интервале регистрации энергию и временную координату каждого полезного события, что позволяет восстанавливать характер изменения интенсивности потока частиц в интересующем экспериментатора диапазоне энергий.

Пакет средств программной поддержки содержит функционально полный набор процедур удаленного взаимодействия с регистраторами.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-20201).

## Литература

- [1]. Lizunov A., Verbasova T., Khilchenko A., Kvashnin A., Puryga E., Sandomirsky A., Zubarev P. // Review of Scientific Instruments V. 94, Issues 3, 2023, 033509 <https://doi.org/10.1063/5.0123329>
- [2]. Иваненко С.В., Гринемайер К.А., Пурыга Е.А., Квашнин А.Н., Багрянский. П.А. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 1, с.67-78 DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-1-67-78
- [3]. Pinzhenin E, Khilchenko A., Zubarev P., Kvashnin A., Kashchuk Yu., Kovalev A., Obudovsky S.// Plasma and Fusion Research V. 14, Iss. Special issue1, 2019, 2402025 <https://doi.org/10.1585/pfr.14.2402025> 0
- [4]. Khilchenko A., Kvashnin A., Zubarev P., Ivanenko S., Puryga E., Moiseev D. and Lizunov A. // Journal of Instrumentation, Volume 17, July 2022, DOI 10.1088/1748-0221/17/07/P07003

# СИСТЕМА ИНТЕГРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАНЫХ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОГО ВЫВОДА ДЛЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

Солоха В.В.<sup>1,2</sup>, Курскиев Г.С.<sup>1</sup>, Жильцов Н.С.<sup>1</sup>, Ткаченко Е.Е.<sup>1</sup>,  
Иваненко С.В.<sup>2</sup>, Соломахин А.Л.<sup>2,3</sup>, Бахарев Н.Н.<sup>1</sup>,  
Багрянский П.А.<sup>2</sup>, Воронин А.В.<sup>1</sup>, Горяинов В.Ю.<sup>1</sup>, Гусев В.К.<sup>1</sup>,  
Киселёв Е.О.<sup>1</sup>, Минаев В.Б.<sup>1</sup>, Мирошников И.В.<sup>1</sup>,  
Новохацкий А.Н.<sup>1</sup>, Петров Ю.В.<sup>1</sup>, Сахаров Н.В.<sup>1</sup>, Тельнова А.Ю.<sup>1</sup>,  
Толстяков С.Ю.<sup>1</sup>, Тюхменева Е.А.<sup>1</sup>, Хромов Н.А.<sup>1</sup>,  
Щёголев П.Б.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Российская  
Федерация, [vsolokha@mail.ioffe.ru](mailto:vsolokha@mail.ioffe.ru)

<sup>2</sup>Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, Российская Федерация

<sup>3</sup>Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск,  
Российская Федерация

На токамаке Глобус-М2 [1] была протестирована система интегрального анализа данных на основе Байесовского вывода.

Байесовский вывод широко используется для анализа экспериментальных данных плазменных экспериментов на токамаках ASDEX-Upgrade [2], JET [3, 4], стеллараторе Wendelstein 7-X [5] и ряде других установок. Основной задачей Байесовского вывода увеличение точности решения обратной задачи при восстановлении плазменных параметров. Байесовский вывод является одним из методов машинного обучения, его преимуществом является напрямую декларируемые зависимости между переменными, что позволяет производить количественный анализ неопределённости результатов без использования посторонних аналитических методов и аппроксимаций.

В диагностической системе токамака Глобус-М2 [6] имеется диагностика томсоновского рассеяния, производящая измерения температуры и плотности электронов плазмы в десяти пространственных точках экваториальной плоскости с

временным разрешением 3 мс [7]; диагностика дисперсионной интерферометрии [8], измеряющая линейно-интегрированную плотность электронов с временным разрешением равным 20 мкс; диагностика мягкого рентгеновского излучения, позволяющая оценивать температуру электронов с временным разрешением 1 мкс.

На токамаке Глобус-М2 выбор метода Байесовского вывода обусловлен стремлением как оценить неопределённости, связанные с измерениями единственной диагностикой, так и объединить данные нескольких диагностик. Например, при измерении температур электронов менее 10 эВ с помощью диагностики томсоновского рассеяния, описываемый метод позволяет уменьшить неопределённость оценки температуры электронов на 25%. При использовании нескольких диагностик, измеряющих связанные плазменные параметры реализуется изображённая на рисунке 1 схема системы интегрального анализа данных. Экстраполяция данных томсоновского рассеяния между лазерными импульсами производится с помощью регрессии гауссовского процесса для увеличения временного разрешения с учётом информации от диагностик дисперсионной интерферометрии и мягкого рентгеновского излучения.

В докладе рассмотрены особенности реализации вероятностной модели в фреймворках PyMC [9] и Tensorflow [10], способы увеличения устойчивости модели к выбросам во входных данных и проверки сходимости метода.

[5]. Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 21-79-20201 на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях".



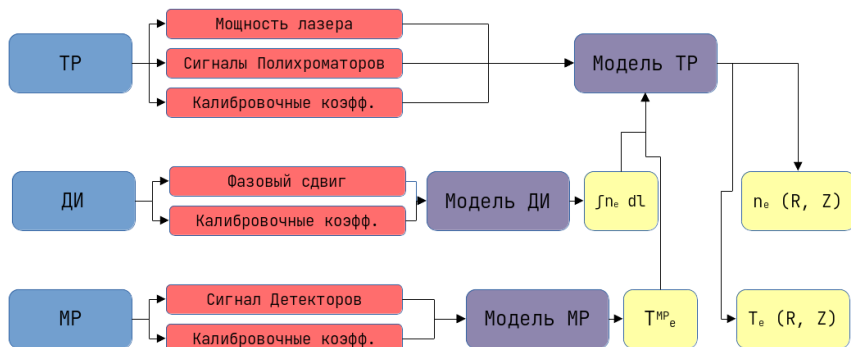


Рисунок 1. Схема системы интегрального анализа данных. Синие блоки – диагностики, красные блоки – первичные данные, фиолетовые блоки – модули обработки данных, жёлтые блоки – выходные данные.

## Литература

- [1]. Бахарев Н. Н., и др. Физика плазмы 46.7 (2020): 579-587.
- [2]. Fischer R., et al. Fusion science and technology 58.2 (2010): 675-684.
- [3]. Karhunen J., et al. Plasma Physics and Controlled Fusion 64.7 (2022): 075001.
- [4]. Kwak S., et al. Nuclear Fusion 60.4 (2020): 046009.
- [5]. Bozhenkov S.A., et al. Journal of Instrumentation 12.10 (2017): P10004.
- [6]. Петров Ю.В. и др., в печати, Физика Плазмы (2023)
- [7]. Kurskiev G. S., et al. Tech. Phys. Lett. 47.24 (2021): 41-45.
- [8]. Иваненко С.В. и др. ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез, т.46, 1, 2023, с. 86 - 94
- [9]. Fonnesbeck C., et al. Astrophysics Source Code Library (2015): ascl-1506.
- [10]. Pang, B. et al. Journal of Educational and Behavioral Statistics 45.2 (2020): 227-248.

# ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СБОРА, ОБРАБОТКИ, ХРАНЕНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ ТОКАМАКА “МИФИСТ-0”

Ефимов Н. Е.<sup>1</sup>, Подоляко Ф. С.<sup>1</sup>, Пришвицын А. С.<sup>1</sup>, Крат С. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет  
“МИФИ”, 115409 Каширское шоссе, д. 31, Москва, Россия,  
[NEEfimov@mephi.ru](mailto:NEEfimov@mephi.ru)*

“МИФИСТ-0” – учебно-исследовательский малый сферический токамак, созданный на базе кафедры физики плазмы НИЯУ МИФИ для подготовки высококвалифицированных кадров в области управляемого термоядерного синтеза, а также для исследования высокочастотных и сверхвысокочастотных (СВЧ) методов предыонизации и нагрева плазмы и анализа процессов взаимодействия плазмы с обращенными к ней материалами [1].

Диагностический комплекс токамака включает набор электромагнитных датчиков (пояса Роговского, датчики Холла, зонды Мирнова, диамагнитные петли), измерения с которых осуществляется с помощью аналого-цифровых преобразователей L-card E-502 и E20-10, зонды Ленгмюра, оптические спектрометры Avantes и OceanFX, высокоскоростную оптическую камеру Ximea, лазерные и СВЧ интерферометры, четырехканальный рентгеновский спектрометр, а также различные датчики систем питания магнитных катушек, вакуумметрии, газонапуска и блокировок.

При разработке автоматизированной системы сбора, хранения, обработки и представления экспериментальных данных особый акцент был сделан на возможность ее эксплуатации низкоквалифицированным персоналом (школьниками и студентами), а также на реализацию решений, архитектурно схожих с более крупными установками, где обучающиеся на МИФИСТе студенты смогут продолжить свою

научную карьеру. Таким образом, будучи частью учебной установки, созданный программно-аппаратный комплекс также может выступать в качестве учебного пособия.

Основой программной составляющей комплекса выступает среда EPICS, которая используется на токамаке “МИФИСТ-0” для централизованного управления. Первичный сбор данных осуществляется на независимых физических и виртуальных машинах с развернутой на них сборкой EPICS base 7.0.7 и дополнительными модулями для взаимодействия с конечными устройствами регистрации (EPICS StreamDevice, Modbus, PyEpics). Сбор данных для архивации осуществляется через оптоволоконные линии по протоколам EPICS, действующим поверх TCP/IP.

Реализованы два параллельно действующих подхода к архивации: запись данных в реляционную базу данных (РБД) с помощью модуля Archive Engine Service, являющегося составляющей платформы управления CS-Studio (Phoebus), а также сохранение данных в файлы формата HDF5 посредством Python библиотек PyDevice и h5py на локальном NAS сервере. С аппаратной точки зрения в обоих случаях долговременное хранение данных осуществляется на базе RAIDz массива с суммарным объемом 8 Тб, а также аналогичного по структуре резервного хранилища данных на базе Proxmox Backup Server. Для визуализации, обработки и экспорта данных РБД могут быть использованы штатные средства CS-Studio (Phoebus). В свою очередь, для работы с экспериментальными данными в HDF5 использована веб платформа JupiterLab с библиотекой H5Web для непосредственной визуализации и доступа к данным через скрипты на Python.

В докладе более подробно рассмотрены алгоритмы работы созданного комплекса и задействованные решения. Проведено сравнение реализованных подходов к архивации данных, а также результаты апробации комплекса при рабочих импульсах на токамаке “МИФИСТ-0”.

Работа была выполнена при поддержке комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных

исследований в области использования атомной энергии в РФ на период до 2024 года» (РТТН), реестровый номер работы 075-03-2023-097/4.

### **Литература**

- [1]. S. Krat, A. Prishvitsyn, A. Alieva, N. Efimov et. al. // Fusion Science and Technology, 2023 V. 79 № 4 P. 446-464

# ГИБРИДНЫЙ КАНАЛ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ИКД ДИАГНОСТИКИ ДМНП

Воробьев В.А., Джурик А.С., Николаев А.И., Кашук Ю.А.,  
Кормилицын Т.М., Степанов С.Б.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», [v.vorobiov@iterrf.ru](mailto:v.vorobiov@iterrf.ru)*

Диагностика Диверторный монитор нейтронного потока (ДМНП) входит в состав комплекса нейтронных диагностик ИТЭР и предназначена для измерения полного нейтронного потока и термоядерной мощности токамака-реактора.

Диагностика состоит из трёх одинаковых подсистем, в каждой из которых измерение нейтронного потока производится с помощью 2-х трёхсекционных ионизационных камер деления (ИКД).

Представлены результаты предварительных исследований построения «гибридных» измерительных каналов. Первый канал базируется на результатах, представленных в работе [1]. Второй канал реализует расширения диапазона счётного канала за счёт использования ИКД различной чувствительности.

Приведены результаты моделирования каналов с помощью имитатора сигналов ИКД [2].

Рассмотрены некоторые аспекты, касающиеся калибровок измерительных каналов I&C диагностики ДМНП на установке ИТЭР.

В случае внедрения каналов заявленная на FDR аппаратная архитектура I&C диагностики ДМНП не меняется, т.к. будет реализована на программном уровне.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.22.1014 от 18 января 2023 г. «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

## Литература

- [1]. В.А. Воробьёв, С.Ю. Обудовский, А.С. Джурик, А.И. Николаев, Т.М. Кормилицын, Ю.А. Кашук. О возможности калибровки флуктуационного канала нейтронной диагностики плазмы. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2023, т. 46, вып. 1.
- [2]. Джурик А.С., Воробьёв В.А., Николаев А.И., Кашук Ю.А., Кормилицын Т.М., Степанов С.Б. Имитатор сигналов детекторного модуля ДМНП ИТЭР. (См. тезисы к конференции)

# ОТНОСИТЕЛЬНАЯ КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАКТОВ КАНАЛА КОНТРОЛЯ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА

Федоров В.А.<sup>1</sup>, Астафьев А.С.<sup>1</sup>, Мартазов Е.С.<sup>1</sup>, Воробьев В.А.<sup>2</sup>,  
Кашук Ю.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Россия, [vafedorov@mephi.ru](mailto:vafedorov@mephi.ru)

<sup>2</sup>Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,  
[v.vorobiov@iterrf.ru](mailto:v.vorobiov@iterrf.ru)

Контроль плотности потока нейтронов в ядерных и термоядерных установках – одна из важнейших функций системы, обеспечивающей безопасность их эксплуатации и расчет параметров энерговыделения (мощности, энерговыработки, нейтронного выхода и др.). При проектировании широкодиапазонного (до 10-11 декад) канала контроля нейтронного потока на основе одной ионизационной камеры деления (ИКД) в условиях интенсивного гамма излучения, используются несколько измерительных трактов, реализующих различные способы обработки сигнала ИКД: импульсный, флуктуационный, токовый. Существуют также способы обработки сигнала ИКД, основанные на интегрировании на последовательных временных интервалах линейно или квадратично детектированного сигнала на выходе усилителя-формирователя ИКД (импульсно-флуктуационные тракты). Поскольку диапазоны работы трактов ограничены, то для получения монотонной линейной характеристики широкодиапазонного канала необходимо обеспечить их взаимную калибровку с расчетом индивидуальных коэффициентов для каждого тракта и сопряжение в областях пересечения диапазонов.

При условии линейного представления статических характеристик измерительных трактов задача их относительной калибровки сводится к определению постоянных коэффициентов, на которые нужно умножить выходные сигналы трактов для их

приведения к некоторой опорной величине, имеющей единую размерность для всех трактов. В качестве такой величины удобно использовать скорость счета импульсов от нейтронов или силу тока ИКД, связанного с нейтронами.

Определение калибровочных коэффициентов может быть выполнено различными способами: экспериментальным на ядерной установке, расчетным с использованием математического моделирования, полунатурным с применением имитатора сигнала ионизационной камеры.

В докладе рассматриваются методики измерений, реализующие данные способы, определяются требования к исходным данным, оцениваются погрешности определения калибровочных коэффициентов. На примере структуры системы сбора данных (ССД) диагностики ИТЭР «Диверторный монитор нейтронного потока» (ДМНП) иллюстрируются различные способы относительной калибровки измерительных трактов канала контроля, даются рекомендации по экспериментально определяемым параметрам ИКД, которые будут полезны для относительной и абсолютной калибровки ССД ДМНП на этапах заводских приемо-сдаточных испытаний и приемочных испытаний на площадке ИТЭР.



# СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ПЛОТНОСТЬЮ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ДИСПЕРСИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Иваненко С.В.<sup>1</sup>, Зубарев П.В.<sup>1,2</sup>, Квашнин А.Н.<sup>1</sup>, Першин П.В.<sup>1</sup>,  
Пурыга Е.А.<sup>1</sup>, Соломахин А.Л.<sup>1,3</sup>, Хильченко А.Д.<sup>1</sup>,  
Багрянский П.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, Россия, [S.V.Ivanenko@inp.nsk.su](mailto:S.V.Ivanenko@inp.nsk.su)*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, Россия*

<sup>3</sup>*Новосибирский государственный университет, Новосибирск,  
Россия*

В ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН был создан дисперсионный интерферометр (ДИ) на основе CO<sub>2</sub> лазера для регистрации характера поведения плотности плазмы и управления этим параметром на токамаке Глобус-М2 (Санкт-Петербург, Россия) [1]. Временное разрешение ДИ составляет 20 мкс, пространственное - 0,02 м, точность измерений, определенная по размаху шумовой компоненты регистрируемого сигнала, - не хуже 10<sup>17</sup> м<sup>-2</sup>. Для регистрации сигналов ДИ и вычисления плотности плазмы в режиме реального времени был разработан специальный измерительный модуль – фазометр [2]. Для управления плотностью плазмы в фазометре был реализован цифровой контроллер на основе ПИД-регулятора, взаимодействующий по последовательному каналу связи с выносным модулем управления пьезоэлектрическим клапаном напуска газа. Он ориентирован на формирование в токамаке Глобус-М2 заданного оператором характера изменения плотности плазмы во время разряда.

За более чем полугодовой период эксплуатации дисперсионный интерферометр зарекомендовал себя надежным

измерительным средством в составе комплекса штатных диагностик токамака Глобус-М2.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №21-79-20201. Эксперименты проведены на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях".

### **Литература**

- [1]. С.В. Иваненко, А.Л. Соломахин, Н.С. Жильцов, П.В. Зубарев, Ю.В. Коваленко, Г.С. Курский, В.В. Солоха, Е.Е. Ткаченко, К.Д. Шулятьев, Е.А. Пурыга, А.Д. Хильченко, В.Б. Минаев, П.А. Багрянский // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2023, т. 46, вып. 1, с.86-94
- [2]. Иваненко С.В., Гринемайер К.А., Пурыга Е.А., Квашнин А.Н., Багрянский П.А. Измерительный модуль дисперсионного интерферометра на основе СО<sub>2</sub>-лазера для управления плотностью плазмы. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 1, с. 67—78.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ДИАГНОСТИКИ ВНК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРОВ

Николаев А.И.<sup>1</sup>, Гужев Д.И.<sup>1</sup>, Нагорный Н.В.<sup>1</sup>, Воробьев В.А.<sup>1</sup>,  
Джурик А.С.<sup>1</sup>, Немцев Г.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Частное учреждение «Проектный центр ИТЭР», Москва,  
Россия, [a.nikolaev@iterrf.ru](mailto:a.nikolaev@iterrf.ru)

Основная роль диагностики Вертикальной Нейтронной Камеры ИТЭР (ВНК) заключается в измерении в режиме реального времени профиля нейтронов при высоких пиковых скоростях счета в течение всего плазменного импульса. Для этого в каждой подсистеме будет использоваться 6 детекторных модулей, каждый из которых состоит из 2-х алмазных детекторов и 2-х ИКД.

При разработке системы цифровой обработки сигналов алмазных детекторов необходимо проверять правильность работы ПО. Для этих целей можно использовать имитатор сигналов, характерных для данного сенсора нейтронов. Имитаторы представляют из себя программно-аппаратные комплексы, способные генерировать и воспроизводить сигналы, аналогичные сигналам нейтронных детекторов.

В данном докладе рассмотрена концепция высокопроизводительного имитатора сигналов алмазного детектора. Учитывая высокую производительность необходимой обработки и характеристики исходных импульсов, было выбрано следующее аппаратное обеспечение:

- Для генерации данных используется ПК или стоечный сервер с GPU Nvidia Quadro P-series. Основой генерации является технология CUDA, позволяющая реализовывать параллельные вычисления на графическом процессоре.

- Для воспроизведения данных планируется использовать AWG с частотой дискретизации вплоть до 1,25 Г выборок/с.

Данное аппаратное обеспечение позволит в полной мере проверить алгоритмы цифровой обработки сигналов алмазного детектора. На текущий момент реализован только режим воспроизведения «тестовых» файлов. Если уменьшить время генерации данных, то возможен переход от воспроизведения тестовых файлов к режиму воспроизведения в реальном времени. Этот подход так же может быть опробован на данном аппаратном обеспечении.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 14.02.2022 № Н.4а.241.19.22.1123 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2022 году».

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА СИГНАЛОВ АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАГРУЗКАХ

Авдюшкин Д.А.<sup>1</sup>, Гужев Д.И.<sup>1</sup>, Николаев А.И.<sup>1</sup>, Нагорный Н.В.<sup>1</sup>,  
Немцев Г.Е.<sup>1</sup>, Нестеренко В.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,  
[D.Avdushkin@iterrf.ru](mailto:D.Avdushkin@iterrf.ru)*

В проекте ИТЭР будут использоваться различные диагностические системы для анализа плазмы. Одной из таких систем является Вертикальная Нейтронная Камера. ВНК включает в себя 12 детекторных модулей, каждый из которых состоит из 2-х алмазных детекторов и 2-х ИКД,

Одним из основных получаемых результатов работы диагностики является амплитудное распределение сигнала, т.к. амплитуда импульса алмазного детектора прямо пропорциональна энергии регистрируемых нейтронов.

В данном докладе представлен результат работы по математическому моделированию амплитудного спектра от алмазного детектора. За основу был взят нормированный импульс, записанный с алмазного детектора. Ширина данного импульса по основанию около 50 нс. Было разработано ПО на языке Python, моделирующее наложение импульсов, распределенных во времени по закону Пуассона и имеющих заданное амплитудное распределение. Данное ПО строит амплитудный спектр полученного сигнала, позволяя проследить изменения спектра при различных нейтронных мощностях.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 14.02.2022 № Н.4а.241.19.22.1123 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2022 году».

# АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ИНЖЕКТОРОВ ТОКАМАКА Т-15МД НА ТЕСТ СТЕНДЕ ИРЕК

Баркалов К.Е.<sup>1</sup>, Баркалов Е.Е.<sup>1</sup>, Ерёмин В.А.<sup>1</sup>, Королёв В.Ф.<sup>1</sup>,  
Игонькина Г.Б.<sup>1</sup>, Панасенков А.А.<sup>1</sup>, Соколов М.М.<sup>1</sup>,  
Хайрутдинов Э.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия,  
[nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

В настоящее время проводится модернизация системы инжекционного нагрева (СИН) токамака Т-15МД [1]. СИН состоит из трех инжекторов и предназначена для ввода пучков атомов водорода с энергией до 75 кэВ при максимальной суммарной мощности не менее 6 МВт. Одним из основных элементов для создания пучка является ионный источник (ИИ), состоящий из газоразрядной камеры (ГРК), высоковольтного изоляторного узла и ионно-оптической системы, включающий в себя три электрода: эмиссионный, промежуточный и заземленный.

В ходе модернизации СИН Т-15МД необходимо создать современную систему сбора и обработки данных. Данная система предназначена для регистрации параметров в различных режимах работы инжектора. Например, при работе по выводу на рабочий режим ГРК, необходимо контролировать параметры её работы и плотность ионного тока на эмиссионной поверхности. При работе с пучком, необходимо регистрировать напряжение на эмиссионном электроде с током выпрямителя, напряжение с током на промежуточном электроде, получать данные с коллекторов на приёмнике нейтральных атомов и остаточных ионов, собирающих вторично-эмиссионные электроны [2], по этим данным с помощью программного обеспечения восстанавливать профиль пучка, а также сигналы измерений с термопар, находящихся на различных компонентах тракта инжектора.

Прототип системы сбора и обработки данных СИН Т-15МД был разработан, собран и испытан на тест стенде ИРЕК. Диагностический шкаф стенда построен на базе оборудования компании National Instruments. В качестве контроллера системы применен NI PXIe-8840 под управлением ОС Windows 10. Для регистрации сигналов используются четыре многофункциональных модуля X серии NI PXIe-6361 (32 измерительных дифференциальных канала) с частотой дискретизации до 250 квыб/сек, разрешением 16 бит и диапазоном напряжения  $\pm 10\text{В}$ . Для обеспечения отсутствия электрического контакта между измерительным оборудованием и диагностическими зондами применяются блоки изолирующих усилителей, рассчитанные на изоляцию до 2 кВ и работу с сигналами до 100 кГц. Согласование диапазонов измерений АЦП с датчиками обеспечивается блоками с наборами сопротивлений, подключенных к блоку приема сигналов с диагностических зондов. Помимо этого, в шкафу установлены источники питания для подачи опорного напряжения на зонды. Блок сопротивлений представляет собой коммутатор сигналов, каждый из них имеет 16 независимых каналов, которые можно подключить на общую шину питания, для зондовых измерений. Каждый канал можно подключить на различные измерительные сопротивления, а также отключить от сопротивлений для прямого измерения сигнала. Блок приёма сигналов с зондов имеет 40 каналов, разделённых на 2 группы, с возможностью переключения между ними.

Регистрация данных обеспечивается программой DAS-IREK, разработанной в среде LabVIEW. Визуализация и обработка полученной информации осуществляется программой DASTools [3] с встроенным кодом математической обработки данных зондовых измерений пучка DASFMinimize [4].

В работе представлены результаты, полученные на прототипе системы сбора и обработки данных измерений СИН Т-15МД. Представлены параметры режима работы ГРК. На эмиссионной поверхности с использованием набора зондов Ленгмюра, были получены значения тока, и с помощью функции

DASFMinimize восстановлены профили плотности в области извлечения пучка.

### Литература

- [1]. Баркалов К.Е., Анашкин И.О., Баркалов Е.Е., Грибов А.А., Королёв В.Ф., Никулин В.А., Панасенков А.А., Петров В.С. «Система инъекции для нагрева плазмы токамака Т-15МД», XLVIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 15-19 марта 2021г. сборник тезисов докладов, стр. 69
- [2]. К.Е. Barkalov, Е.Е. Barkalov, А.А. Panasenkov «Experimental investigation of a high power long-pulse neutral beam profile diagnostic based on secondary electron emission» Sixth International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources (NIBS 2018), AIP Conf. Proc. 2052, 040020-1–040020-7; <https://doi.org/10.1063/1.5083754>
- [3]. Игонькина Г.Б., Соколов М.М. Унификация доступа к экспериментальным данным установок управляемого термоядерного синтеза // Труды Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет», г. Новороссийск, 18-23 сентября 2006г., Изд-во МГУ, 2006, с.242-244.
- [4]. Игонькина Г.Б., Соколов М.М. Программа и код для математической обработки данных зондовых измерений инжекторов нейтральных атомов DASFMinimize // Патент России №. 2020613902.2020. Бюл. № 4.



# ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ВЫХОДНОГО ИМПУЛЬСА ДЕТЕКТОРНОГО МОДУЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР С ПОМОЩЬЮ FPGA

Михалев И.М., Нагорный Н.В., Гужев Д.И., Николаев А.И.,  
Авдюшкин Д.А.

*Частное учреждение «Проектный центр ИТЭР», Москва,  
Россия, [i.mikhalev@iterrf.ru](mailto:i.mikhalev@iterrf.ru)*

Для детектирования нейтронов, рожденных в D-D и D-T реакциях синтеза может быть использован широкий набор средств. Одним из наиболее эффективных инструментов являются алмазные детекторы, позволяющие регистрировать нейтроны высокотемпературной плазмы, их количество и энергии. Амплитуда полученного сигнала пропорциональна энергиям частиц. Последнее является важным преимуществом алмазного детектора, которое позволяет получить амплитудный спектр, распределение по энергиям.

В работе рассмотрены основные требования, предъявляемые к системе сбора данных и аппаратному обеспечению, представлено программное обеспечение для обработки сигнала. Усиленный аналоговый сигнал характерной формы поступает на высокоскоростное АЦП 12 бит с частотой дискретизации 800 MS/s, и, далее проходит предварительную обработку в FPGA NI7976. Обработка на FPGA является важным пунктом, потому что модуль производит расчёты в режиме реального времени и имеет минимальную вероятность возникновения ошибок в ходе работы, для требуемых параметров обработки у FPGA подходящая архитектура. Сигнал проходит корректировку базовой линии, ведется подсчёт импульсов и определение пиков. Результатом данной обработки являются скорость счёта, амплитудный и интегральный спектры, позволяющие анализировать термоядерную мощность и профиль нейтронов. Для построения интегрального спектра происходит

распараллеливание данных на несколько потоков, чтобы не происходило переполнение и потери информации из буферов обмена. Также разделение на потоки помогает накапливать отчёты АЦП для выполнения последующих математических операций, требующих значительного системного времени.

Сравнение результатов цифровой обработки импульсного сигнала с характеристиками апробированных источников излучения и нейтронных генераторов позволяют убедиться в точности и качестве модуля цифровой обработки, его потенциале использования для диагностики ВНК.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 18.01.2023 № Н.4а.241.19.23.1014 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечения выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ СТЕНДА ПС1

Янченков С.В., Денисов А.С. Пронкин А.А.

*НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия,  
[Yanchenkov\\_SV@nrcki.ru](mailto:Yanchenkov_SV@nrcki.ru)*

В докладе рассматривается устройство и программный комплекс системы управления, регистрации и обработки экспериментальных данных (СУиРД) стенда ПС-1[1]. Стенд ПС-1 предназначен для проверки физических принципов, положенных в основу концепции БПРД. Цель экспериментов на стенде ПС-1 – исследование механизмов ввода ВЧ (геликонной и ИЦР) и СВЧ мощности в плазму.

В докладе описывается архитектура СУиРД стенда ПС-1. Представлены схемы систем измерения и управления системами стенда. Система измерений и управления в основном строится на базе модулей аналого-цифровых преобразователей (АЦП), цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) и цифровых линий (TTL) установленных в шасси PXIe производства National Instruments (NI). Сбор и обработка регистрируемых данных осуществляется с диагностических и технологических систем стенда ПС-1, схемы которых также представлены. Полезные сигналы перед поступлением на входы АЦП системы регистрации подвергаются нормализации посредством разработанных и созданных в рамках работ специальных приборов - «нормализаторов». Часть задействованного на стенде оборудования имеет встроенные модули оцифровки сигналов и системы управления, которые опрашиваются через Ethernet или RS-485.

Программный комплекс, созданный в среде LabView, позволяет зарегистрировать и записать в базу данных информацию с приборов и датчиков технологических и диагностических систем в общую базу данных. Программный комплекс собирает данных через модули АЦП, генерирует сигналы управления через модули ЦАП и TTL, установленные в шасси PXIe NI, а также каталогизирует полученные данных и параметры управления. Записываются как данные, непосредственно поступающие на вход АЦП модулей PXIe, так и данные, передаваемые отдельными приборами через Ethernet или RS-485.

Программный комплекс позволяет просматривать записи предыдущих импульсов. Разработанные и интегрированные в систему LabView программные модули (скрипты) позволяют обрабатывать данные регистрации сразу после записи импульса. Также можно обрабатывать данные предыдущих импульсов. В докладе представлены результаты обработки сигналов интерферометра, электростатических анализаторов и зондов Ленгмюра.

### **Литература**

- [1]. Berezkin A.V., Bragin E.Y., Zhil'tsov V.A., Kulygin V.M., Yanchenkov S.V., "Experimental investigation of plasma flows in open trap with toroidal diverter under ECR discharge," *Physics of Atomic Nuclei*, vol. 78, no. 10, pp. 1120–1127, 2015, doi: 10.1134/S1063778815100038

# РАЗВИТИЕ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА УТС ИССЛЕДОВАНИЙ – ОТ RUSSIAN\_FUSION GRID К FUSIONSPACE.RU

Семенов И.Б., Ларионов А.С., Миронова Е.Ю., Нагорный Н.В.,  
Портоне С.С., Семенов О.И.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», г. Москва, Россия,*

В данной статье рассмотрены предпосылки и способы создания единого информационного пространства, позволяющие объединять в рамках реальных и виртуальных организаций исследовательские и академические институты, работающие в области управляемого термоядерного синтеза, для взаимобмена экспериментальными данными и знаниями, а также совместного использования вычислительных ресурсов.

К настоящему моменту накоплено большое количество знаний в области управляемого термоядерного синтеза (УТС). Это многолетний опыт работы большого числа людей над проблемами УТС, который содержится в экспериментальных базах данных, в теоретических исследованиях и математических моделях, в расчётных кодах, в тематической литературе и технической документации. Все эти знания являются достоянием человечества.

Современные информационные технологии, позволяют организовать обработку всех доступных данных по УТС в единой системе таким образом, что совокупная отдача от исследований будет больше, чем при обособленной обработке данных на отдельных установках, т.е. достигается синергетический эффект. К такого рода массовой обработке данных можно отнести задачи перекрёстной проверки расчётных кодов, задачи интеллектуального анализа данных (в иностранной литературе – Data Mining - раскопки знаний), задачи многовариантной оптимизации и классификации разрядов по физическим признакам, построение эмпирических моделей, и моделирования сценариев, визуализацию данных и др.. Ярким примером

объединения усилий в этом направлении является проект ITER, в концепцию которого заложено распределение экспериментальных данных по всем странам-участницам проекта. На этом фоне постепенный переход к единому информационному пространству сообщества УТС видится вполне логичным.

В 2004 году задача распределения и анализа больших объемов экспериментальных данных возникла в физике высоких энергий в связи с запуском Большого Адронного Коллайдера в Церне. Для решения этой задачи были объединены вычислительные ресурсы основных исследовательских центров в области физики высоких энергий в рамках виртуальной организации World Large Computing Grid (WLCG). В России, как часть WLCG был создан консорциум RDIG (Russian Data-Intensive Grid), объединяющий вычислительные ресурсы 11-ти российских исследовательских центров (JINR-LCG2, RRC-KI, KIAM, Phys-SPbSU, Protvino-IHEP, Troitsk-INR, IMPB-LCG2, Moscow-FIAN, Moscow-МЕРФИ, PNPI-LCG2 (Gatchina), Moscow-SINP).

В 2008 году в РНЦ «Курчатовский институт» на основе RDIG была разработана концепция и создана экспериментальная модель российской Grid для УТС – *Russian-Fusion Grid* (Семенов И.Б., Вознесенский В.А., Марусов Н.Л.; *Грид технологии для УТС: Концепция единого информационного пространства и работа с данными установки ITER*; 2009; ИАЭ-6608/6).

В настоящее время для совместной научно-исследовательской деятельности в области УТС в России создается аппаратно-инфраструктурная платформы информационно-коммуникационного пространства (АИП ИКП) – FusionSpace.ru.

Внедрение FusionSpace.ru. сделает возможным:

- Совместное планирование и проведение дистанционных научных исследований, информационное взаимодействие в рамках экспериментальных программ по УТС, разработку и принятие научных решений;

- Создание централизованной базы экспериментальных данных, научных публикаций, электронных справочников, реестров научного и экспериментального оборудования и иной публичной информации;

- Сохранение уникальных решений мировой практики в области УТС и последующего их распространения и внедрения в отрасль, в т.ч. на основе опыта Международной организации ИТЭР.

Однако для предоставления вышеперечисленных возможностей необходимо решить следующие задачи:

1. Как сделать единообразным доступ к данным различных установок?
2. Как организовать гибкую выборку данных с различных установок по заданным критериям?
3. Как единообразно описать возможности установок?
4. Как единообразно описать расчётные коды?
5. Как обеспечить информационную безопасность и защитить авторские права исследовательских организаций и отдельных ученых, результаты которых становятся общим достоянием в рамках FusionSpase.ru?

Все вышеперечисленные задачи взаимосвязаны. Небольшая часть из них была решена ранее при создании Russian-Fusion Grid.

В докладе представлены возможные пути решения выше поставленных задач на платформах *Russian-Fusion Grid* и *FusionSpase.ru*.

Доклад представляет интерес для физиков и инженеров, работающих в области управляемого термоядерного синтеза.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 22.03.2023 № Н.4к.241.09.23.1036 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в РФ. Этап 2023-2024 годов».

# ПОДХОДЫ К СБОРУ, ХРАНЕНИЮ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ УТС-УСТАНОВОК РФ В АИП ИКП

Вишня А.С.<sup>1</sup>, Гусев Д.М.<sup>1</sup>, Ларионов А.С.<sup>2</sup>, Лебедева А.В.<sup>1</sup>,  
Миронова Е.Ю.<sup>2</sup>, Портоне С.С.<sup>2</sup>, Семенов О.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Общество с ограниченной ответственностью «АйТинерис»,  
Калининград, Россия, [research@itneris.ru](mailto:research@itneris.ru)*

<sup>2</sup>*Частное учреждение «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия,  
[dvp-conf@iterrf.ru](mailto:dvp-conf@iterrf.ru)*

В настоящее время в России функционирует ряд установок и стендов, на базе которых проводятся исследования в области управляемого термоядерного синтеза. Данные исследования играют ключевую роль в контексте отечественной программы по развитию управляемого термоядерного синтеза и выполнения российских обязательств перед международным проектом ИТЭР. Гетерогенная природа форматов данных, продуцируемых установками и стендами, а также территориальная рапределённость ведущих в данной тематике научно-исследовательских центров [1] являются вызовом для проведения совместных исследований в указанной предметной области.

С учётом лучших международных практик, в частности, стандартов и подходов международного проекта ИТЭР, осуществляется разработка и развитие платформы совместной работы с экспериментальными данными термоядерных исследований (аппаратно-инфраструктурная платформа информационно-коммуникационного пространства в области управляемого термоядерного синтеза – АИП ИКП, FusionSpace) [2].

В докладе рассматриваются методы обеспечения интеграционного взаимодействия создаваемой платформы с заданным периметром УТС-установок РФ, структуры формируемых и подлежащих сбору, обработке и хранению экспериментальных данных термоядерных исследований, математические методы, применяемые как на этапе визуализации (с точки зрения занижения дискретизации – Downsampling [3]), так и на этапе пользовательской



обработки экспериментальных данных. Приводятся примеры организации графического пользовательского инструментария для работы с экспериментальными данными УТС-установок РФ в АИП ИПК. Рассматриваются перспективы развития практики обработки экспериментальных данных, основанной на использовании современного научно-технического, программного и аппаратного базисов.

Работа выполнена в рамках договора на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы №17706413348230000240/55-23/01 от 30.06.2023 г. (Государственный контракт с Госкорпорацией «Росатом» от 22.03.2023 Н.4к.241.09.23.1036 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в Российской Федерации. Этап 2023 - 2024 годов»).

### Литература

- [1]. Семенов О.И., Лобес Л.А., Потапов А.М., Степанов Д.Н., Портоне С.С., Ларионов А.С., Нагорный Н.В., Миронова Е.Ю., Ежова З.В., Семенов И.Б.: Опыт России в разработке и тестировании элементов для удалённого участия в эксперименте ИТЭР // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 4, стр. 56-60.
- [2]. Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Семенов О.И., Ежова З.В., Семенов Е.В., Миронов А.Ю., Ларионов А.С., Нагорный Н.В., Звонарева А.А., Григорян Л.А., Гужев Д.И., Николаев А.И., Семенов И.Б., Красильников А.В.: Развитие аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства как инструмента интеграции исследований в области УТС // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 4, стр. 34-44.
- [3]. Sveinn Steinarsson: Downsampling Time Series for Visual Representation // M.Sc. thesis, Faculty of Industrial Engineering, Mechanical Engineering and Computer Science, University of Iceland, 2013.

# КОНЦЕПЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ДИАГНОСТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ УСТАНОВКИ ТРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА

Ежова З.В., Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Семенов О.И.,  
Миронов А.Ю.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия*  
[Z.Ezhova@iterrf.ru](mailto:Z.Ezhova@iterrf.ru)

Современная модель научной деятельности предполагает высокий уровень цифровизации, способствующий оптимизации процессов и повышению их эффективности. Актуальной задачей является цифровизация процесса проведения научных исследований на диагностическом комплексе перспективной установки Токамака с Реакторными Технологиями (TRT) посредством внедрения единого информационного пространства участников УТС исследований.

Технологической базой единого информационного пространства совместных исследований в области УТС в Российской Федерации является аппаратно-инфраструктурная платформа информационно-коммуникационного пространства (АИП ИКП или FusionSpace), разрабатываемая с 2021 года и в данный момент находящаяся на стадии прототипа. Совместное использование платформы FusionSpace обеспечивает осуществление процессов участия в научном эксперименте, централизованного хранения научных данных, их анализа и отображения, а также информационного взаимодействия и использования специализированных сервисов. В рамках внедрения единого информационного пространства для проведения научных исследований на диагностическом комплексе установки TRT также предполагается интеграция распределенной системы совместного проектирования.

В докладе представлен подход к созданию единого информационного пространства научных исследований на диагностическом комплексе установки TRT, который планируется использовать при дальнейшей разработке платформы FusionSpace.

Работа выполнена в рамках государственного контракта с Госкорпорацией «Росатом» от 22.03.2023 Н.4к.241.09.23.1036 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в Российской Федерации. Этап 2023 - 2024 годов».

# ЕДИНЫЙ РАСЧЁТНЫЙ СЕГМЕНТ ДЛЯ УТС-ИССЛЕДОВАНИЙ

Ларионов А.С., Семенов О.И., Портоне С.С., Миронова Е.Ю.,  
Нагорный Н.В.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», [A.Larionov@iterrf.ru](mailto:A.Larionov@iterrf.ru)*

В рамках создания аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства (АИП ИКП) в области УТС исследований в Российской Федерации осуществляется разработка и внедрение производительной и отказоустойчивой инфраструктуры для проведения расчетов в УТС исследованиях.

Расчетный сегмент платформы ИКП представляет собой комплекс аппаратных и программных средств: серверы для вычисления на центральных и графических процессорах, коммутаторы, хранилища данных, а также системное ПО, инструменты программирования, библиотеки для математических расчетов и т.д.

При создании единого расчетного сегмента платформы ИКП особенное внимание было уделено обеспечению бесперебойной работы, отказоустойчивости, информационной безопасности и возможности дальнейшего масштабирования ресурсов при увеличении запроса научного сообщества.

В докладе рассматриваются архитектура, применяемый инструментарий, технологические аспекты и планы развития единого расчётного сегмента платформы ИКП.

В данной работе преследуется цель познакомить архитекторов информационных систем, инженеров и исследователей, связанных с моделированием физических процессов, с современными решениями в области кластерных высокопроизводительных вычислений.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта от 22.03.2023 №Н.4к.241.09.23.1036 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в Российской Федерации. Этап 2023 - 2024 годов».

# РАСПОЗНАВАНИЕ ОШИБОЧНЫХ ДАННЫХ ДИАГНОСТИК С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Лешов Н.В.<sup>1</sup>, Щербак А.Н.<sup>1</sup>, Лазукин А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", Троицк, Россия, [leshov@triniti.ru](mailto:leshov@triniti.ru)

Одной из наиболее перспективных установок для получения энергии термоядерного синтеза является токамак. Однако на пути практической реализации таких установок стоит немало задач, которые требуют большого числа исследований и, соответственно, сбора и анализа огромного количества экспериментальных данных. При этом во время сбора данных могут возникать сбои в измерительных устройствах, что может увеличить время обработки данных и усложнить их анализ. Также следует отметить, что в системе управления токамаком используются данные, полученные с различных диагностик (например, система управления газонапусом использует данные о плотности плазмы [1]). В связи с этим при возникновении сбоев в работе измерительных приборов система управления может работать некорректно, что может привести к неблагоприятным последствиям, например, к разрушению внутрикамерных элементов. Большая вариативность данных и высокая скорость физических процессов во время плазменных разрядов затрудняют использование методов, основанных на традиционных подходах. С другой стороны, методы, основанные на машинном обучении, успешно используются для обнаружения и диагностики неисправностей в различных механизмах [2]. В данной работе рассматривается возможность использования многослойного перцептрона [3] (тип искусственной нейронной сети) для распознавания ошибочных данных диагностик. Эта модель может быть применена не только для ускорения анализа данных (отбора данных без ошибок), но и для использования в системе управления токамаком с целью предотвращения некорректной работы. Для обучения модели были выбраны экспериментальные

данные, полученные на токамаке Т-11М из экспериментальной кампании 2016 года, содержащей 852 разряда. Для подтверждения концепции в работе были использованы только данные среднечордовой электронной плотности, полученные с интерферометра. Примеры первичных сигналов электронной плотности с ошибками представлены на рисунках 1 и 2. Все данные были усреднены до 512 точек, приведены к нулю и размечены вручную на наличие ошибок. Затем данные были разбиты на «окна» размером 20 точек с шагом 1 точка. Таким образом, окончательный размер данных составил 420036 образцов. Все данные были традиционно разбиты на две выборки: обучающую (70%) и тестовую (30%). Модель многослойного персептрона содержит 4 слоя: входной слой (20 нейронов), 2 скрытых слоя (по 100 нейронов каждый) и выходной слой (1 нейрон). Процесс обучения занял 3500 итераций, при этом потери достигли 0,08 (тестовая выборка: 0,1). Для оценки результативности модели было проведено сравнение с методом пороговых значений, в котором данные считаются ошибочными при превышении заданного значения. Наибольшая точность этого метода составила 89,2% при пороговом значении  $-0,03В$ , при этом средняя задержка распознавания составила 4,18 мс. С другой стороны, точность распознавания моделью многослойного персептрона достигла 97%, а средняя задержка распознавания составила 0,89 мс. Время вычисления одного предсказания в среднем занимало 0,2 мс. Таким образом, предлагаемое решение для распознавания ошибочных данных диагностик демонстрирует более высокую точность и меньшую задержку распознавания, что свидетельствует о возможном применении в системах управления токамаком в реальном времени и для ускорения анализа данных.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 23-29-00265.

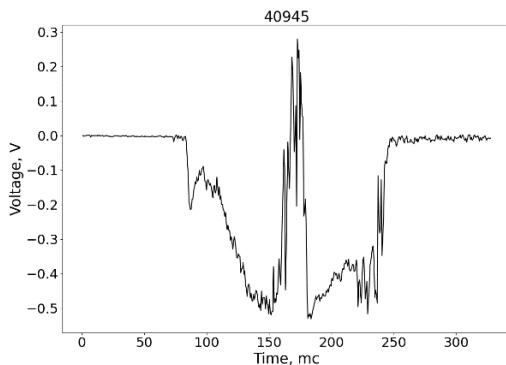


Рис. 1 – Пример ошибочных данных разряда №40945 при превышении чувствительности прибора.

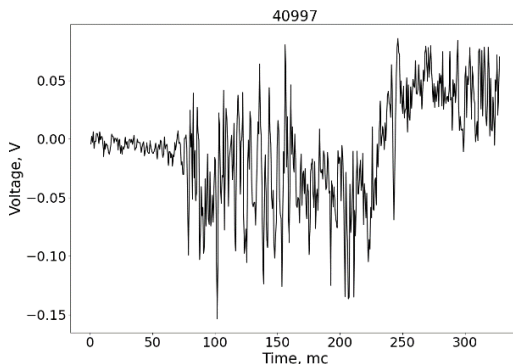


Рис. 2 – Пример ошибочных данных разряда №40997 при неисправности прибора.

## Литература

- [1]. Shu S. et al. An intelligent controller design based on the neuroendocrine algorithm for the plasma density control system on Tokamak devices. *Fusion Engineering and Design*. 161 (2020) 111965.
- [2]. Saufi S. R. et al. Challenges and opportunities of deep learning models for machinery fault detection and diagnosis: A review // *Ieee Access*. – 2019. – Т. 7. – С. 122644-122662.
- [3]. Jain A. K., Mao J., Mohiuddin K. M. Artificial neural networks: A tutorial // *Computer*. – 1996. – Т. 29. – №. 3. – С. 31-44.

# ОБРАБОТКА ДАННЫХ НАУЧНОГО УТС ЭКСПЕРИМЕНТА С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Григорян Л.А., Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Семёнов О.И.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,  
[L.Grigorian@iterrf.ru](mailto:L.Grigorian@iterrf.ru)*

Основной трудностью большинства научных отраслей является обработка большого объема экспериментальных научных данных, требующих анализа и обработки. Благодаря технологическому прогрессу и появлению новых вычислительных технологий, весомую часть нагрузки по анализу этих данных удалось автоматизировать и перевести на мощности вычислительных систем, что позволило решать более сложные и емкие научные задачи.

Развитие вычислительной техники продвигается достаточно быстрыми темпами, инструменты для анализа научных данных внедряются регулярно. Наиболее популярной и современной технологией автоматизации анализа данных экспериментов является внедрение искусственного интеллекта (ИИ). Для работы с научными данными используется методология машинного обучения. Машинное обучение анализирует набор данных исходя из признаков (параметров) и имеющихся в базе алгоритмов (методов), находя закономерности, зависимости, выполняя идентификацию данных, их классификацию, оценку и прогнозирование, в зависимости от поставленной задачи.

В докладе рассматриваются современные инструменты ИИ для решения задач анализа научных данных. Описывается применение машинного обучения, его виды, технологии обучения. Рассматривается применение машинного обучения для работы с графическими источниками данных (камерами, визорами). Приводятся примеры реализованных отечественных и иностранных проектов по анализу научных данных различных



областей. Рассматривается вектор дальнейшего развития и польза для науки.

Целью данной работы является знакомство с методами применения и разработки интеллектуальных систем для анализа данных эксперимента. В работе приводятся примеры использования инструментов ИИ в зависимости от поставленных перед разработчиком задач и особенностей разрабатываемой системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» в рамках Государственного контракта от 22.03.2023 Н.4к.241.09.23.1036 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в Российской Федерации. Этап 2023 - 2024 годов».

# ИМИТАТОР СИГНАЛОВ КАМЕР ДЕЛЕНИЯ ДИВЕРТОРНОГО МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ИТЭР

Джурик А.С., Воробьев В.А., Николаев А.И., Кашук Ю.А.,  
Кормилицын Т.М., Степанов С.Б.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», [a.dzhurik@iterrf.ru](mailto:a.dzhurik@iterrf.ru)*

Диагностика Диверторный монитор нейтронного потока (ДМНП) входит в состав комплекса нейтронных диагностик ИТЭР и предназначена для измерения полного нейтронного потока и термоядерной мощности токамака-реактора. Диагностика состоит из трех одинаковых подсистем, в каждой из которых измерение нейтронного потока производится с помощью 2-х трехсекционных ионизационных камер деления (ИКД).

Для обработки сигналов ИКД в I&С ДМНП в каждом измерительном канале применяются три алгоритма измерения (счетный, флуктуационный и токовый), которые работают одновременно с временным разрешением 1 мс. Ожидаемая загрузка по каждому измерительному тракту: 104 - 108 имп/с. В каждой подсистеме рассчитывается 18 значений скоростей счета и значение нейтронного потока. Такая сложная измерительная система необходима для удовлетворения требований ИТЭР по диапазону измерений, погрешностям и надежности.

В докладе представлены текущие результаты разработки 6-ти канального имитатора сигналов детекторного модуля ДМНП. Имитатор представляет собой аппаратно-программный комплекс, позволяющий синхронно по 6-ти каналам генерировать сигналы, подобные сигналам ИКД. Имитатор предназначен для комплексной наладки системы сбора данных ДМНП, а также может быть использован при проведении приемочных испытаний на площадке ИТЭР.

Имитатор сигналов реализован в виде трёх одинаковых, аппаратно независимых, устройств на базе персональных компьютеров (ПК) в специальной комплектации. Для генерации

импульсов имитатора ИКД в каждом ПК установлена двухканальная плата генератора сигналов произвольной формы.

Управление имитатором осуществляется специально разработанным ПО, которое обеспечивает:

- настройку плат генераторов сигналов произвольной формы;
- расчет последовательности импульсов в соответствии с заданной тестовой динамикой полного нейтронного потока и термоядерной мощности;
- формирование загрузочных (тестовых) файлов с сигналами, имитирующими динамику полного нейтронного выхода;
- генерацию (разовую или циклическую) сигналов на выходах имитатора.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.22.1014 от 18 января 2023 г. «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

### **Литература**

- [1]. В.А. Воробьев, С.Ю. Обудовский, Ю.А. Кашук. Методика определения времени сбора заряда и среднего заряда импульса ионизационной камеры деления. Измерительная техника №2, 2019
- [2]. Zs. Elter, C. Jammes, I. Pázsit, L. Pál, P. Filliatre, «Performance investigation of the pulse and Campbell modes of a fission chamber using a Poisson pulse train simulation code», Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 774 (2015) 60–67

# ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ВНК С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКИ

Голачев В.М., Немцев Г.Е., Нагорный Н.В., Гужев Д.И.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», г. Москва, Россия,*  
[v.golachev@iterrf.ru](mailto:v.golachev@iterrf.ru)

В работе приведены результаты испытаний компонентов системы регистрации сигналов алмазного детектора, разработанной для диагностической системы Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК) ИТЭР [1]. Целью испытаний является определение электрических параметров сигналов детекторов ВНК: амплитуды, длительности и формы фронта и спада импульсов, а также энергетического разрешения и отношения сигнал/шум. Погрешность измерений диагностической системы зависит от работы ее отдельных элементов. Для выбора оптимальных составляющих ВНК необходимо тестирование каждого из компонентов системы и проведение отбора из ряда функционально похожих применяемых элементов согласно полученным результатам испытаний.

Сигналы алмазных детекторов представляют собой слабые импульсы тока амплитудой до 10 мкА и длительностью 1-10 нс [2]. Измерение сигналов происходит в виде связанных последовательных событий, таких как: преобразование зарядов алмазного детектора в ток/напряжение, формирование необходимой формы импульсов сигналов, усиление и передача сигналов по оптоволокну для повышения помехоустойчивости и осуществления гальванической развязки аналоговой части системы от цифровой, предварительная обработка сигналов и построение спектров отклика детектора.

В докладе приведены экспериментальные данные, показывающие результаты тестирования компонентов системы регистрации ВНК, а именно: детекторов заряженных частиц, длинных кабелей связи детекторов с предусилителями (в том

числе и радиочастотных кабелей с минеральной изоляцией), предусилителей, оптической аналоговой гальванической развязки, цифрового анализатора сигналов. Аппаратура регистрации и обработки сигнала включала в себя: АЦП NI-5772 с частотой оцифровки – 800 МГц и многофункциональный программируемый модуль ввода-вывода NI PXIe-7976.

Доклад представляет интерес для физиков и инженеров, работающих в области атомной физики, физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.23.1014 от 18 января 2023 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

### **Литература**

- [1]. Concept Design and Integration Aspects of ITER Vertical Neutron Camera / L. Bertalot [et al.] // Proceedings of Science. — 2015.
- [2]. Charge-carrier properties in synthetic single-crystal diamond measured with the transient-current technique / H. Pernegger [et al.] // Journal of Applied Physics - J APPL PHYS. — 2005. — Apr. — Vol. 97.

# ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА

Гужев Д.И.<sup>1</sup>, Нагорный Н.В.<sup>1</sup>, Михалёв И.М.<sup>1</sup>, Николаев А.И.<sup>1</sup>,  
Нестеренко В.М., Немцев Г.Е.

<sup>1</sup>Частное учреждение «Проектный центр ИТЭР», Москва,  
Россия, [d.guzhev@iterrf.ru](mailto:d.guzhev@iterrf.ru)

Основная роль диагностики Вертикальной Нейтронной Камеры установки ИТЭР заключается в измерении в режиме реального времени профиля нейтронов при высоких пиковых скоростях счета в течение всего плазменного импульса. Учитывая высокую производительность необходимой обработки, был проведен комплекс мероприятий, ориентированный на создание прототипа системы, способного продемонстрировать возможность реализации требуемых вычислений для защиты финального проекта диагностики ВНК. В данном докладе представлены шаги по разработке этого прототипа: проектирование, разработка и тестирование специализированного программного обеспечения FPGA для прототипа сбора данных ВНК, а также технологию интеграции полученных результатов в центральную систему управления установкой ИТЭР CODAS.

Рассматриваемый FPGA код реализует функции получения, обработки в режиме реального времени и хранения нейтронных импульсов от детекторов, расположенных в коллимированных линиях обзора секции полоидальной плазмы в одном из портов вакуумной камеры ИТЭР. В качестве аппаратной платформы использовалась плата NI FlexRIO 7976R с FPGA от Xilinx (KC705) с двумя каналами АЦП NI 5772 с 12-битным разрешением и возможностью оцифровки до 800 млн отсчетов/с, а также промышленный компьютер PICMG 1.3. Представленный код выполняет преобразование входного сигнала, используя дискретизацию с понижением частоты до 400

МГВыборок/с, применяет специальные алгоритмы для обнаружения импульсов, фильтрации и определения доли наложений.

В ходе разработки были проведены тесты нескольких алгоритмов обработки, а именно: амплитудный анализ, учитывающий пропорциональность энергии нейтронов и амплитуды их сигналов, и зарядовый анализ, учитывающий, что площадь импульса (заряд) пропорциональна энергии частиц. Реализация передачи данных включила в себя два различных потока - поток сырых данных для последующего сохранения и поток обработанных данных для получения требуемых физических характеристик. Для непрерывной передачи данных оба потока передаются на промышленный компьютер через два отдельных канала доступа к памяти (DMA).

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 14.02.2022 № Н.4а.241.19.22.1123 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2022 году».

# DEGASUM – ПРОГРАММА СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НЕЙТРОННОЙ, РЕНТГЕНОВСКОЙ И ГАММА ДИАГНОСТИК ПЛАЗМЫ ТОКАМАКОВ

Хилькевич Е.М.<sup>1</sup>, Шевелев А.Е.<sup>1</sup>, Скрекель О.М.<sup>1</sup>, Бахарев Н.Н.<sup>1</sup>,  
Дойников Д.Н.<sup>1</sup>, Найденов В.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация, [evgeniy-hila@yandex.ru](mailto:evgeniy-hila@yandex.ru)*

Программный пакет DeGaSum (DEconvolution of GAMMA SpectrUM) предназначен для сбора и обработки данных в рамках диагностики высокотемпературной плазмы по нейтронному, гамма и жёсткому рентгеновскому излучению. Программа обладает следующим функционалом:

- позволяет осуществлять управление и сбор данных с различных плат АЦП, в том числе Spectrum M4X-4470-x4, NI 5761, NI 5164, NI 5772, ИнСис ADM201x1, ИнСис FM212x1G, ИнСис ADM214x400, ИнСис ADM414x65m. Возможен сбор сигнала в непрерывном режиме без потери данных в течение длительного времени (400 секунд и более), если это позволяет аппаратная архитектура платы и производительность управляющего компьютера. Может использоваться как сохранение только отдельных фрагментов сигнала, содержащих импульсы, так и сохранение всего сигнала целиком с использованием алгоритмов компрессии. Поддержка различных АЦП реализована в виде подключаемых плагинов и может быть расширена в будущем для нового оборудования;
- позволяет проводить обработку записанной осциллограммы. При обработке происходит анализ сигнала, включающий динамическое определение нулевой линии, определение амплитуды каждого импульса от поглощения рентгеновского, гамма кванта или нейтрона с помощью одного из нескольких



реализованных алгоритмов, разделение наложенных импульсов, в тех случаях, когда это возможно. Для нейтронных измерений производится нейтрон-гамма разделение зарегистрированных событий. После обработки происходит формирование массива данных «время-амплитуда» для разрешённых событий регистрации гамма-квантов или нейтронов с дополнительной информацией о неразрешённых событиях;

- по построенному массиву время-амплитуда программа может строить спектр нейтронного, гамма и жёсткого рентгеновского излучения, а также зависимость потока от времени, в выбранных временных или энергетических окнах. При построении делается поправка на неразрешённые события;
- с привлечением рассчитанной функции генерации жёсткого рентгеновского излучения убегающими электронами и аппаратной функции детектора программа может по измеренному спектру провести восстановление функции распределения убегающих электронов по энергии;
- с привлечением рассчитанной или измеренной функции отклика детектора программа может проводить восстановление энергетического спектра нейтронов по зарегистрированному детектором спектру;
- с привлечением аппаратной функции детектора и информации об ослаблении гамма-излучения на пути от токамака к детектору возможно восстановление спектра гамма-излучения в токамаке по измеренному детектором спектру;
- с привлечением данных о функциях возбуждения гамма-переходов в ядерных реакциях между быстрыми ионами и примесями, а также при возможности параметризации формы распределения быстрых ионов в плазме токамака, программа позволяет восстановить энергетическое распределение быстрых ионов по интенсивности линий на измеренном спектре гамма-излучения;
- программа позволяет проводить восстановление энергетического и углового распределений быстрых ионов по

доплеровской форме линий гамма-излучения, зарегистрированного HPGe детектором.

Разработанная программа DeGaSum использовалась в ходе измерений и при обработке и интерпретации результатов в течение последних 12 лет различными научными группами. В частности, с помощью программы DeGaSum:

- были обработаны данные, полученные в ходе измерений с помощью гамма и рентгеновских диагностик на токамаке JET. Получены функции распределения по энергии убегающих электронов и быстрых ионов [1];
- был проведён сбор и обработка сигнала, измеренного с помощью детектора жёсткого рентгеновского излучения REGARDS на токамаке ASDEX. Проведена обработка полученных данных, получены функции распределения убегающих электронов [2];
- регулярно проводятся измерения жёсткого рентгеновского излучения на токамаках ФТ-2, Туман-3М, Глобус-М2. Проводятся измерения нейтронного излучения на токамаке Глобус-М2. По измеренным данным восстановлены функции распределения убегающих электронов на токамаках ФТ-2, Туман-3М, энергетический спектр нейтронов на токамаке Глобус-М2. [3,4,5,6]

Программа обладает графическим интерфейсом и интерфейсом командной строки, в ходе сбора данных может работать в автоматическом режиме без поддержки со стороны оператора. Программа работает под управлением ОС Windows и Linux.

## Литература

- [1]. V. Plyusnin, et al, 2012 24th IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, USA, 8th–13th Oct. — 2012.
- [2]. A. Shevelev et al, Nuclear Fusion. — 2021. — Vol. 61, No 11. — С. 116024
- [3]. A. Shevelev et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A — 2016. — Т. 830. — С. 102—108.

- [4]. A. Shevelev et al., Plasma Physics and Controlled Fusion. — 2018. — 05 — Vol. 60, No 7., 075009
- [5]. M. Iliasova et al, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A — 2020. — Vol. 983. — C. 164590
- [6]. E. Khilkevitch et al, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A — 2020. — Vol. 977. — 164309

# СИНХРОНИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАГНОСТИКИ ДМНП СО ВРЕМЕНЕМ ИТЭР

Астафьев А.С., Мартазов Е.С., Парышкин Ю.А., Селяев Н.А.

*Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ», Москва, Российская Федерация, [martazov@list.ru](mailto:martazov@list.ru)*

Диверторный монитор нейтронного потока (ДМНП) является одной из диагностик, предназначенных для определения полного нейтронного выхода и термоядерной мощности международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР). Система сбора и обработки данных (ССД) ДМНП [1] состоит из трех подсистем, каждая из которых обрабатывает сигналы шести ионизационных камер деления.

ССД ДМНП должна поставлять измерительную информацию операторам и системам-стейкхолдерам с привязкой ко времени ИТЭР. Требования к временной синхронизации вытекают из сценариев использования и требований к системе со стороны ИТЭР. В ССД ДМНП можно выделить три типа функций со схожими требованиями:

- измерительные функции (запуск и остановка системы в необходимое время, сбор и публикация исходных данных, обработка измерительной информации в реальном времени, публикация результатов измерений в сетях SDN и DAN);

- функции, требующие привязки ко времени ИТЭР (формирование предупреждений и сообщений, обработка событий, обнаружение сбоев и неисправностей во время работы, отслеживание состояния системы и формирование логов);

- сервисные функции, не требующие привязки ко времени ИТЭР (калибровка системы, мониторинг состояния системы в целом и оценка состояния отдельных компонентов, выполнение работ по обслуживанию системы).

Для синхронизации процессов в трактах и каналах подсистем и привязки результатов измерений к времени ИТЭР применяется модуль синхронизации времени NI PXI-6683Н,

который получает значения времени от CODAC через сеть TCN по протоколу IEEE 1588 Precision Time Protocol (PTPv2). Протокол PTPv2 обеспечивает точность синхронизации 1 мс. При использовании методов подстройки для модуля NI и сети TCN можно достичь точности синхронизации со среднеквадратичным отклонением 50 нс [2]. Предварительная обработка данных измерений выполняется модулем FlexRIO NI PXIe-7976R. Для привязки времени к измерениям в программном обеспечении модуля каждому результату измерений присваивается номер, представляющий собой значение 64-разрядного счетчика опорной частоты в момент формирования результата. По командам от модуля синхронизации времени модуль FlexRIO передает в промышленный компьютер значение счетчика, что позволяет точно сопоставить его со значением времени модуля синхронизации. В докладе рассматривается способ привязки меток времени к данным при публикации в сетях SDN и DAN, планируемый к использованию в поставочных образцах ССД ДМНП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Частного учреждения «ИТЭР-Центр» в рамках договора №17706413348230000070/10-23/01 от 05.04.2023 г.

### **Литература**

- [1]. V.A. Fedorov et al «Study of the Data Acquisition System for ITER Divertor Neutron Flux Monitor Diagnostic», IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020 Vol. 67, No. 4, pp. 688-693.
- [2]. G. Liu, P. Makijarvi, N. Pons «The ITER CODAC network design», Fusion Engineering and Design, May 2018 Vol. 130, pp. 6-10.

# РАЗРАБОТКА НЕЗАВИСИМЫХ ЧЕЛОВЕКО- МАШИННЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ ИТЭР НА БАЗЕ ПЕРЕМЕННЫХ CODAC ДЛЯ УДАЛЕННЫХ УЧАСТНИКОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Д. Тушин<sup>1</sup>, О. Семенов<sup>1</sup>, Н. Нагорный<sup>1</sup>, С. Портоне<sup>1</sup>, А. Потапов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Частное учреждение «ИТЭР-Центр», г. Москва, Россия.

ИТЭР – один из самых сложных и амбициозных энергетических проектов, который реализуется при участии семи равноправных партнеров и более тридцати стран-участниц. Соглашение о строительстве и использовании реактора ИТЭР предусматривает доступ к результатам экспериментов для всех участников проекта. В связи с этим, в систему сбора данных установки закладывается возможность удаленного доступа и дистанционного участия в процессе (онлайн) проведения эксперимента. Благодаря удалённому доступу к системе сбора данных ИТЭР (CODAC) и доступа к значениям переменных EPICS операторы в Центрах Дистанционного Участия по всему миру могут отслеживать параметры объекта по мере их изменения. Это позволяет создавать независимые от Международной Организации проекты экранов операторов для локальных задач, что дает возможность настраивать средства отображения под каждого участника эксперимента.

Цель данной работы заключалась в проверке работоспособности такого подхода, для чего была проведена разработка(моделирование) программного решения экрана оператора, подключенного к системе сбора данных ИТЭР. В ходе данной работы были определены проблемы и технические трудности создания экранов операторов диагностических систем удаленно без участия основной команды управления установкой. В качестве программных средств, выбранных для разработки, использовались классические для ИТЭР решения: CSS и SDD Editor, которые являются частью системы CODAC Core System используемой на терминалах Центров Дистанционного Участия,

соответствующих требованиям Международной Организации ИТЭР.

В результате было разработано программное обеспечение для функционирования экрана оператора на базе переменных системы сбора данных ИТЭР. Разработанный интерфейс обеспечивает оператора информацией о текущем состоянии системы мостовых кранов и позволяет в реальном времени отслеживать работу грузоподъемных механизмов. Выявленные в процессе данной работы проблемы передачи переменных системы сбора данных ИТЭР будут решены на следующих этапах.

Работа выполнена по государственному контракту с ГК Росатом» от 18.01.2023 № Н.4а.241.19.23.1014»

# ГАЛЬВАНИЧЕСКИ ИЗОЛИРОВАННЫЕ РЕГИСТРАТОРЫ

Хильченко В.А.<sup>1</sup>, Хильченко А.Д.<sup>1</sup>, Квашнин А.Н.<sup>1</sup>, Пурыга Е.А.<sup>1</sup>,  
Иваненко С.В.<sup>1</sup>, Зубарев П. В.<sup>1</sup>, Моисеев Д. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Организация: *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*, [a.d.khilchenko@inp.nsk.su](mailto:a.d.khilchenko@inp.nsk.su)

Модули регистрации данных с глубокой гальванической изоляцией измерительных трактов и гальванически изолированные регистраторы ориентированы на фиксацию в осциллографической форме сигналов датчиков, работающих в тяжелой электромагнитной обстановке, а также находящихся под высоким постоянным или импульсным потенциалом [1].

Четырех и восьмиканальные приборы первого типа с амплитудным динамическим диапазоном от 200мВ до 10В строятся на основе ИС дельта-сигма модуляторов и DC-DC преобразователей, включающих в свой состав изолирующий барьер с предельно допустимым напряжением до 2500В. Цифровой узел этих приборов, реализованный на элементах программируемой логической матрицы, из однобитового потока данных модуляторов формирует 9-13 разрядные результаты измерений с эквивалентной частотой дискретизации до 1МГц, накапливает их в буферном ЗУ, а затем пересылает интерфейсному модулю, обеспечивающему обработку данных по характерным для конкретной диагностики алгоритмам и передачу результатов измерений по каналу связи Ethernet консольному компьютеру. На установке ГДЛ на основе приборов этого типа построена система регистрации сигналов торцевого плазмоприемника, использующая в качестве датчиков 63 пироэлектрических болометра с выходными токами наноамперного диапазона. Максимальная разность потенциалов локальных “земель” датчиков в этой системе может достигать значения в 1кВ [2]. На установке САТ в составе системы управления и контроля восьми и четырехканальные модули регистрации с глубокой гальванической изоляцией измерительных узлов, благодаря высокой помехозащищенности последних, с успехом выполняют функции



цифровых вольтметров и регистраторов импульсных сигналов в контрольных точках вакуумной и магнитной подсистем, источника плазмы, инжекционного и диагностического комплексов.

Гальванически изолированные регистраторы, в отличие от приборов предыдущего типа, помимо измерительных трактов на основе АЦП повышенной разрядности и средней производительности, а также цифрового узла с буферным ЗУ большой емкости, включают в свой состав двунаправленный последовательный оптоволоконный канал связи с внешним интерфейсным модулем и встроенный импульсный источник питания на основе аккумуляторов. Напряжение гальванической изоляции в измерительных подсистемах, строящихся на основе этих приборов, определяется электрической прочностью оптоволоконных линий и может иметь величину в десятки и сотни киловольт. Основным достоинством приборов этого типа является их способность надежно фиксировать сигналы датчиков, в том числе микровольтового и наноамперного уровня, в крайне неблагоприятных электромагнитных условиях. Она реализуется благодаря жесткой привязке потенциала земли регистратора к потенциалу локальной “плавающей” земли датчика/датчиков, размещению этих элементов в наиболее ответственных приложениях вблизи друг друга, желательно в рамках единого конструктива, а также использованию ими одного и того же встраиваемого импульсного источника питания. В настоящее время на установках ГДЛ и САТ применяются: восьмиканальный регистратор на основе 14-ти разрядных АЦП с максимальным значением частоты дискретизации 125КГц, 4-х канальный на базе 16-ти разрядных АЦП с частотой дискретизации 1МГц и двухканальный на основе 12-ти разрядных АЦП с частотой дискретизации 10МГц. Первый входит в состав измерительного узла анализатора нейтральных атомов и ориентирован на фиксацию токовых сигналов микроканальной пластины амплитудой в десятки-сотни наноампер, локальная земля которых находится под потенциалом до 1.5кВ. Остальные приборы с успехом используются на установке ГДЛ для регистрации диамагнетизма плазмы и сигналов ленгмюровских зондов, плавающий потенциал земли которых, “привязанный” к потенциалу плазмы, может достигать киловольта и более [3]. Длительность цикла регистрации

определяется объемом встроенных ЗУ, который, в зависимости от модели прибора, изменяется в диапазоне от 256К до 2М отсчетов/канал. Рабочий цикл регистраторов начинается с момента включения импульсного источника питания внешним сигналом управления, поступающим от интерфейсного модуля по одной из оптоволоконных линий. По этой же линии от интерфейсного модуля поступает и сигнал запуска, инициирующий начало цикла записи формируемых АЦП потоков данных в буферное ЗУ. После заполнения ЗУ автоматически запускается процедура передачи зафиксированного им информационного массива интерфейсному модулю по второй оптоволоконной линии. По окончании этой процедуры источник импульсного питания выключается. В дежурном режиме токопотребление гальванически изолированных модулей регистрации пренебрежимо мало: ~50 мкА. Во время рабочего цикла, длительность которого составляет доли секунды, оно не превышает 250 миллиампер. Как следствие, при интенсивной эксплуатации приборов (до сотни рабочих импульсов в день) регламентные процедуры подзарядки аккумуляторов импульсного источника питания выполняются с временной дискретностью в 3 - 4-е недели.

Пакет средств программной поддержки содержит функционально полный набор процедур взаимодействия с интерфейсными модулями, визуализации и сохранения результатов измерений.

### Литература

- [1]. Зубарев П.В., Квашнин А.Н., Хильченко А.Д., Хильченко В.А. // Приборы и Техника Эксперимента, 2001, N4, с.75-82. eLIBRARY ID: 14960202
- [2]. Soldatkina E.I., Maximov V.V., Prikhodko V.V., Savkin V.Y., Skovorodin D.I., Yakovlev D.V., Bagryansky P.A. // Nuclear Fusion, V60, N8, 2020, 086009. DOI: 10.1088/1741-4326/ab95d2
- [3]. Soldatkina E.I., Khilchenko A.D., Khilchenko V.A., Moiseev D.V., Prikhodko V.V., Savkin V.Y., Zubarev P.V., Bagryansky P.A. // JINST, V5, N1, 2020, P01018. DOI: 10.1088/1748-0221/15/01/P01018

# АВТОНОМНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА МОДУЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК

Зубарев П.В.<sup>1</sup>, Квашнин А.Н.<sup>1</sup>, Кравец Е.А.<sup>1</sup>, Герасимов Д.А.<sup>1</sup>,  
Герасёв А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, Россия, [P.V.Zubarev@inp.nsk.ru](mailto:P.V.Zubarev@inp.nsk.ru)*

Современные модули управления и сбора данных строятся на базе микроконтроллеров (МК), микропроцессоров и/или программируемой пользователем вентильной матрицы (ППВМ). Помимо всех основных функций эти микросхемы необходимы для организации интерфейсов связи. Современные интерфейсы связи, такие как оптический Ethernet требуют значительных ресурсов для реализации необходимых скоростей и протоколов обмена. Несмотря на то, что современные микроконтроллеры уже стали 32 разрядными и имеют аппаратную поддержку Ethernet, и используют различные ОС реального времени, они значительно уступают по скорости передачи данных модулям, построенным на базе микропроцессоров, работающих под управлением ОС Linux. Программируемые матрицы, несмотря на имеющиеся у них возможности реализации микропроцессорной архитектуры (NIOS) с последующей реализацией ОС и протоколов обмена, тоже значительно уступают микропроцессорным модулям. Также стоит отметить, что реализация TCP/IP стеков в микроконтроллерах ещё не достигла необходимой надежности по сравнению с полноценной ОС.

С программной точки зрения для компиляции микроконтроллеров требуется установка специализированных IDE, для компиляции программ для ППВМ требуется специализированные среды разработки, это приводит к тому, что при необходимости внесения изменений в программу модуля, поставленного на установку, необходимо его перепрограммировать. При этом нет гарантии, что обновление

прошивки не приведет к сбоям или даже даст желаемый результат. Помимо этого, большинство используемого для компиляции софта является платным и часто обновляется. Получается, что рано или поздно программист сталкивается с проблемой сборки своих старых исходников в новой IDE. Другие программисты, просто переустановив ОС понимают, что лишились возможности собрать старую микропрограмму для разработанного модуля. Разработчики МК вообще могут уйти с рынка. В таком случае найти и установить старые IDE становится значительно сложнее.

С процессорными модулями дело обстоит иначе. Они работают под управлением ОС Linux, что позволяет разрабатывать, отлаживать и выполнять все программы непосредственно в модуле. При чём при смене процессорного модуля не трудно адаптировать весь написанный софт под новый модуль.

Одним из самых перспективных процессорных модулей для нас стал модуль, базирующийся на ППВМ Intel Cyclone V. Он сочетает в себе двухъядерное процессорное ядро на базе Cortex A9 с частотой 925 МГц и ППВМ. Основная наша идея заключается в том, чтобы программист, не имея ничего под рукой, смог подключиться к модулю по ssh протоколу и имел бы возможность изменять его функциональность. Т.е. смог бы выполнять сборку: модуля ядра, библиотеки функций, Erics модуля, а также редактировать любые скрипты, управляющие плазменной установкой (в нашем случае это скрипты, написанные на языке python).

Последней стадией автономности планируется реализация web интерфейса, позволяющая отказаться от использования таких средств разработки программ верхнего уровня как LabVIEW и Control System Studio (CSS). Для управления Process Variables (PVs) будет использован Web server, работающий непосредственно на модуле под управлением ОС Linux. Таким образом модуль будет обеспечивать поддержку http или https протокола, что позволит продемонстрировать функциональность, проверить работоспособность самого модуля, а также

реализовать интерфейс для системы управления и сбора данных установки. Помимо этого, планируется управлять другими подобными модулями, объединенными в общую сеть. При таком подходе система управления и сбора данных может быть доступна из любой точки мира и не зависит от установленной на ПК операционной системы.

В настоящий момент верхний уровень системы управления установкой Коаксиальный Осесимметричный Тороид (КОТ) [1] построен с использованием среды разработки LabVIEW и бесплатной библиотеки CALab (обеспечивающей сопряжение с Epics). Уже протестирована возможность работы с PV через Web интерфейс.

### **Литература**

- [1]. Багрянский П.А., Зубарев П.В., Иваненко С.В., Киселёв А.И., Квашнин А.Н., Лизунов А.А., Моисеев Д.В., Мурахтин С.В., Пурыга Е.А., «Архитектура и программные средства системы управления экспериментальной установки КОТ», XIX всероссийская конференция "Диагностика высокотемпературной плазмы", тезисы доклада на конференции, Стр.: 284-286, Год издания: 2021, Издательство "Тривант".

# РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА АППАРАТНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Нестеренко В.М., Нагорный Н.В., Миронова Е.Ю., Арбузова Т.В., Гужев Д.И., Миронов А.Ю., Николаев А.И., Портоне С.С.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия, [V.Nesterenko@iterrf.ru](mailto:V.Nesterenko@iterrf.ru)*

Диагностическая система Активная Спектроскопия (АС), разрабатываемая с целью измерения ряда важных физических величин на установке ИТЭР, находится на финальной стадии проектирования. Для успешной защиты финального технического проекта системы требуется полная детализация всех технических аспектов систем управления, сбора данных (ССДУ) [1] и вспомогательных систем, разрабатываемых для обеспечения требуемого уровня функционирования диагностики.

К проекту финальной стадии диагностической системы предъявляется ряд требований, направленных на получение полной детализации всех технических аспектов измерительной системы и проектируемых вспомогательных систем. В число проектируемых вспомогательных систем входят: управление нагревательным рукавом световода в агрессивной среде межсекционной зоны установки (Interspace), управление затворами первых зеркал для обеспечения их защиты от воздействия плазмы, позиционирование торца световода с оптической системой для получения необходимого для проведения измерений пространственного разрешения, очистка первых зеркал от примесных продуктов горения плазмы, калибровка оптической системы и спектрального оборудования. Наличие большого количества вспомогательных систем оказывает прямое влияние на сложность проекта системы сбора данных и управления и ее аппаратную архитектуру.

Структура технического проекта разрабатываемой системы управления и сбора данных диагностики АС отражается в специализированном ПО «Enterprise Architect» (EA), что впоследствии позволяет сформировать основополагающий пакет документов, содержащий в себе детальное описание дизайн-проекта системы и требований, предъявляемые к диагностике со стороны ИТЭР.

В настоящей работе отражены результаты разработки комплекса аппаратных решений для системы сбора данных и управления с требуемым уровнем детализации, а также структура технического проекта в специализированном ПО EA с учетом требований, предъявляемых к разработке диагностики АС со стороны ИТЭР.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 18.01.2023 № Н.4а.241.19.23.1014 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечения выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

### **Литература**

- [1]. Simrock S. Control system for ITER diagnostics, heating and current drive. // Fusion Engineering and Design. 2016. 112. P. 724-730.

# **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР В ТЕХНИЧЕСКОМ ПРОЕКТЕ СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ»**

Арбузова Т.В., Нестеренко В.М., Нагорный Н.В., Миронова Е.Ю.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия,  
[t.arbuzova@iterrf.ru](mailto:t.arbuzova@iterrf.ru)*

В качестве вклада Российской Федерации в создание термоядерного реактора ИТЭР «Проектный центр ИТЭР» ведет разработку диагностической системы «Активная спектроскопия» (АС). Указанная система осуществляет регистрацию светового излучения с 26 пространственных каналов внешней половины плазменного шнура в трех разных спектральных диапазонах:  $468\pm 5$  нм,  $529\pm 5$  нм и  $656\pm 6$  нм. В её состав входят 27 камер, регистрирующих излучение и 9 спектрометров. В дальнейшем полученные данные подвергаются обработке, результатом которой являются основные параметры плазмы: концентрации примесей, тороидальная и полоидальная скорости и температуры горячей плазмы и т. д.

Успешная защита финального технического проекта АС подразумевает полную детализацию системы сбора и обработки данных. В рамках её проектирования была поставлена задача создания корректного, с точки зрения физики процессов, протекающих в плазме, отображения измерительных процедур, а также возможности их параллельного исполнения для вычисления отдельных параметров плазмы.

В докладе представлена часть обновлённого проекта в специализированной среде разработки Enterprise Architect, в которой демонстрируются предлагаемые решения для отображения процедур сбора и обработки данных, с учетом



последних требований к диагностической системе. В ней предусмотрена возможность вычисления параметров плазмы методом вычитания спектров. Кроме того, разработанные структуры учитывают ряд особенностей обработки и сбора данных, зависящих от спектрального диапазона и пространственного канала.

Измерительные процедуры для системы обработки были разработаны на основе моделирования измерений АС для установки ИТЭР, описанных в работе [1]. Предложенный подход позволит оценить влияние различных физических эффектов (таких как, например, эффект гало) на точность измерений АС.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 18.01.2023 № Н.4а.241.19.23.1014 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечения выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

### **Литература**

- [1]. M. von Hellermann [et al.], Simulation of Spectra Code (SOS) for ITER Active Beam Spectroscopy, Atoms. — 2019. — Vol. 7, no. 1.

**ЭРОЗИЯ ОБРАЩЕННЫХ К ПЛАЗМЕ  
МАТЕРИАЛОВ ТЯР ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ  
ИНТЕНСИВНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ,  
ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ПЕРЕХОДНЫХ  
ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Климов Н.С., Подковыров В.Л., Карташева А.А., Барсук В.А.,  
Муравьева Е. А., Ярошевская А. Д., Данилина Н. А.,  
Житлухин А.М.

ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Москва, Троицк, Россия, [klimov@triniti.ru](mailto:klimov@triniti.ru)

В качестве наиболее перспективных материалов первой стенки и дивертора термоядерного реактора (ТЯР) на базе токамака в настоящее время рассматриваются материалы на основе W, Be, УВК (углеродно-волоконистых композитов), низкоактивируемых ферритно-мартенситных сталей. В целях повышения эксплуатационных характеристик данных материалов предлагается наносить на их поверхность тонкие возобновляемые слои на основе Li, В<sub>4</sub>С, Ве, Li-Pb. Скорости эрозии материалов и время жизни возобновляемых защитных слоев существенным образом зависят от мощности плазменно-теплового воздействия. Наибольшую опасность с точки зрения ресурса обращенных к плазме элементов представляют переходные плазменные процессы (ЭЛМ-события, срывы, и др.), характеризующиеся повышенными значениями плотности мощности (0,1 – 10 ГВт/м<sup>2</sup>), но короткой длительностью (0,1 – 10 мс). Актуальной является задача исследования эрозии материалов при плазменно-тепловых нагрузках, соответствующих по длительности и

мощности переходным плазменным процессам. Подобные исследования проводятся с использованием квазистационарных плазменных ускорителей с собственным магнитным полем (КСПУ) [1]. В настоящей работе представлено обобщение полученных ранее экспериментальных данных по эрозии материалов и представлены новые данные по экспериментальному исследованию вольфрама, покрытого тонкими защитными слоями.

Показано, что основным фактором, ограничивающим диапазон приемлемых для металлов (W, Be) плазменно-тепловых нагрузок, является формирование на поверхности расплавленного слоя. В ряде случаев толщина расплава может достигать десятков микрон и приводит не только к течению расплава, но и к выбросу капель с его поверхности, который становится основным механизмом потерь массы защитного слоя. При малых (единицы и доли мкм) толщинах расплава и нагрузках ниже порога плавления основным механизмом разрушения становится формирование трещин, обусловленное импульсным характером теплового воздействия [2].

Представлены результаты сравнительных экспериментов по облучению плазмой вольфрама без защитного слоя и вольфрама, покрытого защитным слоем (микронного диапазона) другого металла (висмут, олово). Наличие тонкого слоя защитного материала на поверхности вольфрама позволяет снизить максимальную температуры его поверхности за счет более низкой температуры кипения слоя. Исследован случай, когда температура кипения материала слоя оказывается ниже температуры плавления вольфрама. Показано, что диапазоны допустимых плазменно-тепловых нагрузок для вольфрама могут быть существенно расширены, поскольку плавление вольфрама и формирование на его поверхности расплавленного слоя удастся исключить, а толщина расплава ограничена исходной толщиной защитного слоя. Для достаточно тонких слоев (микронного диапазона) не наблюдается капельной эрозии, вследствие роста капиллярных сил. В этом случае основным механизмом потерь массы слоя становится его испарение. Перспективность данного

подхода сильно зависит от времени жизни тонких защитных слоев на поверхности и возможности их возобновления. Время жизни защитного слоя определяется скоростью испарения слоя, а она, в свою очередь, — эффективностью паровой экранировки. Ожидается, что в этом случае существенная часть энергии затрачивается не на испарение, а на нагрев уже испаренного вещества перед поверхностью материала и его излучение. Режимы с сильной паровой экранировкой продемонстрированы в экспериментах в данной работе. Показано, что, в этих режимах скорость испарения значительно снижается, а время жизни слоя увеличивается. Представлены результаты измерения коэффициента экранировки в зависимости от тепловой нагрузки в экспериментах с различной длительностью импульса.

Время жизни слоя легкоиспаряемого материала ( $V_i$ ) на  $W$  в исследованном диапазоне тепловой нагрузки ( $Q = 0,2 \div 2,5$  МДж/м<sup>2</sup>,  $t = 0,5 - 1,0$  мс) оказалось более чем в 10 выше ожидаемых (расчетных) значений. Это различие объясняется наличием сильного эффекта экранировки: существенная доля энергии затрачивается на нагрев пара, его ионизацию и излучение, и в результате скорость испарения оказывается низкой. Рост интенсивности излучения подтверждается спектральными и интегральными измерениями параметров излучения примененной плазмы.

Практический интерес представляет продемонстрированное в эксперименте снижение интенсивности формирования трещин на  $W$  при наличии защитного слоя легкоиспаряемого материала в следствии более низкой максимальной температуры на поверхности вольфрама во время облучения.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности подхода, основанного на использовании традиционных обращенных к плазме материалов  $W$ ,  $Be$ ,  $UVC$  в комбинации с тонкими защитными покрытиями, и указывают на необходимость дальнейших исследований эрозии таких комбинаций в сочетании с исследованием эффекта паровой экранировки поверхности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00153.

## Литература

- [1]. Kovalenko D.V., Klimov N.S., Podkovyrov V.L. et al. Behavior of divertor and first wall armour materials at plasma heat fluxes relevant to ITER ELMs and disruptions / Nuclear Materials and Energy, Volume 12, 2017, P. 156-163
- [2]. Климов Н.С., Барсук В.А., Ярошевская А.Д. и др. Экспериментальное исследование формирования трещин на поверхности чистого вольфрама и вольфрама, покрытого тонким защитным слоем легкоплавкого металла, при плазменных тепловых нагрузках, характерных для переходных плазменных процессов в ИТЭР / Взаимодействие плазмы с поверхностью. сборник научных трудов XIX конференции. 2016. С. 96.

# ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЛЬФРАМА В ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКЕ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРА ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Будаев В.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> НИУ «МЭИ», Москва, Россия

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия,  
[budaev@mail.ru](mailto:budaev@mail.ru)

В термоядерном реакторе-токамаке взаимодействие горячей плазмы с обращенными к плазме внутрикамерными компонентами будет приводить к высоким плазменно-тепловым нагрузкам на материальную поверхность. В стационарной стадии разряда и при переходных процессах (ЭЛМах, срывах, неустойчивостях, включая вертикальное смещение, турбулентных и дуговых процессах) такая нагрузка будет неравномерно распределена по поверхности в диверторной зоне и пристеночной зоне (СОЛ). Такие эффекты наблюдаются в экспериментах на современных токамаках [1-3]. В термоядерных установках при очень высокой плазменно-тепловой нагрузке на материалы наблюдаются множественные эффекты изменения поверхности [1], включая физическую и химическую эрозию и переосаждение эродированных материалов на поверхность, образование трещин различных размеров (Рисунок 1), плавление и движение расплава по поверхности, неоднородное отверждение расплава и рекристаллизацию, дуговые эффекты (Рисунок 2) [2]. Такие изменения поверхности под действием горячей плазмы вызывают охрупчивание и значительное изменение структуры поверхности материала на глубину от десятков до тысяч микрометров, приводя к деградации материала.

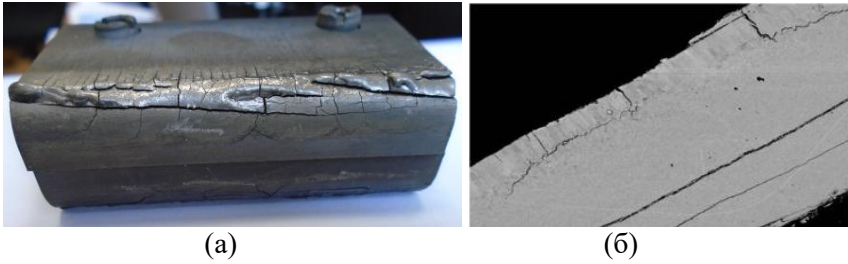


Рисунок 1 — (а) Плавление растрескивание и эрозия вольфрамовой пластины на внутреннем обводе полоидальной диафрагмы в токамаке Т-10. (б) Растрескивание и рекристаллизация вольфрама при плазменных испытаниях в КСПУ

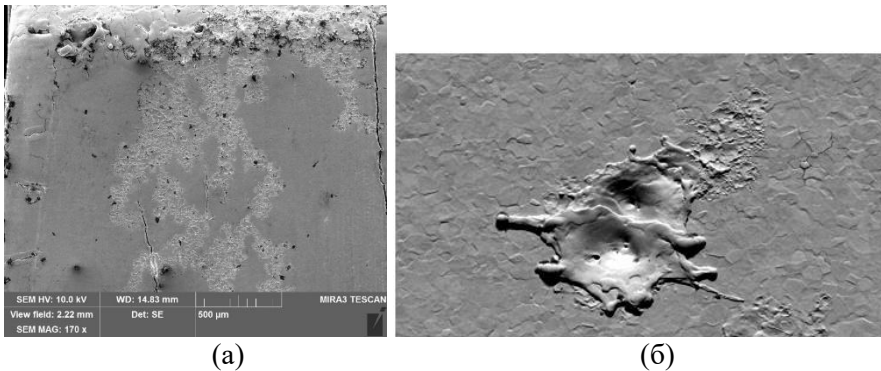
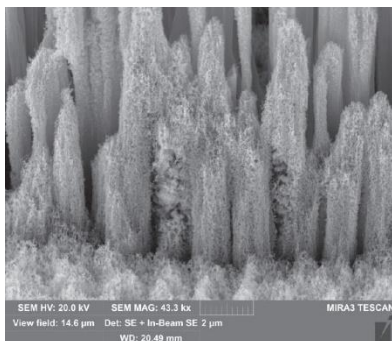
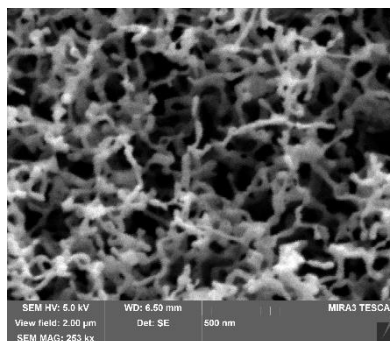


Рисунок 2 — Дуговые процессы на поверхности полоидальной вольфрамовой диафрагмы в токамаке Т-10: (а) кратеры и треки дуг, (б) кратеры размером  $\sim 100$  мкм

Коллективные эффекты в таком сложном процессе приводят к стохастической кластеризации слоёв на поверхности на масштабах от десятков нанометров до сотен микрометров, образуя шероховатость поверхности с чрезвычайно высокой удельной площадью [3] (Рисунок 3). Такие наноструктурные слои изменяют условия термоэлектронной эмиссии и при разрушении становятся источником наноразмерной пыли, проникающей глубоко в плазменный разряд, приводя к ее охлаждению.



(а)



(б)

Рисунок 3 — Рост наноструктурных слоев типа «пух» на вольфраме при многочасовых испытаниях в плазменной установке ПЛМ-М

Отмеченные выше эффекты экспериментально зарегистрированы на различных материалах - вольфраме, графите и углеродных композитах, бериллии, молибдене, нержавеющей стали при их эксплуатации в токамаках, импульсных и стационарных плазменных установках. Изменение обращенной к плазме поверхности критически влияет на взаимодействие плазмы с поверхностью, приводя к изменению условий протекания токов из плазмы на поверхность, вызывая нестабильности плазмы, нарушение баланса потоков частиц в периферийной плазме, нарушение условий неамбиполярной диффузии. В конечном итоге это влияет не только на пристеночную плазму, но и через изменение граничных условий на режимы удержания центральной плазмы токамака. Следует учитывать нелинейный характер процессов, их многомасштабность, что не позволяет описать такие эффекты в численных расчетах (включая все современные компьютерные коды). Требуется масштабные экспериментальные исследования этих процессов.

Для обоснования применения вольфрама в облицовке дивертора и первой стенки токамака-реактора необходимо проводить плазменные испытания вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки внутрикамерных компонентов стационарными и импульсными плазменными, пучковыми,



тепловыми нагрузками в токамаках и плазменных установках симуляторах дивертора. Следует провести сравнительный анализ результатов плазменных испытаний вольфрама с другими материалами - бериллием, графитом, для оценки применения в токамаке реакторного размера, включая ИТЭР, ТРТ, ТИН.

Работа выполнена при поддержке Госзадания FSWF-2023-0016.

### **Литература**

- [1]. Будаев В.П., ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2015, 38, 5.
- [2]. Будаев В.П. и др. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез 2019, 42, 1, 51.
- [3]. Budaev V.P. et al. Fusion Science and Technology, 2023 79, 4.

# ОТДЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЫ И ВЫБОР МАТЕРИАЛА «ПЕРВОЙ СТЕНКИ»

Химченко Л.Н.

*Частное учреждение ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР»,  
Москва, Россия, [l.khimchenko@iterrf.ru](mailto:l.khimchenko@iterrf.ru)*

В докладе представлены физические явления в плазме ИТЭР, которые могут влиять на выбор материала Первой стенки и сценарий разряда:

- Тепловой срыв (TQ) и срыв тока (CQ). Мощность и длительность таковы, что приводят к плавлению как бериллия, так и вольфрама. Показан механизм смягчения срыва в результате инъекции «цветной» пеллеты.

- Дугообразование. Описан механизм возникновения дуг и эктонный механизм инъекции материала в плазму. Это может существенно увеличить поступление примесей в разряд. Что, например, нежелательно на стадии подъёма тока.

- Поглощение трития. Распылённый материал стенки перепыляется пористое покрытие, способное поглощать газообразное топливо и примеси.

- Различные покрытия, например боронизация или литиизация. При оседании таких материалов на стенку образуется пористое наноструктурированное покрытие. Приводятся эксперименты с литиизацией на токамаке Т-10.

В докладе приводятся также предложения для TRT.

Работа выполнена по государственному контракту с ГК «Росатом» от 18.01.2023 № Н.4а.241.19.23.1014

# ОБЗОР РАБОТ В ИЯФ СО РАН ПО ТЕМАТИКЕ ПЛАЗМА-ПОВЕРХНОСТЬ

Шошин А.А.<sup>1,2,3</sup>, Касатов А.А.<sup>1,2</sup>, Балаш И.И.<sup>1</sup>,  
Бурдаков А.В.<sup>1,3</sup>, Вячеславов Л.Н.<sup>1</sup>, Казанцев С.Р.<sup>1</sup>,  
Кандауров И.В.<sup>1</sup>, Кузьмин Е.И.<sup>1</sup>, Попов В.А.<sup>1</sup>, Рыжков Г.А.<sup>1</sup>,  
Черепанов Д.Е.<sup>1,2</sup>, Полосаткин С.В.<sup>1,2,3</sup>, Иванов И.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия,*

[shoshin@inp.nsk.su](mailto:shoshin@inp.nsk.su)

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

<sup>3</sup> *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

В ИЯФ СО РАН имени Г.И. Будкера с 90-х годов проводятся исследования по исследованию стойкости материалов первой стенки термоядерного реактора к мощным импульсным тепловым нагрузкам.

Изначально интенсивные исследования взаимодействия плазмы с поверхностью проводились на установке ГОЛ-3, на которой плотность энергии на мишени в плазменном потоке с энергетичными электронами могла достигать рекордных 30 МДж/м<sup>2</sup>. Исследовалась модификация поверхности вольфрама и углеродных материалов при различных нагрузках, характерных для ЭЛМов и срывов ИТЭР, а также параметры формирующейся поверхностной плазмы, такие как скорость расширения, плотность, температура, скорость химической эрозии [1].

В дальнейшем исследования проводились на установке ВЕТА с помощью мощных электронного пучка и лазеров. Исследования проводились с различными марками вольфрама [2], затем добавились эксперименты с керамическими материалами.

На станции Плазма источника синхротронного излучения ВЭПП-4 проводились исследования поведения материалов под импульсными тепловыми нагрузками, в настоящее время идет

создание аналогичной станции на строящемся в Новосибирске источнике синхротронного излучения СКИФ. В экспериментах измерялись напряжения в вольфраме во время и после облучения [3].

### **Литература**

- [1]. A. Shoshin, et al., Study of Plasma-Surface Interaction at the GOL-3 Facility, Fusion Engineering and Design, 114 (2017) p. 157.
- [2]. L. Vyacheslavov, et al., In situ study of the processes of damage to the tungsten surface under transient heat loads possible in ITER, Journal of Nuclear Materials, 544 (2021) 152669.
- [3]. A. S. Arakcheev, et al., Dynamic observation of X-ray Laue diffraction on single-crystal tungsten during pulsed heat load, Journal of Synchrotron Radiation 26 (2019) c. 1644.

# КАРБИД БОРА КАК ЗАЩИТНЫЙ МАТЕРИАЛ КОНТАКТИРУЮЩИХ С ПЛАЗМОЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ

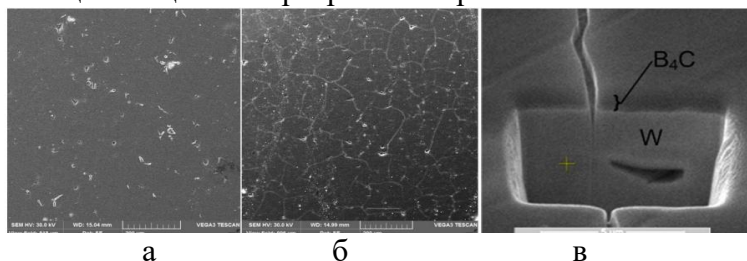
Беграмбеков Л.Б., Бужинский О.В., Айрапетов А.А., Грунин А.В.,  
Садовский Я.А., Довганюк С.С. Захаров А.М.

НИЯУ МИФИ, Москва, РФ, [lbbegrambekov@mephi.ru](mailto:lbbegrambekov@mephi.ru)

## 1. Адгезия покрытия $B_4C$ к вольфраму и воздействие температуры [1]

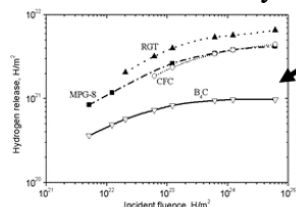
Тестирование прогревами в диапазоне 450-1200 К покрытия толщиной 5 мкм (рис. 1а), нанесённого при 550 К потоком атомов бора и углерода, распылённых ионами аргона с поверхности бор-графитовой пудры. После 150 термоциклов появились трещины шириной 0,1 мкм (рис. 1б) в результате растрескивания поверхности вольфрама (рис. 1в).

После еще 200 циклов прогрева поверхность не изменилась.

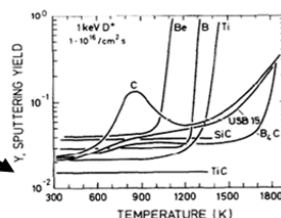


SEM изображения. а) покрытия до термоциклирования; б) после (150 – 350) термоциклов; в) FIB поперечное сечение трещины.

## 2. Распыление и удержание газа

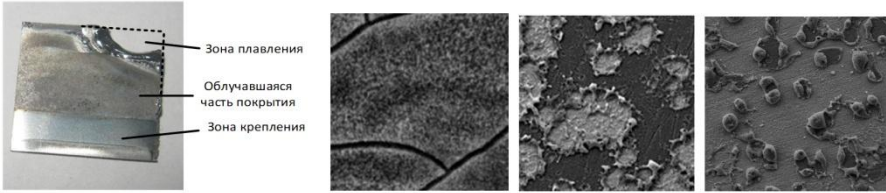


Удержание водорода [2]  
разными материалами  
( $H^+$ ,  $E = 100\text{eV}$ ,  $j = 5,6 \times 10^{19}\text{m}^{-2}$ )  
Распыление разных  
материалов  $D^+$ , 1 KeV [3].



### 3. Температуростойкость

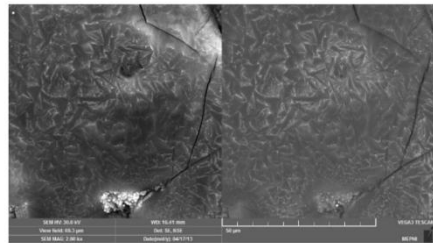
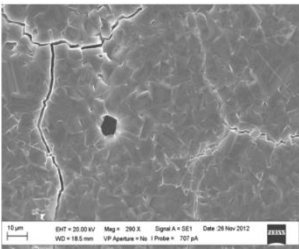
#### 3.1. В<sub>4</sub>С на вольфраме под интенсивным плазменным облучением в Т10-М [4]



1. Образец после воздействия плазмы  
 2. (В:С ≈ 3.8:1) 10 МВт/м<sup>2</sup>, ≤ 2000 К.  
 3. (В:С ≈ 3.1:1). 40 МВт/м<sup>2</sup>, 2000 -2500 К.  
 4. (В:С ≈ 1.2:1). 70 МВт/м<sup>2</sup>, 2500-3600 К.

1. Часть образца расплавилась и удалилась плазменным воздействием.
2. ≤ 2000 К. На образце только микроскопические трещины.
3. 2000-2500 К. Верхний слой покрытия частично расплавился
4. 2500-3600 К. Из-за напряжений, возникших при частичном испарения бора. верхний слой растрескался и свернулся. Сплошной нижний слой защищает вольфрам от плазмы.

#### 3.2. В<sub>4</sub>С на графите МПГ-6 под действием импульсов плазмы КСПУ-Т [5].



3 импульса ( $W=1\text{ГВт/м}^2$ ,  $\tau=5\text{мс}$ ).  
 Плотный слой покрытия на графите

50 импульсов ( $W=1\text{ГВт/м}^2$ ,  $\tau=5\text{мс}$ ).  
 Сплошной слой после 50-ти импульсов

#### 4. Напыление покрытия карбида бора в гелиевой плазме PISCES-B [6]

Параметры плазмы:

$T_e \approx 40 \text{ эВ}$ ,  $n_e \approx 2 \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$ , поток ионов  $\sim 3 \times 10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Исходное вещество:

Карборан ( $\text{C}_2 \text{B}_{10} \text{H}_{12}$ ) – кристаллы,  $T_{\text{плавл.}} \sim 370 \text{ К}$ .

Введение в плазму:

Сублимация из дозатора ( $T = 300\text{-}450 \text{ К}$ ).

Потенциал поверхности: Плавающий потенциал  $E \sim 160V$ ,  
Скорость роста покрытия: От 2 до 30 мин.  
Толщина покрытия: До 40 мкм

#### 5. Газификация и удаление перенапылённых боркарбидных слоёв и пыли

Скорость газификации  $230 \pm 40$  нм/час при облучении перенапылённых бор-карбидных слоёв ионами (200 эВ) этанол-кислородной плазмы тлеющего разряда [7].

### Литература

- [1]. Ayrapetov A.A., et.al. Journal of Physics: Conference Series.2016. T.700. № 1. С. 012041.
- [2]. J.Roth, et al. J.Nucl.Mater 176&177 (1990) 132
- [3]. L. Begrambekov, et.al. Physica scripta, N108 (2004), p.72-75
- [4]. L B Begrambekov, et.al. Journal of Physics: Conf. Series 1281 (2019) 012002
- [5]. О.И. Бужинский, В.А. Барсук, Л.Б. Беграмбеков, Н.С. Климов, В.Г. Отрощенко, А.Б. Путрик. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 2.
- [6]. O.I.Buzhinskij, V.G.Otroschenko, D.G.Whyte et al. J.Nucl.Mat. 313-316(2003)214.
- [7]. A. Airapetov, V. Terentiev, A. Voituk, A. Zakharov, Physics Procedia, V 71 2015 P58-62, Doi: 10.1016/j.phpro.2015.08.312.

# ВЫБОР МАТЕРИАЛА ОБЛИЦОВКИ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ПОКРЫТИЯ

Гаспарян Ю.М.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, [YMGasparyan@mephi.ru](mailto:YMGasparyan@mephi.ru)*

Несмотря активную фазу проектирования или строительства ряда крупных термоядерных установок, вопрос выбора материала обращенных к плазме элементов (ОПЭ) остается открытым. Совсем недавно критическому анализу подвергся даже выбор материалов ОПЭ в ИТЭР.

Выбор материала и конструкции ОПЭ должен обеспечивать устойчивость к мощным плазменным потокам, большой ресурс с учетом распыления и нейтронного воздействия, приемлемое загрязнение плазмы и накопление трития в установке. Выделяют две основные области с отличающимися условиями плазменного воздействия. Максимальные потоки тепла и частиц приходятся на ОПЭ в диверторной области, при этом, средняя энергия частиц, падающих на поверхность, может быть небольшой. Средняя энергия частиц, приходящих на «первую стенку» больше, но потоки частиц и тепла меньше.

Значительный прогресс в параметрах удержания плазмы в токамаках был достигнут при использовании углеродных материалов. Запуск новых установок и сейчас наиболее часто происходит с углеродными ОПЭ. Углерод имеет низкий атомный номер, отсутствует плавление поверхности, возможно удержание водорода в поверхностном слое на начальной стадии разряда. Однако, при работе с тритием использование углеродных материалов считается недопустимым, по крайней мере, до тех пор, пока не будет продемонстрирована приемлемая скорость распыления и интегрального накопления изотопов водорода.

Существенное снижение накопления изотопов водорода при переходе от углеродной к ИТЭР-подобной стенке (бериллий и вольфрам) продемонстрировано на токамаке JET



(Великобритания) [1]. В диверторной области ОПЭ были покрыты вольфрамом, который имеет максимальную температуру плавления и хорошую теплопроводность. Низкая энергия бомбардирующей поверхности частиц и удаленность от центральной плазмы позволяет иметь приемлемый уровень загрязнения, несмотря на высокий атомный номер. Поверхность «первой стенки» обычно защищается ОПЭ из материалов с низким атомным номером (В, Ве, Li, С), что обеспечивает наилучшие параметры удержания плазмы. В ИТЭР и JET выбран бериллий, обеспечивающий также снижение концентрации кислорода и других примесей в плазме без нанесения дополнительных покрытий, которые требуются при использовании тугоплавких материалов (вольфрама или молибдена) ОПЭ. При этом, нужно отметить, что выбор нескольких материалов ОПЭ может иметь негативные последствия при длительном времени эксплуатации установки в результате взаимного перепыления материалов и формирования смешанных слоев с пониженными эксплуатационными характеристиками.

Перспективным решением для реализации реакторов является использование возобновляемых покрытий, т.к. ресурс всех существующих материалов в требуемых условиях весьма ограничен. В условиях ряда токамаков (Т-11М, Т-10, FTU, EAST и др.) проводились испытания ОПЭ на основе жидкого лития с использованием капиллярно-пористых систем или на основе пластины с текущим слоем лития. Эксперименты показали положительное влияние на плазму таких систем и высокую устойчивость к мощным плазменным нагрузкам. Другим способом возобновления покрытий является инжекция в пристеночную плазму в ходе рабочих разрядов мелких частиц, содержащих бор или литий [3]. Такая система апробируется в настоящее время на многих токамаках (EAST, K-STAR, ASDEX-Upgrade и др.) и потенциально позволяет осаждать защитный слой в зону максимального потока плазмы. В ходе рабочих разрядов возможен также напуск газообразной примеси,

содержащей элементы защитного покрытия, например, карборан для осаждения бор-углеродных покрытий [4].

Для реализации длительной квазистационарной работы реактора важной составляющей является также реализация системы сбора продуктов эрозии, накопление которых в установке может приводить к неустойчивому протеканию разряда [5].

### **Литература**

- [1]. S. Brezinsek et al., Fuel retention studies with the ITER-Like Wall in JET. *Nuclear Fusion*, 53 (2013) 083023.
- [2]. R.E. Nygren, F.L. Tabarés. Liquid surfaces for fusion plasma facing components – A critical review. Part I: Physics and PSI. *Nuclear Materials and Energy*, 9 (2016) 6.
- [3]. Y. Yu et al. Fuel recycling control in long pulse operation with full tungsten divertors in EAST tokamak. *Nuclear Materials and Energy* 34 (2023) 101333.
- [4]. Л.Б. Беграмбеков, О.И. Бужинский. Свойства карбида бора и его использование в качестве защитных покрытий на первой стенке токамака. *Сер. Термоядерный синтез*, 2006, вып. 4, с. 14.
- [5]. S.V. Mirnov. Tokamak evolution and view to future. *Nuclear Fusion*, 59 (2019) 015001.

# ПОДГОТОВКА К ИССЛЕДОВАНИЮ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Рыжков Г.А.<sup>1</sup>, Вячеславов Л.Н.<sup>1</sup>, Попов В.А.<sup>1,2</sup>, Черепанов Д.Е.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, Россия, [ryzhkov.george98@gmail.com](mailto:ryzhkov.george98@gmail.com)*

<sup>2</sup>*Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск,  
Россия*

Одной из ключевых проблем создания термоядерного реактора является проблема обращённой к плазме материальной стенки. Как известно, в реакторе с магнитным удержанием компоненты первой стенки рабочей камеры и плазмоприёмники в диверторе будут подвергаться различными видами воздействия из-за интенсивных потоков нейтронов и энергичных заряженных и нейтральных частиц. Энергичные частицы, поглощаясь в тонком слое материала стенки, вызывают его сильный нагрев и интенсивную эрозию. Наиболее сильное воздействие оказывают импульсные потоки частиц на стенку, образующиеся вследствие переходных процессов в плазме реактора. Термические удары (термоудары), возникающие в результате этих процессов, являются наиболее разрушительными для компонентов первой стенки.

Существуют различные подходы к выбору материала первой стенки. Перспективными считаются в качестве материала первой стенки использование материалов с малым средним  $Z$ , такие как высокотемпературные керамические композиты. Материалы с малым  $Z$  имеют преимущества в том, что в случае попадания их продуктов эрозии в виде примесей в плазму не должно происходить значительного роста потерь плазмы на излучение. Поэтому исследование таких материалов является актуальным.

В ИЯФ СО РАН проводятся эксперименты по моделированию влияния термоударов на материалы на специальном стенде с лазерным импульсом субмиллисекундной длительности, *in*

*situ* диагностики которого основаны на тех же разработках, что реализованы на установке БЕТА, в которой термоудары на материалы создаются электронным пучком [1]. Для отработки режимов лазерного нагрева, а также систем диагностики на стенде использовался керамический образец из карбида бора ( $B_4C$ ). Сами диагностики определяют динамики температуры и изменения рассеяния света от поверхности образца *in situ* непосредственно во время процесса нагрева и, таким образом, дают возможность подробно описать изменение состояния поверхности. Однако существует вопрос точности определения температуры методом пирометрии, так как доступно малое количество экспериментальных литературных данных по излучательной способности материала. Поэтому было предложено сравнить экспериментальную динамику температуры с теоретическим моделированием. Моделирование производилось на основе термодинамических параметров  $B_4C$ , взятых из литературы, и поглощенной образцом плотности мощности лазерного излучения. В экспериментах для определения температуры использовались инфракрасные InGaAs камера и InGaAs фотодиод. Полученные результаты сравниваются с теоретическим моделированием, и затем была оценена точность пирометрии. Также было обнаружено, что при высоких температурах, порядка 2000 К, теоретическое моделирование даёт завышенные результаты. Данное несоответствие температур может быть связано с обнаруженной по снимкам камеры эрозии поверхности  $B_4C$ , в результате которой происходит распыление материала и частичное плавление его поверхности. Также различие температур может быть объяснено изменением термодинамических свойств материала вследствие его эрозии. Описаны планы по развитию экспериментального исследования.

## Литература

- [1]. Vyacheslavov L. N. et al. In-situ study of the processes of damage to the tungsten surface under transient heat loads possible in ITER // J. Nucl. Mater. 2021. V. 544. P. 152669.

# ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ, ПОЛУЧАЕМЫЕ МЕТОДОМ ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Ульяницкий В.Ю., Батраев И.С., Рыбин Д.К., Дудина Д.В.,  
Штерцер А.А.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
Новосибирск, Россия, [ulianv@mail.ru](mailto:ulianv@mail.ru)

Детонационное напыление (ДН) относится к технологиям газотермического напыления (ГТН) и применяется для нанесения износостойких, электроизоляционных и др. покрытий с середины прошлого века. Подробное описание процесса газовой детонации и ее практических приложений приведено в [1]. В сравнении с другими технологиями ГТН (пламенное, газопламенное, холодное газодинамическое напыление и др.) ДН обеспечивает получение наиболее плотных и прочных покрытий из тугоплавких металлов, сплавов и керамик. Благодаря этому ДН применяется в авиационном моторостроении для упрочнения широкого спектра деталей металлокерамическими покрытиями на основе карбидов ( $WC$  и  $Cr_3C_2$ ) [2]. На рис. 1 изображена схема ДН, реализуемая в установке последнего поколения *CCDS2000*.

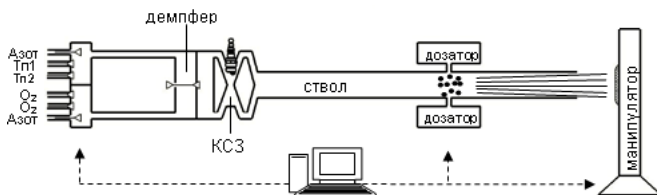


Рис. 1. Принципиальная схема детонационного комплекса *CCDS2000*: КСЗ – камера смешения-зажигания, демпферное устройство обеспечивает постоянное давление подачи газов в КСЗ, дозатор подает в ствол порцию порошка перед выстрелом

Нанесение покрытий из карбидов в чистом виде (без металлической связки), а также тугоплавких металлов, в частности вольфрама, которые могли бы быть использованы для защиты деталей термоядерного реактора, контактирующих с плазмой, связано с трудностями, обусловленными их высокой температурой плавления. Препятствие удается преодолеть при детонационном напылении с использованием в качестве топлива ацетилена, у которого температура продуктов детонации достигает 4500 К. Это позволило реализовать формирование покрытий из таких материалов [3, 4]. В продолжение этих исследований реализовано напыление покрытий карбида бора, результаты которых представляются в настоящей работе наряду с результатами для вольфрама, карбида вольфрама.

В таблице 1 приведены прочностные свойства и пористость указанных покрытий.

Таблица 1. Свойства покрытий из вольфрама, карбида вольфрама и карбида бора.

Напыляемый порошок	Подложка	Адгезия, МПа	Твердость, HV <sub>0,3</sub>	Пористость, %	Состав детонирующей смеси
W	Медь	100±5	850±57	1,0±0,10	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>
WC	Сталь	34,3±4,2	1352±92	0,41±0,05	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>
WC	Сталь	-	880±81	1,0±0,10	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> + 1,3O <sub>2</sub>
W <sub>4</sub> C	Сталь	12,4±0,6	1422±162	2,4±0,3	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> + 1,1O <sub>2</sub>

Одной из особенностей ДН является химическое взаимодействие напыляемого порошка с продуктами детонации. В зависимости от исходного состава взрывчатой смеси (соотношения топливо/окислитель) в процессе напыления возможны химические превращения напыляемого материала. Например, при напылении WC на эквимольной смеси C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>, как показывает рентгенофазовый анализ (РФА), покрытие, оставаясь керамическим, содержит различные фазы: WC, W<sub>2</sub>C и

$WC_{1-x}O_y$ , а при увеличении содержания кислорода в смеси на 30 % ( $C_2H_2 + 1,3O_2$ ), покрытие состоит преимущественно из металлического вольфрама, что сказывается на его твердости (см. Табл. 1). Из-за наличия в продуктах детонации атомарного кислорода происходит декарбидизация с формированием металлического вольфрамового покрытия. Другая картина при напылении порошков W и  $W_4C$ . РФА показывает, что в этом случае химических превращений не наблюдается и фазовый состав получаемых покрытий не отличается от состава напыляемого порошка.

### Литература

- [1]. Николаев Ю.А., Васильев А.А., Ульяницкий В.Ю. Газовая детонация и ее применение в технике и технологиях (обзор) // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 4. С. 22-54.
- [2]. Батраев И.С., Рыбин Д.К., Иванюк К.В., Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А. Износостойкие детонационные покрытия на основе карбида вольфрама для авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 08. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.
- [3]. Batraev I.S., Ulianitsky V.Y., Shtertser A.A., Dudina D.V., Ukhina A.V. Detonation Spraying of Binder-Free Tungsten Carbide: In-Situ Formation of Composite Coatings // Journal of Thermal Spray Technology. 2023. V. 32. P. 249–258. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01486-x>
- [4]. Rybin D.K., Batraev I.S., Dudina D.V., Ukhina A.V., Ulianitsky V.Yu. Deposition of tungsten coatings by detonation spraying // Surface & Coatings Technology. 2021. V. 409. 126943. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126943>

# ПРОГРАММА НИР ПО РАЗРАБОТКЕ ДИАГНОСТИК ПЕРВОЙ СТЕНКИ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Раздобарин А.Г.<sup>1,2</sup>, Медведев О.С.<sup>1,3</sup>, Дмитриев А.М.<sup>1</sup>,  
Елец Д.И.<sup>1,2,3</sup>, Снигирев Л.А.<sup>1,2</sup>, Минаев В.Б.<sup>1</sup>, Новохацкий А.Н.<sup>1</sup>,  
Мирошников И.В.<sup>1</sup>, Филиппов С.В.<sup>1</sup>, Гришаев М.В.<sup>3</sup>,  
Гаспарян Ю.М.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,

[aleksey.razdobarin@mail.ioffe.ru](mailto:aleksey.razdobarin@mail.ioffe.ru)

<sup>2</sup>СПбГУ, Физический факультет, Санкт-Петербург, Россия,

[spbu@spbu.ru](mailto:spbu@spbu.ru)

<sup>3</sup>НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия, [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru)

В докладе представлена программа и первые результаты научно-исследовательских работ по разработке комплекса диагностик первой стенки на токамаке Глобус-М2. Цель работ – апробация лазерных методов контроля состояния первой стенки и накопления изотопов водорода в условиях токамак- реактора. Полученные результаты планируется использовать в дальнейшем на проектируемых в настоящее время установках, в частности токамаке с реакторными технологиями ТРТ.

В основе диагностики состояния первой стенки лежат методы оптического неразрушающего контроля анализа поверхности: частотно/амплитудно-модулированный лазерный радар (LIDAR), двухволновая цифровая голографическая интерферометрия (ДЦГИ). Исследование содержания изотопов водорода ведется при помощи комбинированной методики LIA-QMS/LIBS (лазерно-индуцированная абляция с регистрацией методом квадрупольной масс-спектрометрии/лазерно-индуцированная эмиссионная спектроскопия)

В 2023 году начаты работы по реализации метода контроля состояния стенки совмещенной диагностикой ДЦГИ/LIDAR. Отработка методики измерения содержания водорода в первой стенке методами LIA-QMS/LIBS стартовала в



2021 году. На 2025-26 года запланированы работы по объединению диагностик в единый комплекс.

Апробации диагностик на токамаке предшествует отработка методов в лабораторных условиях с использованием образцов-коллекторов, экспонированных в объеме Глобус-М2. В 2021-23 годах внутри вакуумной камеры – в области дивертора и на первой стенке, были установлены молибденовые и вольфрамовые коллекторы. Часть из них располагалась заподлицо с поверхностью, часть была закреплена в диагностических портах. Кроме того, часть коллекторов закрывалась во время чистки первой стенки в тлеющем разряде, что позволит оценить влияние тлеющего разряда на накопление изотопов водорода в обращенных к плазме компонентах. После экспозиции коллекторов в ходе экспериментальных компаний 21-22 годов и анализа поверхности методами электронной микроскопии, образцы использовались для отработки методов диагностики накопления изотопов водорода.

В 2022 году были получены первые результаты применения диагностики LIA-QMS/LIBS на токамаке. В ходе реализации диагностики был апробирован ряд технических решений, таких как система сканирования поверхности, а также система регистрации, совмещающая оптическое детектирование при помощи спектрометра высокого разрешения и регистрацию методом масс-спектрометрии.

После предварительной калибровки сигналов 2, 3, 4 масс в спектре масс-спектрометра, была выполнена оценка содержания изотопов водорода в поверхностных слоях облицовки дивертора Глобус М2:  $\sim 5 \cdot 10^{16}$  H2/см<sup>2</sup> и  $2 \cdot 10^{16}$  D2/см<sup>2</sup>. Следует отметить, что данная оценка учитывала только изотопы водорода, запасенные в верхнем слое и не учитывала возможное наличие водородосодержащих соединений в газовой смеси. Возможность возникновения таких соединений при лазерной абляции требует дополнительных исследований.

Одновременно с записью масс-спектра во время лазерной экспозиции производилась запись эмиссионного спектра факела в спектральном диапазоне 655,8 - 656,8 нм. Соотношение

интенсивностей линий двух изотопов водорода – протия (H) и дейтерия (D) составило около 1:3. Данное значение близко к оценкам, полученным методами масс-спектрометрии ~ 1:2.5.

Данные, полученные методами LIA-QMS/LIBS свидетельствует о существенной глубине залегания изотопов водорода. Одновременное использование 2-х методов, в принципе, позволяет оценить распределение содержания изотопов водорода и состава осадений по глубине. Для этого, однако, необходимо иметь возможность независимого определения толщины удаленного лазером слоя. Для таких измерений предлагается использовать метод двухволновой цифровой голографии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 22-12-00360, <https://rscf.ru/project/22-12-00360/>

# ТЕКУЩИЙ ЖИДКИЙ ЛИТИЙ КАК МАТЕРИАЛ, ОБРАЩЕННЫЙ К ПЛАЗМЕ

Писарев А.А.<sup>1</sup>, Вертков А.В.<sup>2</sup>, Жарков М.Ю.<sup>2</sup>, Захаров Л.Е.<sup>3</sup>,  
Мазуль И.В.<sup>4</sup>, Пискарев П.Ю.<sup>4</sup>, Тарасюк Г.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, РФ, [aapisarev@mephi.ru](mailto:aapisarev@mephi.ru)*

<sup>2</sup>*Научно-исследовательский и конструкторский институт  
энерготехники имени Н. А. Доллежала., Москва, РФ,  
[avvertkov@redstaratom.ru](mailto:avvertkov@redstaratom.ru)*

<sup>3</sup>*LiWFusion, Princeton, United States, [zakharov@pppl.gov](mailto:zakharov@pppl.gov)*

<sup>4</sup>*Научно-исследовательский институт электрофизической  
аппаратуры им. Д.В Ефремова, Санкт-Петербург,  
[mazul@sintez.niiefa.spb.su](mailto:mazul@sintez.niiefa.spb.su)*

Актуальной задачей термоядерных исследований является необходимость поиска новых путей для повышения энергетической эффективности токамаков. Одной из проблем, препятствующей получению положительного выхода энергии в существующих токамаках, является высокий рециклинг топлива, когда практически все частицы топливного материала (дейтерий и тритий), поступая из плазмы на стенку в «горячем» виде, возвращаются обратно в плазму в «холодном» виде. Теоретические расчеты [1] показывают, что, снизив рециклинг со 100% хотя бы до 50%, можно получить пятикратное превышение мощности, выделяемой в реакции, над вкладываемой мощностью при умеренной мощности нагрева путем инъекции нейтралов на установках с размерами типа JET. Для уменьшения рециклинга необходимо создать условия эффективного поглощения частиц, поступающих на компоненты, обращенные к плазме. Организация такого сценария возможна при использовании текущего по поверхности слоя жидкого лития, который эффективно поглощает все примеси, поступающие на него, и создании жидкометаллической литиевой петли для циркуляции лития и его регенерации за пределами вакуумной камеры с целью удаления захваченных примесей.

Работа в этом направлении ведется в ряде лабораторий Европы, США Японии и Китая. Основным критическим элементом конструкции системы с текущим литием является пластина, по которой течет литий. Основные требования, которые предъявляются к ней, это хорошая и равномерная смачиваемость, хорошая и равномерная теплопроводность через нее, совместимость с литием. Демонстрация эффективности системы была сделана на китайском токамаке EAST, где были проведены три кампании с лимитером с текущим литием. Первоначальные варианты, тестированные в EAST, создавались на основе медной пластины, обладающей хорошей теплопроводностью, которая покрывалась тонким слоем нержавеющей стали, совместимой с литием. Однако, нагрев плазмой оказался неоднородным из-за проблем несплошного соединения стали и меди, возникали локальные перегревы. Кроме того, смачиваемость оказалась недостаточно хорошей, и пластина оставалась плохо покрытой литием. Последняя кампания была проведена с пластиной на основе молибденового сплава, в которой были фрезерованы желобки для течения лития под действием термоэлектрического гидродинамического эффекта. Пластина продемонстрировала более высокие эксплуатационные качества, но конструкция имела такое большое количество недостатков, что она вышла из строя уже при тепловой нагрузке  $2 \text{ МВт/м}^2$ . Несмотря на это, использование лимитера с текущим слоем жидкого лития привело к значительным улучшениям свойств плазмы. Значительно уменьшился  $Z_{\text{eff}}$ , были подавлены большие ЭЛМы, был облегчен переход между L и H модами, повышена запасенная энергия в плазме. Наблюдаемые улучшения можно отнести за счет уменьшения рециклинга примерно вдвое.

Работы по совершенствованию технологии пластин ведутся в ряде лабораторий, и использование лимитеров с текущим слоем жидкого лития. Например, на токамаках EU-DEMO, COMPAS-U, NSTX-U планируется использование движущейся пленки жидкого лития, при этом предполагается использование в том числе пористых систем для поддержки текущего слоя.

В нашей работе, рассматривается традиционная схема с тонким (0,2 мм) слоем нержавеющей стали на меди (10 мм), которая представляется весьма перспективной. Пластины были изготовлены диффузионной сваркой методом ГИП под большим давлением газа

при высокой температуре. Были проведены термоциклические испытания как неохлаждаемых, так и охлаждаемых водой пластин. Термоциклирование проводилось до температуры примерно  $500^{\circ}\text{C}$  с максимальной поглощенной плотностью мощности  $8 \text{ МВт}/\text{м}^2$ . После 1000 циклов даже при максимальной плотности мощности не было обнаружено пятен перегрева, а неоднородность температуры не превышала 6%. После окончания циклирования при  $8 \text{ МВт}/\text{м}^2$  последующий нагрев при  $11,9 \text{ МВт}/\text{м}^2$ , показал, что неоднородность нагрева не превышала 3%. Не было обнаружено никаких микро и макродефектов. Следует отметить, что испытания проводились без лития на поверхности. С литием все показатели были бы еще лучше.

Были проведены испытания на смачиваемость и течение лития по пластине. Пластины были предварительно смочены литием перед их установкой в камеру испытаний. Величина потока лития в процессе исследований варьировалась в интервале от  $0,2 - 1,7 \text{ г}/\text{с}$ . Угол наклона пластин к горизонту составлял  $60$  градусов. При скорости подачи лития  $0,2 \text{ г}/\text{с}$  поток лития разбивается на струи. С ростом скорости подачи стекающий поток занимает до  $80-85 \%$  поверхности пластины. Толщина пленки стекающего лития также возрастает с ростом подачи. Существенное влияние оказывает чистота поверхности лития, находящегося на пластине после процесса смачивания. Возникновение окисной пленки ведет к нарушению сплошности течения лития по поверхности и переходу к капельному стеканию. К сожалению, система подачи лития была несовершенной и не отвечала требованию равномерной подачи лития на пластину.

В настоящее время ведутся работы по совершенствованию конструкции макета лимитера с текущим слоем жидкого лития.

## Литература

- [1]. L.Zakharov, Nucl. Fusion 59 (2019) 096008
- [2]. J.S. Hu et al 2016 Nucl. Fusion 56 046011
- [3]. Hu J.S. et al. Nuclear Materials and Energy 18 (2019) 99–104
- [4]. C.L. Li, et al. Fusion Engineering and Design 158 (2020) 111747

# СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛИТИЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СТАЦИОНАРНОГО РАЗРЯДА В ТОКАМАКАХ С ДИВЕРТОРОМ

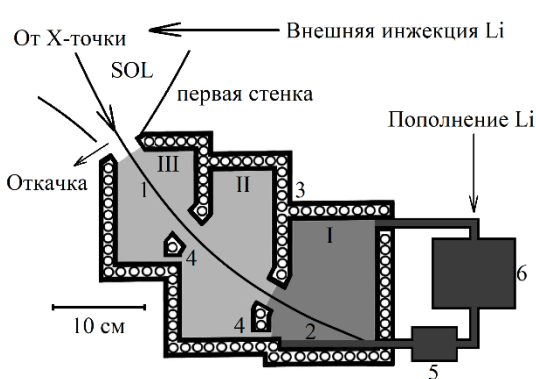
Сергеев В.Ю.<sup>1</sup>, Кутеев Б.В.<sup>2</sup>, Скоков В.Г.<sup>2</sup>, Тимохин В.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, РФ, [V.Sergeev@spbstu.ru](mailto:V.Sergeev@spbstu.ru)

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ

Литиевые технологии для управления разрядом и оптимизации взаимодействия плазмы с элементами первой стенки успешно развиваются в настоящее время на токамаках: Т-10, Т-11, NSTX, FTU, DIII-D и др. Например, на установке EAST для этого использовались разнообразные методы создания предварительного покрытия стенок, инжекция лития в разряд и литиевые лимитеры с открытой поверхностью, включая капиллярно-пористые структуры [1]. В докладе приведен современный статус исследований.

Работы нацелены на комплексное решение проблем стационарной работы токамака с дивертором с помощью литиевых технологий. На уровне технических предложений представлен замкнутый стационарный цикл циркуляции лития в проекте установки ДЕМО-ТИН. Продолжено развитие подхода [2], использующего концепцию секционированного литиевого дивертора.



Схематично элементы системы литиевого цикла в полоидальной плоскости установки показаны на рисунке. Поток тепла плазмы SOL вдоль искривленной сепаратрисы 1, попадает в дальнюю от X-точки испарительную секцию I с температурой стенок 700-750 °С. Мощность

плазмы SOL ДЕМО-ТИН до 30 MW расходуется на испарение Li из бассейна 2 и нагрев паров. Искривленная форма сепаратрисы препятствует прямому попаданию капель разбрызгиваемого Li из области точки удара во входную щель секции III. Снижению потока лития через щель способствует его захват в двух конденсирующих секциях II, III с пониженной температурой стенок 200-250 °C. Дивертор оборудован подсистемой теплоносителя 3 и щелями для стекания сконденсировавшегося лития 4. Для циркуляции лития в системе предполагается использовать механический насос 5 шнекового типа. Для очистки лития предлагается подсистема холодной фильтрации 6, которая позволяет снижать содержание примесей примерно на порядок. Потери лития компенсируются за счет внешней инъекции лития в плазму и пополнения контура чистым литием из резервуара.

Анализ формирования на поверхности первой стенки слоя жидкого лития, защищающего твердотельные W-тайлы от потоков SOL-плазмы, проводилось с учетом дополнительного ввода лития в плазму. Расчеты с помощью кода TRIM предсказывают, что толщины 0.1 мкм достаточно, чтобы остановить проникновение через нее ионов (атомов) D, T, Li с энергией до 500 эВ, ожидаемой при температуре на сепаратрисе 150 эВ [2,3]. Оценка времени формирования слоя такой толщины была сделана, используя потоки лития в SOL и на первую стенку  $F_{Li} = F_{Li\_div} + F_{Li\_inj} - S_{Li\_er}(T_w)$ . Здесь,  $F_{Li\_div} = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ c}^{-1}$  – поток внутрь сепаратрисы из щели секции III [2];  $F_{Li\_inj} = 10^{21} \text{ c}^{-1}$  - доля 0.1 [2] от потока внешней инъекции  $10^{22} \text{ c}^{-1}$  [1] внутрь сепаратрисы;  $S_{Li\_er}(T_w)$  – скорость эрозии лития, в которой учитывается физическое распыление и испарение в зависимости от температуры  $T_w$  [3]. В модели предполагается, что доля 0,9 от потока внешней инъекции уходит в секцию I и откачку, и не участвует в образовании слоя. Это предположение требует дальнейшего анализа и экспериментальных верификаций. Для первой стенки с площадью  $\cong 190 \text{ м}^2$  и  $T_w = 200 \text{ °C}$  время роста слоя толщиной 0.1 мкм составляет  $\cong 18$  минут. При падающих потоках  $F_{Li\_div} + F_{Li\_inj} \cong 10^{21} \text{ c}^{-1}$  формирование слоя лития при температурах  $T_w \geq 250 \text{ °C}$  невозможно из-за повышенной эрозии с поверхности.

Важной проблемой реализации технологии является захват трития в системе ( $D_2$ ,  $T_2$  – LiD, LiT – жидкий Li). Доля гидрида в ней зависит от давления рабочего газа над поверхностью и температуры

жидкого Li [4]. Для первой стенки с ожидаемой температурой 200-250°C образование LiD возможно при флюенсах  $10^{21-22}$  D·cm<sup>-2</sup> [4]. В работе [3] из расчетов по коду B2SOLPS5.2 для ДЕМО-ТИН сообщается значение потока дейтерия на стенку  $\cong 10^{16}$  D·cm<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Тогда для достижения указанных значений флюенса требуется  $10^{5-6}$  сек  $\cong 1-10$  дней непрерывной работы. Давление изотопов водорода в испарительной камере I дивертора ДЕМО-ТИН можно оценить, как давление на сепаратрисе в точке стагнации  $\cong 2$  кПа [2,3]. Это давление заметно меньше равновесного давления  $\cong 3$  кПа, при превышении которого начинается образование гидридов лития при температуре 700 °C [4]. Таким образом, в обсуждаемой конструкции ДЕМО-ТИН образование гидридов лития ожидается на первой стенке.

В связи с присутствием в контуре заметного количества горячего жидкого лития (до 20 кг или до 40 литров), встает вопрос о выборе теплоносителя для первой стенки и дивертора. По предварительным оценкам взаимодействие Li с водой сопровождается энерговыделением 22.8 кДж·г<sup>-1</sup> и может превысить допустимое давление 2 атм в вакуумной камере ДЕМО-ТИН объемом 100 м<sup>3</sup> до значений 20 кг·22.8 кДж·г<sup>-1</sup>/100 м<sup>3</sup>  $\cong 45$  атм. Требуется анализ возможностей использования рвущейся диафрагмы и балластного объема, инертных газов, например, гелия, вместо воды.

Работы поддержаны ГК Росатом и Минобрнауки России в рамках Федерального проекта 3 (U3), проект № FSEG-2023-0018 «Разработка и создание систем струйной и пеллет инъекции с повышенными производительностью и ресурсом».

## Литература

- [1]. J.S. Hu et al, Reviews of Modern Plasma Physics 7 (2023) 9
- [2]. В.Г. Скоков и др., Журнал технической физики 91 (2021) 567
- [3]. V.Yu. Sergeev et al, Nuclear Fusion 55 (2015) 1230
- [4]. F.L. Tabarés et al, Nuclear Fusion 57 (2017) 016029



# ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Вертков А.В.<sup>1</sup>, Жарков М.Ю.<sup>1</sup>, Курячий А.В.<sup>1</sup>, Сучков А.Н.<sup>2</sup>,  
Северюков О.Н.<sup>2</sup>, Попов Н.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «НИКИЭТ», г. Москва, РФ, [vertkov\\_av@nikiet.ru](mailto:vertkov_av@nikiet.ru)

<sup>2</sup>ФГБОУ МО НИЯУ «МИФИ», г. Москва, РФ,

[ANSuchkov@mephi.ru](mailto:ANSuchkov@mephi.ru)

Альтернативная концепция стационарно работающих обращенных к плазме внутрикамерных элементов (ВЭ) реактора УТС, разрабатываемая в нашей стране, основана на использовании в качестве защиты неподвижного или медленно протекающего жидкого лития, заключенного в капиллярно-пористую структуру (КПС) [1]. Отвод тепла от воспринимающей поверхности ВЭ производится за счет теплопроводности к теплоносителю. Основным ограничением при использовании жидких металлов в токамаке является предельная температура воспринимающей поверхности, которая лимитируется допустимым потоком атомов металла в плазму и коррозионной стойкостью конструкционных материалов ВЭ. Для достижения приемлемого для лития уровня температуры 500-600°C при тепловых потоках до 20 МВт/м<sup>2</sup> как материал КПС, так и принимающей стенки должен обладать высокой теплопроводностью, а конструкция должна быть тонкостенной. Из традиционных материалов только вольфрам соответствует требованиям по стационарной работе ВЭ при тепловых потоках 10-20 МВт/м<sup>2</sup>. Однако, ему присущ ряд существенных недостатков. В качестве альтернативы предлагаются следующие композиционные материалы.

В качестве обращенного к плазме материала ВЭ предпочтительным является композиция на основе неспекаемой 3-D металлической волокнистой капиллярной структуры из W пропитанной жидким литием. Коррозионная стойкость в литии, теплофизические и механические свойства, радиационная стойкость, изотропность характеристик и 100% открытая пористость делает этот материал основы КПС уникальным, что продемонстрировано в конструкциях ВЭ для ряда токамаков [2]. Для принимающей поверхности тонкостенного

ВЭ необходим материал с высокими прочностными, теплофизическими и технологическими свойствами. Решением может служить композиционный материал на основе вольфрамовой волокнистой матрицы, пропитанной сталью, с прогнозируемым предельным тепловым потоком свыше 20 МВт/м<sup>2</sup>, теплопроводностью в 4 раз и пределом прочности в 1,5-2 раза выше чем у хромистой стали. Кроме того, ожидается, что он будет достаточно технологичным и иметь хорошую свариваемость с элементами ВЭ, выполненными из хромистой стали.

Предлагаемые решения проблем ВЭ с жидким металлом требует решения технологических вопросов получения изделий из волокнистого вольфрама с оптимальными капиллярными свойствами и размерами не менее 200x300x1 мм.

### **Литература**

- [1]. Lyublinski I. et al. Protection of tokamak plasma facing components by a capillary porous system with lithium. — J. of Nuclear Materials, 2015, vol. 463, p. 1156—1159.
- [2]. Lublinsky I. et al. Module of lithium divertor for KTM tokamak. – Fusion Engineering And Design, 2012, vol. 87, issue 10? 2012, p. 1719-1723.

# ВОПРОСЫ РЕЦИКЛИНГА ТОПЛИВА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ И ВЫБОРУ МАТЕРИАЛОВ

Ананьев С.С.

*НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия,  
[Ananyev\\_SS@nrcki.ru](mailto:Ananyev_SS@nrcki.ru)*

Чтобы обеспечить требуемые параметры плазмы термоядерной установки, необходима вакуумная и магнитная изоляция от окружающей среды что и обуславливает необходимость стенок реактора. Диффузия плазмы поперек магнитного поля и перезарядка с нейтральными атомами порождают потоки горячих частиц, как заряженных, так и нейтральных, бомбардирующих стенки камеры. Простые оценки с использованием предположения об одинаковом удержании частиц и энергии в плазме токамака дают для термоядерной установки среднее значение потока частиц на стенки порядка  $10^{20}$  м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>. Однако, учет рециклинга частиц – то есть, многократно повторяющейся последовательности нейтрализации ионов на поверхности и ионизации образующихся нейтралов, увеличивает этот поток на два порядка величины, а существенная неоднородность потока дополнительно увеличивает его. В результате интегральные значения потоков частиц (D, T) на поверхность структурных элементов в термоядерной установке масштаба JETa и ИТЭРа могут достигать значений порядка  $10^{24}$  с<sup>-1</sup> и  $10^{25}$  с<sup>-1</sup> соответственно [1].

Можно выделить два класса проблем, обусловленных взаимодействием изотопов водорода с конструкционными материалами. Первый – накопление изотопов водорода в материалах, второй – выделение накопленных частиц в плазму при изменении условий в плазме или стенке (есть еще проблема изменения термомеханических свойств материала при

накоплении больших количества водорода, но этот эффект здесь мы не рассматриваем).

Интенсивное облучение материала термоядерными нейтронами создает дефекты кристаллической решетки, способствующие лучшим проникновению и удержанию атомов водорода. Исследования захвата водорода в облученном вольфраме [2] показывают, что реальный уровень насыщения концентрации водорода может составить  $\sim 1$  ат. %, что может сократить время эксплуатации установки. Таким образом, с точки зрения накопления изотопов водорода в материале, наибольший интерес представляют исследования уровня насыщения концентрации, глубины проникновения и скорости диффузии трития в облученном материале, а также разработка методов очистки материала на месте.

Проблема обмена частицами между плазмой и стенкой обусловлена необходимостью контроля плотности плазмы в разряде. Действительно, полное число частиц в плазме термоядерной установки масштаба JETA и ИТЭРа,  $N_{pl} = \langle n \rangle V \sim 10^{21}$  и  $10^{23}$ . Полное же число частиц, которые могут быть накоплены в стенках при достижении административного лимита по содержанию трития примерно на три порядка больше – **то есть, стенку можно рассматривать, как бесконечно большой резервуар частиц по сравнению с плазмой.** В стационарных условиях насыщенной стенки обмен частицами между плазмой и стенкой приводит к динамическому равновесию между потоками частиц из плазмы и потоками частиц, отраженных или десорбированных со стенки. Поскольку эти потоки по-разному зависят от параметров плазмы и стенки, при любом изменении состояния плазмы или стенки можно ожидать нарушения баланса в ту или другую сторону и, соответственно, эффективной откачки или подпитки рабочего газа стенкой.

Величину эффекта можно оценить, зная ожидаемый полный поток частиц на стенку  $\Gamma \sim 2 \cdot 10^{24} \text{ с}^{-1}$  (ионы плюс нейтралы) и полагая поток отраженных частиц  $\Gamma_{refl} \sim 0,5 \Gamma$ . Тогда находящиеся в равновесии потоки частиц, поглощаемые стенкой и выделяемые ей, можно оценить как  $\Gamma_{abs} = \Gamma_{des} \sim 10^{24} \text{ с}^{-1}$ .

Следовательно, нарушение баланса потоков (например) в 1 % приводит к эффективному источнику или стоку частиц в  $10^{22} \text{ с}^{-1}$  (около  $20 \text{ Па м}^3/\text{с}$ ), что может быть сопоставимо с максимально допустимым потоком частиц в систему откачки установки (см., например [3]). Если компенсировать эффективную откачку стенкой относительно легко увеличением напуска газа, то компенсация противоположного эффекта значительно сложнее. Поскольку увеличение скорости откачки (в два раза или больше) нереально, придется работать постоянно с интенсивностью напуска газа, близкой к максимальной, чтобы иметь необходимую свободу для ее уменьшения в случае излишнего выделения частиц со стенки. Таким образом, с точки зрения обмена частицами между плазмой и стенкой наиболее интересными представляются исследования, направленные на понимание и количественное описание процессов десорбции частиц и на уточнение коэффициентов отражения частиц и распределение отраженных частиц по углу и энергии.

Суммируя, можно заключить, что

- Наличие большого количества изотопов водорода и их взаимодействие с материалами есть неотъемлемое свойство термоядерной установки.

- Потоки частиц изотопов водорода распределены по стенкам неоднородно и могут достигать значений плотности потока свыше  $10^{24} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

- Наиболее серьезными проблемами, связанными с взаимодействием изотопов водорода с материалами, представляются:

- Накопление изотопов водорода в материале (ограничение на продолжительность работы);

- Поглощение и выделение частиц поверхностью (контроль плотности плазмы).

- Нужна ясность с описанием состояния стенки в отношении накопления изотопов водорода и обмена ими с плазмой.

Моделирование транспорта изотопов водорода в вакуумной камере термоядерной установки может быть

выполнено согласованно с использованием кодов SOLPS-ITER, Astra и другими. Развитию методов моделирования и их верификации следует уделить значительное внимание, притом на этапе проектирования установки.

### **Литература**

- [1]. А. С. Кукушкин – личное общение и публикации
- [2]. Natano Y. et al. 22nd PSI Conference, Rom 30.05–3.06.2016, to appear in Nucl. Mater. & Energy
- [3]. Pitts R. et al. Phys. Scr. T138 (2009) 014001

# АПРОБАЦИЯ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В МАТЕРИАЛАХ ОБЛИЦОВКИ ТОКАМАК- РЕАКТОРОВ

Медведев О.С.<sup>1,3\*</sup>, Раздобарин А.Г.<sup>1,2\*</sup>, Елец Д.И.<sup>1,2,3</sup>,  
Дмитриев А.М.<sup>1</sup>, Смирнова Е.В.<sup>1,2</sup>, Шубин Я.Р.<sup>1</sup>, Снигирёв Л.А.<sup>1,2</sup>,  
Минаев В.Б.<sup>1</sup>, Новохацкий А.Н.<sup>1</sup>, Мирошников И.В.<sup>1</sup>,  
Филиппов С.В.<sup>1</sup>, Гришаев М.В.<sup>3</sup>, Гаспарян Ю.М.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, С-Пб

<sup>2</sup>СПбГУ, Физический факультет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

\*[o.medvedev@mail.ioffe.ru](mailto:o.medvedev@mail.ioffe.ru)

Процессы, происходящие в плазме токамака, неразрывно связаны с состоянием поверхности контактирующих с плазмой элементов стенки. Согласно выводам, основанным на текущих исследованиях в токамаках и в лабораторных установках, взаимодействие плазмы со стенкой, в частности, накопление термоядерного топлива будет одними из ключевых факторов, определяющих характеристики проектируемых в настоящее время термоядерных установок [1]. При этом большинство токамаков на сегодняшний день имеет достаточно ограниченный набор диагностик состояния первой стенки и захвата водорода. Для локального дистанционного мониторинга накопления топлива в токамаках следующего поколения, таких как ИТЭР, ТРТ и т. д. рассматривается возможность проведения измерений содержания топлива лазерно-индуцированными методами с использованием масс-спектрометрии (LIA-QMS и LID-QMS) и эмиссионной спектроскопии лазерного факела (LIBS).

В докладе будут представлены первые результаты апробации комбинированной методики LIA-QMS/LIBS измерения содержания изотопов водорода в первой стенке токамака Глобус – М2, а также результаты исследования модельных вольфрамовых осадений, на лабораторном стенде методами LIA/LID-QMS. В экспериментах использовались импульсные лазеры с длиной волны 1064 нм и

наносекундной длительностью импульсов. Для регистрации остаточных газов использовались квадрупольные масс-спектрометры. Детектирование эмиссионных линий Na и Ca осуществлялось дифракционным спектрометром высокого разрешения [2].

В ходе экспериментов была проведена экспозиция облицовки дивертора Глобус-М2 серией лазерных импульсов с плотностью мощности  $\sim 10$  Дж/см<sup>2</sup>. В докладе будут представлены результаты, демонстрирующие возможность регистрации эмиссионных линий вольфрама и изотопов водорода в плазме лазерного факела с одновременной регистрацией сигналов 1-4 масс методами масс-спектрометрии. Из соотношения интенсивности линий в оптическом спектре был сделан вывод, что концентрации дейтерия и протия в плазме лазерного факела составляют около 1:3. Данное значение близко к оценкам, полученным методами масс-спектрометрии  $\sim 1:2.5$ . После начала второго прохода сканирования Бальмер-альфа линии изотопов водорода полностью пропадали из спектра, что также свидетельствует о том, что значительная часть изотопов водорода, содержащихся в приповерхностных слоях, удаляется во время первого прохода. Данные масс-спектрометрии также показывают резкое уменьшение содержания дейтерия при втором и следующих циклах сканирования. Тем не менее, интенсивность сигнала четвертой массы остается на уровне  $\sim 30\%$  вплоть до 10-го цикла сканирования, что свидетельствует о существенной глубине залегания изотопов водорода.

Во второй части доклада будут представлены результаты сравнения методов LIA-QMS и LID-QMS, реализованных на лабораторном стенде. Успешное использование метода лазерной десорбции (LID) для количественного анализа содержания изотопов водорода при длительностях лазерных импульсов  $\sim$  мс продемонстрировано в работе [3]. Особенностью взаимодействия нс и пс лазерных импульсов с твёрдым телом являются локальный нагрев на глубину от 10 до нескольких сотен нм и абляция приповерхностного слоя. Абляция вещества при использовании LIA имеет два основных преимущества в сравнении с методом LID. Первое – возможность спектрального анализа лазерной искры. Второе – возможность профилирования по глубине за счёт постепенного удаления материала. Однако на данный момент



остаётся открытым вопрос, применимости методов на основе лазерной абляции для количественного анализа содержания изотопов водорода методами масс-спектрометрии, так как в процессе абляции возможен выход дейтерия в молекулярном, атомарном и ионизованном виде и, как следствие, часть сигнала может быть потеряна при использовании масс-спектрометрического анализа.

В докладе будут представлены результаты прямого сравнение методов LIA и LID на одном стенде. Лазерная десорбция была реализована в режиме свободной генерации лазера, при котором длительность импульса составляет 200 мс, в то время как абляция выполнялась с использованием этого же лазера, но в режиме модуляции добротности, при котором длительность импульса составляет  $\sim 10$  нс. Для оптимизации параметров LID предварительно использовалось моделирование в программном пакете Comsol. Из расчётов была выбрана плотность энергии 100 Дж/см<sup>2</sup> для обоих методов. В качестве контрольного метода по оценке содержания дейтерия используется термодесорбционная спектроскопия. В качестве исследуемых образцов использовались плёнки вольфрама толщиной 1 мкм насыщенные дейтерием, осажденные на подложку молибдена или кремния. Общее количество дейтерия в 3-х идентичных образцах составляет для метода LIA-QMS –  $1,13 \cdot 10^{16} D_2/\text{см}^2$ , LID-QMS –  $2,24 \cdot 10^{16} D_2/\text{см}^2$ , и ТДС –  $1,49 \cdot 10^{16} D_2/\text{см}^2$ . Полученные данные свидетельствуют о возможности применения метода LIA-QMS для количественного анализа дейтерия после оптимизации условий абляции. Более подробное описание эксперимента, результатов и причин их расходимости будут представлены на конференции.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 22-12-00360.

## Литература

- [1]. De Temmerman G., Hirai T., Pitts R.A. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60, P.044018. doi: 10.1088/1361-6587/aaaf62.
- [2]. E.E. Mukhin et al 2016 Nucl. Fusion 56 036017
- [3]. Zlobinski M., Philipps V., Schweer B. et al., J. Nucl. Mater. 2013, 438, S1155-S1159.

# К ВОПРОСУ ОБ ИССЛЕДОВАНИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С МАТЕРИАЛАМИ ТЯР ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ ВЫСОКОПОТОЧНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ И НЕЙТРОННЫХ ОБЛУЧЕНИЯХ

Бобырь Н.П., Спицын А.В.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, [Bobyry NP@nrcki.ru](mailto:Bobyry NP@nrcki.ru)

В докладе рассматривается текущее состояние исследований в области взаимодействия термоядерного топлива (изотопов водорода) с современными кандидатными конструкционными и функциональными материалами для будущих термоядерных реакторов (ТЯР) с большими потоками нейтронов, такими как демонстрационный термоядерный реактор ДЕМО и термоядерный источник нейтронов (ТИН) [1]. На данный момент основными рассматриваемыми конструкционными материалами являются низкоактивируемые ферритно-мартенситные стали, ванадиевые сплавы, а также реакторные аустенитные стали. В качестве функциональных материалов для «первой стенки» ТЯР рассматриваются вольфрам и его сплавы, сплавы меди, бериллий и литий. Особенностью работы таких материалов в условиях ТЯР являются большие тепловые, плазменные и нейтронные потоки с жёстким спектром, которые будут приводить к повреждению их структуры. Такие повреждения могут сильно повлиять на способность материалов накапливать изотопы водорода.

В докладе представлены цели и задачи проведения исследований, описаны основные применяемые методы, включая особые методы, доступные при использовании трития (метод  $\beta$ - и рентгеновской люминесценции, ионизационные камеры). Отмечена важность наработки дефектов структуры в экспериментальных образцах не только путем имитационных облучений заряженными частицами (ионами, электронами), но и

нейтронами со спектром энергий, максимально приближенному к термоядерному спектру. Будет представлен обзор выполненных в мире исследований некоторых материалов ТЯР после нейтронного облучения [2].

Так же в докладе будет рассмотрена возможность создания в РФ стационарного источника дейтериевой плазмы с параметрами пристеночной плазмы ТЯР и с возможностью варьирования потоков ионов в диапазоне  $10^{22} - 10^{24}$  D/м<sup>2</sup> для выполнения комплекса исследований и испытаний обращенных к плазме материалов первой стенки ТЯР. Источник предлагается создать на базе ВЧ источника плазмы геликонного типа. Прототип такого плазменного источника мощностью до 5 кВт создан и испытан в НИЦ «Курчатовский институт» [3].

### Литература

- [1]. B. V. Kuteev and P. R. Goncharov, “Fusion–Fission Hybrid Systems: Yesterday, Today, and Tomorrow,” *Fusion Science and Technology*, vol. 76, no. 7, pp. 836–847, 2020, doi: 10.1080/15361055.2020.1817701.
- [2]. T. Muroga, Y. Hatano, D. Clark, and Y. Katoh, “Characterization and qualification of neutron radiation effects – Summary of Japan-USA Joint Projects for 40 years –,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 560, p. 153494, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jnucmat.2021.153494.
- [3]. Черкез Д.И., и др., ВАНТ, Серия: Термоядерный синтез. 2020. Т. 43. № 3. С. 101-110

# УСТАНОВКА ВЕТА: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Касатов А.А.<sup>1,2</sup>, Балаш И.И.<sup>1</sup>, Бурдаков А.В.<sup>1</sup>, Вячеславов Л.Н.<sup>1</sup>,  
Казанцев С.Р.<sup>1</sup>, Кандауров И.В.<sup>1</sup>, Кузьмин Е.И.<sup>1</sup>, Попов В.А.<sup>1</sup>,  
Рыжков Г.А.<sup>1</sup>, Черепанов Д.Е.<sup>1,2</sup>, Шошин А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия, [inp@inp.nsk.su](mailto:inp@inp.nsk.su)

<sup>2</sup>НГУ, Новосибирск, Россия, [nsu@nsu.ru](mailto:nsu@nsu.ru)

Разрушение поверхностей, обращённых в плазму компонентов вакуумной камеры, является одной из основных проблем для создания крупных установок магнитного удержания плазмы [1].

В ИЯФ СО РАН создана экспериментальная установка для изучения процессов эрозии материалов состоящая из комплекса оптических in-situ диагностик, мощного электронного пучка (до 1000 Дж, 100-600 мкс, 3 см<sup>2</sup>) и импульсного лазера (до 100 Дж, 500-800 мкс, 0.5 см<sup>2</sup>) [1].

Большой выбор источников теплового воздействия и оптических диагностик позволяет проводить всесторонние исследования эрозии различных перспективных материалов, в том числе и керамических [1]. Диагностический комплекс, в зависимости от условий экспериментальной серии, может включать в себя многокадрную быструю съёмку, малоугловое лазерное рассеяние для исследования микрочастиц, отражение и рассеяние излучения непрерывного диагностического лазера от поверхности образца для определения изгиба и изменения шероховатости, связанной с эрозией материала мишени.

Установка ВЕТА интенсивно развивается, в настоящее время введён в эксплуатацию непрерывный 4 кВт волоконный лазер для экспериментов с увеличенной базовой температурой мишени и импульсного-периодического воздействия на материалы. Кроме этого, ведутся исследования механизмов разрушения материалов с помощью синхротронного излучения при импульсном тепловом воздействии.

Стоит отметить, что в ИЯФ СО РАН, для исследования воздействия на материалы, смежными группами разрабатывается стационарный источник плазмы на основе геликонного разряда в сходящемся магнитном поле (входная мощность 25 кВт, внешнее магнитное поле 200-600 Гс, плотность до  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) и импульсно-периодический электронный пучок (средняя мощность 5 кВт, пиковая 200 кВт, от 100 мкс до стационара, до  $10^6$  импульсов,  $0.5 \text{ см}^2$ ).

### **Литература**

- [1]. Journal of Nuclear Materials, 438, S48 (2013), 10.1016/j.jnucmat.2013.01.008
- [2]. AIP Conference Proceedings, 1771, 060004 (2016), 10.1063/1.4964212
- [3]. Nuclear Materials and Energy, 19, 316, (2019), 10.1016/j.nme.2019.02.036

# КАЧЕСТВЕННАЯ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН ПРИ РАЗРУШЕНИИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ НАГРЕВОМ

Попов В. А.<sup>1,2</sup>, Касатов А.А.<sup>1,2</sup>, Черепанов Д.Е.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия, [inp@inp.nsk.su](mailto:inp@inp.nsk.su)

<sup>2</sup>НГУ, Новосибирск, Россия, [nsu@nsu.ru](mailto:nsu@nsu.ru)

Одним из главных препятствий для создания крупномасштабных установок для магнитного удержания плазмы является разрушение поверхностей компонентов вакуумной камеры. Плазма, образующаяся внутри установки, может привести к эрозии и разрушению поверхностей, что негативно сказывается на работе установки в целом [1].

В последнее время возобновился поиск перспективных материалов первой стенки и дивертора для будущих термоядерных установок [1]. Основным материалом – кандидатом для дивертора является вольфрам. При импульсной тепловой нагрузке он проходит через вязко-хрупкий переход и трескается. Образование подповерхностных трещин резко снижает теплотехнические свойства вольфрама, делая такие повреждения неприемлемыми, поэтому в ИЯФ СО РАН изучают и другие возможности. Одним из перспективных кандидатов считается керамика. Она сразу хрупкая и на первый взгляд при тепловом расширении в ней не возникает натяжений, а значит и не будет образовываться трещин.

В представленной работе проведены теоретические оценки того, как деформируется керамика и показано, что, хотя в среднем натяжений не возникает, есть области, в которых могут возникать условия для развития трещин определённых геометрий. Причиной является наличие неоднородностей в материале, которые трансформируют среднюю нагрузку сжатия в результате теплового расширения поверхностного слоя в нагрузки на растяжение вблизи локальных неоднородностей.

Обсуждается влияющие на разрушение свойства материала и предложены рекомендации для упрочнения керамики.

### **Литература**

- [1]. Journal of Nuclear Materials, 438, S48 (2013), 10.1016/j.jnucmat.2013.01.008
- [2]. Plasma Phys. Control. Fusion 64 055018 (2022), 10.1088/1361-6587/ac5a7c

## ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЛИЦОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ, ОБРАЩЕННЫХ К ПЛАЗМЕ.

Р.В. Рулёв, В.Е. Кузнецов, В.В. Левичев, И.В. Мазуль,  
П.Ю. Пискарёв, В.Г. Серов

*Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», город  
Санкт-Петербург, Россия, [mail@niiefa.spb.su](mailto:mail@niiefa.spb.su)*

В проектируемых термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы и находящихся на стадии строительства, тепловые нагрузки на обращенные к плазме элементы первой стенки и дивертора могут варьироваться от 1 до 20 МВт/м<sup>2</sup>. В качестве материала облицовки элементов, обращенных к плазме, применяются различные материалы, такие, как бериллий, вольфрам, графит, молибден и др. Изучение поведения элементов облицовки под действием интенсивных термоциклических нагрузок аналогичных тем, которые будут испытывать элементы первой стенки и дивертора, является ключевым этапом в выборе конструкторских и технологических решений при разработке внутрикамерных элементов термоядерных установок.

Для решения подобных задач в АО «НИИЭФА» в 1994 году был разработан и введен в эксплуатацию стенд тепловых испытаний «Цефей-М». За время своего существования стенд был несколько раз подвергнут глубокой модернизации: первый раз в 2008 году, когда была установлена новая электронно-лучевая система с максимальной мощностью 200 кВт и ускоряющим напряжением в 40 кВ производства фирмы Фон Арденн (Германия), второй раз в 2022 году, когда была установлена новая электронно-лучевая система с максимальной мощностью 800 кВт и ускоряющим напряжением в 60 кВ производства той же фирмы. Одновременно с заменой электронно-лучевой системы в 2022 году была заменена полностью вакуумная камера и подвижный модуль для монтажа исследуемых макетов.



В качестве основных направлений деятельности стенда можно выделить следующие:

- проверка пригодности конструкторских и технологических решений, выбранных для производства компонентов диверторной кассеты и элементов первой стенки, обращенных к плазме;
- изучения повреждаемости различных материалов под воздействием аномально высоких поверхностных тепловых нагрузок, включая коротко-импульсные;
- изучения процессов интенсификации теплообмена при охлаждении водой или газом структур с односторонним поверхностным нагревом;
- изучения термопрочности и термоциклического ресурса многослойных конструкций, работающих в условиях больших градиентов температур;
- разработка и исследование технологических процессов, требующих высокого вакуума и температур, а также высоких скоростей нагрева и охлаждения;
- проведения имитационных испытаний и отработка вариантов конструкций, работающих в условиях интенсивного теплового воздействия.

В ходе многолетней работы стенда выполнены тепловые испытания макетов с различными материалами облицовки такие, как:

- квалификационные циклические испытания макетов с графитовой облицовкой с медным каналом охлаждения круглого сечения. В ходе проведения испытаний тепловая нагрузка на макеты достигала  $20 \text{ МВт/м}^2$ ;
- циклические испытания различных макетов с бериллиевой облицовкой с соединением при помощи газостатического прессования с каналами охлаждения круглого сечения из меди и нержавеющей стали. В ходе проведения испытаний тепловая нагрузка на макеты достигала  $3,5 \text{ МВт/м}^2$ ;
- циклические испытания различных макетов с бериллиевой облицовкой с паяным соединением с каналами охлаждения типа гипервапатрон из биметаллической структуры

(бронза/нержавеющая сталь). В ходе проведения испытаний тепловая нагрузка на макеты достигала  $5,9 \text{ МВт/м}^2$ ;

- ресурсные циклические испытания макетов с бериллиевой облицовкой с паяным соединением с каналами охлаждения типа гипервапатрон из биметаллической структуры (бронза/нержавеющая сталь) при тепловой нагрузке в  $4,7 \text{ МВт/м}^2$ ; в ходе проведения испытаний общее число циклов составило 30 000;

- квалификационные циклические испытания макетов с вольфрамовой облицовкой с паяным соединением с каналами охлаждения типа гипервапатрон из биметаллической структуры (бронза/нержавеющая сталь) при тепловой нагрузке до  $20 \text{ МВт/м}^2$ ;

- тепловые испытания макетов с покрытием из нержавеющей стали с каналами охлаждения круглого сечения из меди. В ходе проведения испытаний тепловая нагрузка на макеты достигала  $34 \text{ МВт/м}^2$ .

- циклические испытания макетов с вольфрамовой облицовкой с каналами охлаждения круглого сечения из меди в рамках исследования режима качания тепловой нагрузки; в ходе проведения испытаний тепловая нагрузка на макеты достигала  $30 \text{ МВт/м}^2$  с общим количеством микро-циклов более 100 000.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА В УСЛОВИЯХ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИТЭР

Алябьев И.А.<sup>1,2</sup>, Цыбенко В.Ю.<sup>2</sup>, Позняк И.М.<sup>1,2</sup>, Бирюлин Е.З.<sup>1,2</sup>, Новоселова З.И.<sup>1,2</sup>, Федулаев Е.Д.<sup>1,2</sup>, Путрик А.Б.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>МФТИ, Москва, Россия, [aliabev.ia@phystech.edu](mailto:aliabev.ia@phystech.edu)

<sup>2</sup>АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Россия

<sup>3</sup>Проектный центр ИТЭР, Москва, Россия

В ходе работы реактора ИТЭР защитные покрытия дивертора и первой стенки будут подвергаться плазменно-тепловому воздействию. Наиболее интенсивное воздействие будет происходить во время переходных процессов – срывов плазменного шнура и периферийных локальных неустойчивостей (ELM). Пороги плавления основных конструкционных материалов вакуумной камеры ИТЭР – вольфрама и бериллия составляют 45–50 и 28 МДж/м<sup>2</sup>с<sup>0.5</sup> соответственно. Тепловая нагрузка, выраженная в виде фактора теплового потока, при ELM-событиях составит 15 – 300 МДж/м<sup>2</sup>с<sup>0.5</sup>, а при срывах – 90 – 2100 МДж/м<sup>2</sup>с<sup>0.5</sup> [1].

Настолько интенсивные плазменно-тепловые нагрузки на защитные пластины дивертора и первой стенки, приведут к значительной эрозии защитных покрытий, а также сокращению срока службы реактора. Изучение физических механизмов эрозии критически важно для решения проблемы первой стенки в будущих реакторах. В проведенных ранее экспериментах показано, что разрушение металлических защитных покрытий будет происходить в основном за счет перемещения расплавленного слоя по их поверхности [2]. Для развития представлений о происходящих физических процессах, требуется разработка численных моделей и сравнение результатов расчета с экспериментом.

Работа посвящена разработке модели движения расплавленного слоя под действием плазменного потока.

Движение расплава описывается системой связанных уравнений теплопроводности и Навье-Стокса:

$$\begin{cases} \rho C_p^{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p^{eq} \vec{U} \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) \\ \rho \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \rho (\vec{U} \cdot \vec{\nabla}) \vec{U} = \vec{\nabla} \cdot \{-p[I] + \mu [\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T]\} + \vec{F}_D + \vec{F}_P + \rho g + \vec{j} \cdot \vec{B} + \gamma \kappa \cdot \vec{n} + \vec{\nabla}_S \gamma \\ \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \end{cases}$$

где  $\rho$  – плотность (кг/м<sup>3</sup>),  $C_p^{eq}$  – «эквивалентная» удельная теплоемкость (Дж/кг·К),  $k$  – коэффициент теплопроводности (Вт/м·К),  $T$  – температура (К),  $\vec{U}$  – скорость течения (м/с),  $p$  – давление (Па),  $\mu$  – вязкость (Па·с),  $[I]$  – единичная матрица,  $\gamma$  – коэффициент поверхностного натяжения (Н/м).

Предполагается, что на поверхность металлической мишени воздействует импульсный плазменный поток, с известным распределением мощности и давления в пространстве и времени. Плазменное воздействие вызывает плавление поверхностного слоя и его движение из-за градиента давления  $\vec{\nabla} p$  и силы плазменного трения  $\vec{F}_P$ . Свойства материала: теплопроводность, плотность, вязкость, коэффициент поверхностного натяжения – в модели являются температурно-зависимыми. Для описания фазового перехода используется метод эквивалентной теплоёмкости [3]. В модели учтены потери массы и энергии, связанные с испарением материала. Течение расплава в расчётах считается ламинарным. Гидродинамическая задача решается в присутствии силы поверхностного натяжения и силы, возникающей из-за эффекта Марангони.

При наличии внешнего магнитного поля к предыдущей системе присоединялись уравнения Максвелла, записанные в форме для скалярного и векторного потенциалов:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \vec{j} & \vec{E} = -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \vec{B} = \nabla \times \vec{A} \\ \vec{j} = \sigma_e (\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B}) & \nabla \cdot \vec{j} = 0 \end{cases}$$

Здесь  $\vec{B}$  – магнитная индукция (Тл),  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля (А/м),  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля

(В/м),  $\vec{j}$  – плотность тока ( $A/m^2$ ),  $\sigma_e$  – удельная проводимость (См). Сила Ампера  $\vec{F}_B = \vec{j} \times \vec{B}$ , полученная из решения этой системы, учитывается в уравнении Навье-Стокса. Задача о перемещении свободной поверхности решается с помощью произвольного Лагранжево-Эйлерова метода (ALE). Для получения решения используется метод конечных элементов.

В результате проведённого моделирования получено перемещение расплава при различных значениях мощности плазменного воздействия. Показано, что перемещение расплава нельзя объяснить наличием одного только градиента давления плазмы по поверхности мишени, что подтверждает выводы работы [2]. Введена сила трения плазмы, благодаря чему получено качественное совпадение расчета с экспериментальными данными. Результаты расчетов демонстрируют образование кольцевой волновой структуры на поверхности мишени, что было обнаружено экспериментально [2]. Обнаружена линейная зависимость глубины кратера эрозии от числа плазменных облучений. Рассмотрено влияние формы импульса давления и мощности плазменного потока на итоговый профиль поверхности мишени и скорость движения расплава.

Проведено моделирование движения расплава в постоянном магнитном поле и получена зависимость скорости движения расплава от величины магнитного поля, качественно соответствующая теоретической модели. Определено влияние силы Лоренца, а также сил поверхностного натяжения на динамику движения расплава.

Работа выполнена при финансовой поддержке и в рамках договора № 17706413348220000170/35-22/01 от 28 апреля 2022 года.

### **Литература**

- [1]. Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F. et al; A full tungsten divertor for ITER: Physics issues and design status; Journal of Nuclear Materials; 2013; V.438; P.S48-S56.

- [2]. Poznyak I.M. et al; Erosion of metals under the action of intense plasma stream; VANT, Ser. Thermonuclear synthesis; 2012; V.4; P. S23-S33.
- [3]. Voller V.R., Swaminathan C.R. and Thomas B.G; Fixed Grid Techniques for Phase Change Problems: A Review; Journal for Numerical Methods in Engineering; 1990; V.30; P.S875-S898.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ ВОЛЬФРАМА, ПОКРЫТОГО ТОНКИМ СЛОЕМ МЕТАЛЛА, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ

Карташева А.А., Климов Н.С., Подковыров В.Л., Муравьева Е.А.,  
Ярошевская А.Д., Барсук В.А.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Россия,  
[alexkartasheva@triniti.ru](mailto:alexkartasheva@triniti.ru)

Наиболее перспективным материалом первой стенки и дивертора проектируемых термоядерных реакторов считается вольфрам [1]. Опыт показывает, что его эксплуатационные характеристики можно существенно повысить за счет применения тонких возобновляемых слоев из материалов с малым атомным номером, напыляемых сверху. Основным недостатком таких слоев является низкая температура плавления и кипения, что может приводить к интенсивному испарению слоя во время таких процессов, как разного рода срывы плазменного потока. Однако, ожидается, что длительное время жизни слоя будет обеспечиваться за счет эффекта паровой экранировки [2]

Проведено экспериментальное исследование влияния напыленного на поверхность вольфрамового образца металла на эрозию поверхности вольфрама при облучении образца потоками плазмы. В ходе эксперимента было проведено облучение образцов вольфрама и вольфрама с покрытием висмута (5 мкм) и покрытием олова (5 мкм) потоком водородной плазмы с параметрами, близким к параметрам ЭЛМ в диверторе ИТЭР [3]. Плазменный поток с тепловой нагрузкой на оси 2.5 МДж/м<sup>2</sup> воздействовал на образец в течение 1 мс. Указанные параметры обеспечивались с помощью квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя [4].

В экспериментальном исследовании были использованы следующие диагностики. Тепловая нагрузка в процессе облучения была измерена калориметрическими методами с

помощью термопарных измерений. Временная динамика интенсивности излучения линий олова и вольфрама в течение импульса была зарегистрирована с помощью монохроматора со спектральным разрешением 0,1 нм. На выходе монохроматора была установлена высокоскоростная камера Phantom v2640. Съемка велась с экспозицией 4 мкс и интервалом между кадрами 22 мкс. Между импульсами (после 1 го и 5-го) образцы извлекались из вакуумной камеры дальнейших исследований. Было проведено взвешивание образцов для определения удельных потерь массы, исследованы шлифы и сколы для определения глубины плавления вольфрама, определен элементный состав обращенной к плазме поверхности.

Для указанных экспериментальных условий были теоретически рассчитаны удельные потери массы и динамика температуры поверхности образца.

В результате воздействия плазменного потока на образец вольфрама без покрытия на поверхности, обращенной к плазме, видны следы плавления и течения вольфрама. Удельные потери массы составили  $30 \text{ мг/см}^2$  за один импульс.

При облучении образца вольфрама с покрытием висмута одним импульсом на поверхности видно изменение начальной структуры висмута, однако вся поверхность вольфрама осталась закрытой защитным слоем. Можно сделать вывод, что температура поверхности вольфрама не превысила температуру кипения висмута  $T_k=1837 \text{ К}$ . После пятого импульса основная часть покрытия испарилась, однако на поверхности вольфрама отсутствовали следы плавления, что следует из анализа сколов образца. Удельные потери массы составили  $1,6 \text{ мг/см}^2$  за один импульс. Расчетные потери массы напыленного висмута за 1 импульс более чем в 100 раз превышают значения, полученные в эксперименте. Это различие объясняется наличием сильного эффекта экранировки: существенная доля энергии затрачивается на нагрев пара, его ионизацию и излучение, и в результате скорость испарения оказывается низкой.

Далее облучался образец с напылением слоя олова толщиной 5 мкм. На обращенной к плазме поверхности



отчётливо видно изменение начальной структуры олова, при этом почти вся поверхность вольфрама осталась закрытой защитным слоем. После 5 импульсов олово испарилось, а поверхность вольфрама имеет сильные следы эрозии. Удельные потери массы составили  $3,1 \text{ мг/см}^2$  за импульс. Полученное значение в 2 раза превышает удельные потери массы образца с покрытием висмута. Расчетные потери массы напыленного олова за 1 импульс более чем в 10 раз превышают значения, полученные в эксперименте.

Было проведено измерение динамики интенсивности спектральных линий висмута и олова при каждом импульсном воздействии на образцы. Экспериментальные данные показали, что начало излучения линий висмута и олова приходится на 0.2 мс разряда. Данное значение хорошо коррелирует с теоретически рассчитанной динамикой температуры образца во время плазменного воздействия. Значение интенсивности излучения линии висмута во время второго и третьего импульсного воздействия на образец принимают близкие значения. При пятом импульсе интенсивность упала до значения, составляющего 15-20% от интенсивности во время второго импульса. Этот факт говорит о том, что висмут практически полностью испаряется с поверхности вольфрама за 5 импульсов при данной тепловой нагрузке. Данный вывод подтверждают и результаты элементного анализа поверхности образца, проведенного после пяти импульсов. Исследование интенсивности линии излучения олова показало, что тенденция изменения интенсивности аналогично тенденции линии висмута.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00153.

### **Литература**

- [1]. Pitts R.A. et. al. A full tungsten divertor for ITER: Physics issues and design status // Journal of Nuclear Materials. 2013. V. 438. P. S48-S56

- [2]. Ibano K. et al. Estimation of suppressed erosion by vapor shielding at Be and W walls under transient loads //Nuclear Fusion. 2019. V. 59. P. 076001.
- [3]. Federici G et al. Effects of ELMs and disruptions on ITER divertor armour materials // Journal of nuclear materials. 2005. V. 337. P. 684–90
- [4]. Климов Н. С. и др. Экспериментальное исследование интегральных характеристик потока плазмы и разряда квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя с собственным магнитным полем //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2019. – Т. 42. – №. 3. – С. 52-63.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЕРАМИК В РЕЗУЛЬТАТЕ ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА, ВОЗМОЖНОГО В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОГО УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ

Черепанов Д.Е.<sup>1,2</sup>, Бурдаков А.В.<sup>1</sup>, Вячеславов Л.Н.<sup>1</sup>,  
Голосов М.А.<sup>3</sup>, Кандауров И.В.<sup>1</sup>, Касатов А.А.<sup>1,2</sup>, Казанцев С.Р.<sup>1</sup>,  
Попов В.А.<sup>1</sup>, Рыжков Г.А.<sup>1</sup>, Шошин А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия, [inp@inp.nsk.su](mailto:inp@inp.nsk.su)

<sup>2</sup>НГУ 2, Новосибирск, Россия, [nsu@nsu.ru](mailto:nsu@nsu.ru)

<sup>3</sup>ИХТТМ СО РАН, Новосибирск, Россия, [secretary@solid.nsc.ru](mailto:secretary@solid.nsc.ru)

Термоядерные установки нуждаются в исследовании новых материалов для изготовления обращенных к плазме компонентов (ОПК). Утвержденный сейчас материальный состав, например, токамака ИТЕР имеет ряд недостатков, среди которых высокое среднее зарядовое число, а также недостаточная устойчивость ОПК импульсному нагреву. Перспективной, но плохо исследованной идеей является предложение применения высокотемпературных керамик для изготовления защиты ОПК. Среди основных преимуществ такого подхода можно отметить низкое среднее зарядовое число и достаточно высокую рабочую температуру. Главные недостатки – повышенная хрупкость и возможное высокое удержание трития, особенно, в случае углеродсодержащих керамик.

При выборе материала необходимо понимать детали деструктивных процессов, происходящих с ним, в частности, во время термических ударов, во время удержания плазмы. Для изучения эрозии высокотемпературных керамик при импульсном нагреве на базе установки БЕТА [1] был создан стенд с *in situ* диагностическими системами. Термические удары моделировались с использованием импульсного ИК лазера,

позволяющего добиваться ожидаемой во время переходных процессов в ходе удержания плазмы плотности мощности на поверхность образцов. Стенд был снабжен диагностическими системами для отслеживания динамики эрозии облучаемой поверхности образцов, ее температуры, а также поглощенной плотности мощности.

В ходе экспериментальной работы было проведено испытание керамик, считающихся перспективными с целью применения в качестве материала для изготовления защиты ОПК. Экспериментальные результаты позволили охарактеризовать поведение керамик во время термических ударов, определить допустимые параметры нагрева, при которых не происходит эрозии поверхности, а также получить информацию о перспективности их использования в термоядерных установках с точки зрения устойчивости в случае возникновения переходных процессов во время удержания плазмы.

Работа поддержана РФФ № 23-19-00212.

### **Литература**

- [1]. L.N. Vyacheslavov et al., Phys. Scripta 93 (2018) 035602

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ПОТОКОВ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТЬ ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНИ

А.В. Пушина<sup>1,2</sup>, Д.А. Бурмистров<sup>1,3</sup>, С.В. Карелов<sup>1</sup>,  
С.Д. Лиджигорьев<sup>1,2</sup>, И.М. Позняк<sup>1,2</sup>, Д.А. Топорков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Государственный научный центр Российской Федерации  
Троицкий институт инновационных и термоядерных  
исследований, Троицк, Москва, Россия, [liner@triniti.ru](mailto:liner@triniti.ru)

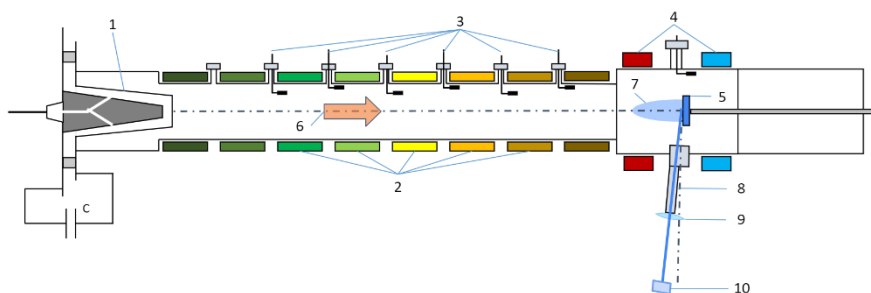
<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный  
исследовательский университет), Долгопрудный, Россия,  
[info@mipt.ru](mailto:info@mipt.ru)

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва,  
Россия [universe@mpei.ac.ru](mailto:universe@mpei.ac.ru)

Успешная реализация проекта ИТЭР в значительной степени зависит от правильного выбора обращенных к плазме материалов вакуумной камеры токамака. Для обоснования этого выбора необходимы экспериментальные данные о поведении материалов под действием интенсивных плазменных потоков [1], в частности, о динамике температуры на поверхности защитных покрытий, поглощаемой ими энергии, а также поглощаемой поверхностью плотности теплового потока. Существующие токамаки не обеспечивают плазменно-тепловые нагрузки, ожидаемые в ИТЭР, поэтому для испытаний материалов применяют, в частности, плазменные ускорители [2].

В докладе представлены результаты исследования динамики температуры на поверхности вольфрамовой мишени под действием мощных плазменных потоков методом спектральной пирометрии, а также численные методы и результаты определения динамики, поглощаемой вольфрамом плотности теплового потока.

Эксперименты проводились на установке МК-200, которая состоит из плазменного ускорителя с импульсным напуском газа, плазмопровода и мишенной камеры. Источником питания ускорителя является высоковольтная конденсаторная батарея емкостью  $\approx 1$  мФ. Схема экспериментов представлена на рисунке 1. Плазменный поток со скоростью  $(4\div 6)\times 10^7$  см·с<sup>-1</sup> и энергосодержанием  $\approx 50$  кДж транспортировался в продольном магнитном поле с нарастающей индукцией от 1 Тл вблизи ускорителя до 2 Тл в мишенной камере. В качестве плазмообразующего газа использовался водород. Плазменный поток, длительностью 10÷15 мкс и диаметром  $\approx 8$  см воздействовал на вольфрамовую мишень размерами 12 см × 14 см, которая выполняла функции многоканального калориметра.



1 - импульсный плазменный ускоритель, 2 - катушки магнитного поля, 3 - магнитные зонды, 4 - катушки Гельмгольца, 5 - вольфрамовая мишень, 6 - плазменный поток, 7 - мишенная плазма, 8 - система патрубков, 9 - линза, 10 - пирометр.

Рис. 1. Схема экспериментов на установке МК-200.

Для измерения динамики температуры на поверхности мишени был разработан инфракрасный пирометр. Представлено его устройство, схема калибровки, а также схема проведения экспериментов. Определена динамика температуры поверхности мишени (рисунок 2), а также плотность поглощенной мишенью энергии. Приведены методы решения обратной задачи теплопроводности: определение динамики поглощаемого теплового потока по измеренной температуре на поверхности

мишени. Проведено сравнение полученных результатов с данными калориметрии — энергии, поглощенной вольфрамовой мишенью.

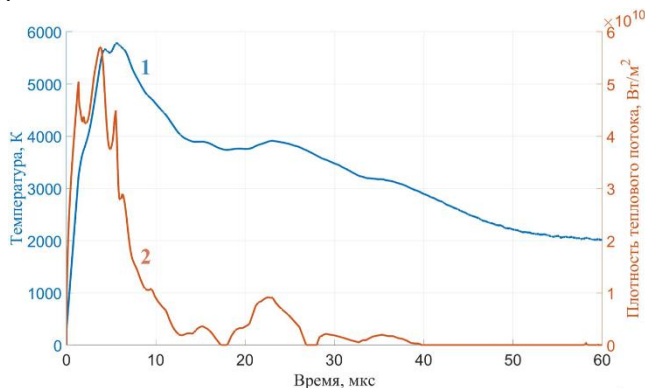


Рис. 2. Динамика температуры поверхности вольфрамовой мишени (1), а также плотности поглощаемого поверхностью теплового потока (2).

Таким образом, проведенная на основании данных пирометрии оценка энергии, поглощенной вольфрамом при воздействии мощного потока водородной плазмы, близка к предельному уровню, соответствующему эффекту паровой экранировки для вольфрама [2].

## Литература

- [1]. Климов Н.С., Подковыров В.Л., Житлухин А.М., Архипов Н.И., Сафронов В.М., Барсук В.А., Позняк И.М., Loarte A., Merola M., Linke J. Воздействие интенсивных импульсных потоков плазмы на защитные материалы внутрикамерных компонентов термоядерного реактора — Ядерная физика и инжиниринг, 2010, Т. 1, № 3, с. 210-219.
- [2]. Pshenov A.A., Eksaeva A.A., Krashennnikov S.I., Marenkova E.D. Vapor shielding of solid targets exposed to high heat flux. — Physics Procedia, 2015, vol. 71, p. 14-19.

Всероссийская конференция

«Диагностика высокотемпературной плазмы»

**ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ  
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

**ISBN 978-5-9216-2448-1**

Подписано в печать 24.08.2023

Формат 60x84/16 Гарнитура Times New Roman

Уч. изд. листов 17. Тираж 160 экз. Заказ 22035

Подготовлено к изданию в Частном учреждении «ИТЭР-Центр»  
123060, г. Москва, ул. Расплетина д.11 к.2

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в АО «Т8 Издательские технологии»,  
г. Москва, Волгоградский проспект, 42, к.5.