

ХІХ
Всероссийская конференция

ДИАГНОСТИКА
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ПЛАЗМЫ



ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

27 сентября - 1 октября 2021
Сочи

**Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
Частное учреждение «ИТЭР-Центр»
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»
Акционерное общество «Государственный научный центр РФ
Троицкий институт инновационных и термоядерных
исследований»**

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**27 сентября – 01 октября 2021г.
Гостиничный комплекс «Имеретинский»
г. Сочи**

**Регистрация участников
27 сентября 2021 с 09:00**

ОРГКОМИТЕТ

А.В. Красильников (ИТЭР-Центр) - д.ф.-м.н., председатель
Е.П. Велихов (НИЦ КИ) - академик
С.Г. Гаранин (РФЯЦ ВНИИЭФ) - академик
П.А. Багрянский (ИЯФ СО РАН) - д.ф.-м.н.
К.И. Ильин (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) - к.т.н.
Ю.А. Кащук (ИТЭР-Центр) - к.ф.-м.н., зам. председателя
Ю.М. Гаспарян (МИФИ) - к.ф.-м.н.
П.В. Романов (Росатом) - к.ф.-м.н.
О.Г. Филатов (НИИЭФА) - д.ф.-м.н.
С.В. Лебедев (ФТИ РАН) - д.ф.-м.н.
А.О. Ковалев (ИТЭР-Центр), секретарь

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

М.П. Петров (ФТИ РАН) - д.ф.-м.н., председатель
В.И. Ильгисонис (Росатом) - д.ф.-м.н.
Л.М. Коврижных (ИОФ РАН) - д.ф.-м.н.
М.И. Пергамент (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) - д.ф.-м.н.
А.Н. Романников (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) - д.ф.-м.н.
В.М. Сафронов (ИТЭР-Центр) - д.ф.-м.н., зам. председателя
И.В. Мазуль (НИИЭФА) - д.т.н.
С. А. Бельков (РФЯЦ ВНИИЭФ) - д.ф.-м.н.
А.В. Бурдаков (ИЯФ СО РАН) - д.ф.-м.н.
А.Г. Алексеев (НИЦ КИ) - к.ф.-м.н.
С.В. Коновалов (НИЦ КИ) - к.ф.-м.н.
Ю.А. Кащук (ИТЭР-Центр) - к.ф.-м.н.

ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ

О.И. Семенов (ИТЭР-Центр)
В.В. Алифанова (ИТЭР-Центр)
Н.В. Нагорный (ИТЭР-Центр)

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

День	27.09 Понедельник	
Начало	ЗАЛ 1	
10:00	Открытие конференции	
10:30	С1	Кащук Ю.А.
11:00		Немцев Г.Е.
11:30		Тугаринов С. Н.
12:00	Кофе брейк	
12:30	С1	Шестаков Е.А.
13:00		Капустин Ю.В.
13:30		Капустин Ю.В.
14:00	Перерыв на обед	
14:30	С1	Серов С.В.
15:00		Родионов Р.Н.
15:30		Хилькевич Е.М.
16:00		Иванцовский М.В.
16:30		Листопад А.А.
17:00		Семенов И.Б.
17:30		Наволоцкий А.С.

День	28.09 Вторник			
Начало	ЗАЛ 1		ЗАЛ 2	
10:00	С 2	Коновалов С.В.	С 1	Ковалев А.О.
10:30		Кацук Ю.А.		Кумпилов Д.А.
11:00		Вукулов К.Ю.		Ревякин П.А.
11:30		Тугаринов С. Н.		Афанасенко Р.С.
12:00	Кофе брейк			
12:30	С 2	Несеневич В.Г.	С 6	Субботин Г.Ф.
13:00		Мухин Е.Е.		Дрозд А.С.
13:30		Шевелев А.Е.		Минашин П.В.
14:00	Перерыв на обед			
14:30	С 2	Петров В.Г.	С 6	Афонин А.Ю.
15:00		Иванов А.А.		Афонин К.Ю.
15:30		Раздобарин А.Г.		Иваненко С.В.
16:00		Портнов Д.В.		
16:30		Немцев Г.Е.		
17:00		Артемьев К.К.		
17:30		Миронова Е.Ю.		

День	29.09 Среда			
Начало	ЗАЛ 1		ЗАЛ 2	
10:00	С 5	Скрекель О.М.	С 7	Гаспарян Ю.М.
10:30		Бахарев Н.Н.		Карпов А.В.
11:00		Полосаткин С.В.		Устюжанин В.О.
11:30		Драбинский М.А.		Сушков А.В.
12:00	Кофе брейк			
12:30	С 5	Кормилицын Т.М.	С 4	Курские Г.С.
13:00		Панкратенко А.В.		Чан Куанг Винь
13:30		Ильсова М.В.		Лизунов А.А.
14:00	Перерыв на обед			
14:30	С 5	Беграмбеков Л.Б.	С 4	Хуснутдинов Р.И.
15:00		Аблесимов В.Е.		Сдвиженский П.А.
15:30		Артемьев К.К.		Толпегина Ю.И.
16:00		Стушишин Н.В.		Тюхменева Е.А.
16:30	Семинар			Жильцов Н.С.
17:00				Бондаренко А.В.

День		30.09 Четверг			
Начало	ЗАЛ 1		Начало	ЗАЛ 2	
10:00	С7	Зайцев В.И.	10:00	С8	Степанов Д.Н.
10:30		Хромов Н.А.	10:30		Семенов О.И.
11:00		Будаев В.П.	11:00		Семенов Е.В.
11:30		Архипов И.И.	11:30		Портоне С.С.
			11:45		Ежова З.В.
12:00	Кофе брейк				
12:30	С7	Мещеряков А.И.	12:30	С8	Ларионов А.С.
			12:45		Григорян Л.А.
13:00		Балаченков И.М.	13:00		Нагорный Н.В.
			13:15		Звонарева А.А.
13:30	Балашов А.Ю.	13:30	Миронов А.Ю.		
14:00	Перерыв на обед				
14:30	С7	Степин А.В.	14:30	С8	Журавлёв М.К.
			14:45		Гужев Д.И.

День	01.10 Пятница			
Начало	ЗАЛ 1		ЗАЛ 2	
10:00	СЗ	Таскаев А.С.	С8	Кудрявцев А.В.
10:30		Гавриленко Д.Е.		Воробьев В.А.
11:00		Шошин А.А.		Мартазов Е.С.
11:30		Рыжков Г.А.		Николаев А.И.
12:00	Кофе брейк			
12:30	СЗ	Карташева А.А.	С8	Джурик А.С.
13:00		Касатов А.А.		Пурыга Е.А.
13:30		Федорович С.Д.		Зубарев П.В.
14:00	Перерыв на обед			
14:30	СЗ	Коньков А.А.	С8	Малютин А.Ю.
15:00		Рогозин К.А.		Образцов И.С.
15:30		Суворова А.А.		Хайрутдинов Э.Н.
16:00		Кириченко А.Н.		

ТЕМАТИКИ КОНФЕРЕНЦИИ

- С 1. Диагностика плазмы ИТЭР**
- С 2. Диагностика плазмы Токамака с Реакторными
Технологиями (TRT)**
- 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. Диагностика плазмы на действующих
термоядерных установках**
- С 8. Системы сбора и обработка экспериментальных
данных, диагностические средства и
метрологическое обеспечение измерений**

ОГЛАВЛЕНИЕ

Диагностика плазмы ИТЭР	28
ДИАГНОСТИКА ПОЛНОГО НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА И ТЕРМОЯДЕРНОЙ МОЩНОСТИ ИТЭР	28
СТАТУС РАЗРАБОТКИ ДИАГНОСТИКИ ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА ИТЭР В 2021 ГОДУ	31
РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» ДЛЯ УСТАНОВКИ ИТЭР	33
ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ (СВЛ) ИТЭР	35
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧИСТКИ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» В УСЛОВИЯХ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПОРТА ИТЭР	37
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА РАБОЧИХ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ ЗЕРКАЛ В ОПТИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИКАХ ИТЭР	41
ПРОГРЕСС В МОДЕЛИРОВАНИИ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИТЭР	44
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР	46
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ В ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ПО СПЕКТРАМ ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ, ИЗМЕРЕННЫМ С ПОМОЩЬЮ HPGe ДЕТЕКТОРА	48
РАБОТЫ В ИЯФ СО РАН ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИТЭР	50

ТЕКУЩИЙ ПРОГРЕСС РАБОТ В ИЯФ СО РАН ПО ИНТЕГРАЦИИ ВЕРХНИХ ПОРТОВ ИТЭР	52
СТАТУС СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР	54
РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ИТЭР	56
ОБ ИЗМЕРЕНИИ ТЕРМОЯДЕРНОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМОЙ МОНИТОРОВ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ТОКАМАКА-РЕАКТОРА ИТЭР	58
ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ КОЛЛИМАТОРОВ НА ИЗМЕРЕНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР	60
РАСЧЁТ ОТКЛИКА АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР	62
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННЫХ НАГРУЗОК В ЭКВАТОРИАЛЬНОМ ПОРТУ №11 ИТЭР	64
Диагностика плазмы Токамака с Реакторными Технологиями (TRT).....	66
КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT)	66
ДИАГНОСТИКА ПРИМЕСЕЙ И ВОДОРОДА В ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЕ TRT.....	68
РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» (CXRS) ДЛЯ УСТАНОВКИ TRT	71
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ПО ПОТОКАМ АТОМОВ ДЛЯ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT).....	73
ДИАГНОСТИКА КРАЕВОЙ И ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЫ СОВМЕЩЕННЫМИ ТОМСОНОВСКИМ РАССЕЯНИЕМ/ЛИФ НА ТОКАМАКЕ TRT	75
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ГАММА- СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БЫСТРЫХ	

ИОНОВ И УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ТОКАМАКЕ TRT	79
ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ТРТ: ТРЕБОВАНИЯ К ДИАГНОСТИКЕ, АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ.....	81
КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИНЖЕКТОРА АТОМОВ ВОДОРОДА ДЛЯ ТРТ	84
ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ПЕРВОЙ СТЕНКИ: КОНТРОЛЬ ЭРОЗИИ И ДИАГНОСТИКА НАКОПЛЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО ТОПЛИВА	86
ТОКАМАК С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT): ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТА ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	90
КОНЦЕПЦИЯ СПЕКТРОМЕТРА С АЛМАЗНЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БЫСТРЫХ АТОМОВ НА ТОКАМАКЕ С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT)	92
ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ TRT	95
Инженерные вопросы диагностики плазмы	97
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ВНК.....	97
ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕМЕНТОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИЯФ СО РАН.....	100
РЕЗУЛЬТАТЫ ВАКУУМНЫХ И АКТИВАЦИОННЫХ ТЕСТОВ КЕРАМИКИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОРТОВ ИТЭР	102
ОСОБЕННОСТИ И ТОЧНОСТЬ ПИРОМЕТРИИ ВОЛЬФРАМА ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЕГО ПОВРЕЖДЕНИЙ МОЩНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ УДАРАМИ	104
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА,	

ВОЗДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ТВЕРДОТЕЛЬНУЮ МИШЕНЬ	106
ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ ТУГОПЛАВКИХ ПОКРЫТИЙ ВО ВРЕМЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ МОЩНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ УДАРОВ.....	109
ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЕННО-ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ДИВЕРТОРА ИТЭР	111
ИСПЫТАНИЯ ЛИТИЕВОЙ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СИСТЕМЫ СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ В УСТАНОВКЕ ПЛМ.....	115
ДИАМАГНИТНАЯ ДИАГНОСТИКА УСТАНОВКИ Т-15МД	119
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА Cu—Cr—Zr	121
ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ АЛМАЗНЫХ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ CVD-СИНТЕЗА И АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ВЫРАЩЕННЫХ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК	122
Спектроскопия плазмы и лазерные методы диагностики	125
ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОННОГО КОМПОНЕНТА ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ ТОМСОНОВКОГО РАССЯНИЯ В УСЛОВИЯХ СТАЦИОНАРНЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ И ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ	125
ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ МАКЕТОВ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В УСТАНОВКЕ ПЛМ	129
ПЕРЕЗАРЯДНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПОТОКА ПЛАЗМЫ В РАСШИРИТЕЛЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКИ	133

РАЗВИТИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ VM1D2V ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРА Н-АЛЬФА НА ХОРДАХ НАБЛЮДЕНИЯ В ОСНОВНОЙ КАМЕРЕ ТОКАМАКА	135
МЕТОД РАСЧЕТА СИГНАЛА ПАССИВНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ ДЛЯ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ТОКАМАКАХ	138
ДИВЕРТОРНОЕ ТОМСОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ ДЛЯ Т-15МД.....	142
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С НАПУСКОМ АЗОТА И ГЕЛИЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2	145
ДИАГНОСТИКА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 – ПРОТОТИП СИСТЕМЫ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА	147
ДИНАМИКА НАВЕДЁННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ	151
Корпускулярные методы диагностики	155
СОЗДАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ СИНТЕТИЧЕСКОЙ НЕЙТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2	155
ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНОЙ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2	157
АНАЛИЗАТОР НЕЙТРАЛОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ДЛЯ ТОКАМАКА ST40.....	160
О СТАТУСЕ ДВОЙНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД.....	163
РАЗРАБОТКА МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА ДЛЯ D-D НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА	167
АНАЛИЗ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА ХЛОРИДА ЛАНТАНА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ.....	169

КОМПАКТНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2.....	171
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЗОНД ДЛЯ КОМПЛЕКСА ИЗМЕРЕНИЙ В ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК С ЦЕЛЬЮ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПЛАЗМА-СТЕНКА	173
ОТКРЫТИЕ ГЕНЕРАЦИИ В ПЛАЗМОФОКУСНОМ РАЗРЯДЕ УЗКОНАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДД- НЕЙТРОНОВ.....	177
РЕГИСТРАЦИЯ ПРОДУКТОВ D-D РЕАКЦИЙ АЛМАЗНЫМ СПЕКТРОМЕТРОМ НА УСТАНОВКЕ ГЕЛИС	179
ИНЖЕКТОР АТОМОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ В С- 2W С БЫСТРОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПУЧКА	182
Микроволновые и субмиллиметровые методы диагностики .186	
СТАТУС РАБОТ ПО СИСТЕМЕ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ СО СТОРОНЫ СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИТЭР.....	186
ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА AD8302 ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗЫ В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ СВЧ- ИНТЕРФЕРОМЕТРА ТОКАМАКА Т-15МД.....	190
МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ СОБСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В МЕСТЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ АНТЕННЫ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ.....	193
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА НА ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В РЕФРАКТОМЕТРИИ ИТЭР	196
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ПРИ НЕМОНОТОННОМ ПРОФИЛЕ ПЛОТНОСТИ МЕТОДАМИ РЕФРАКТОМЕТРИИ И РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В ИТЭР	199

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ДИСПЕРСИОННОГО
ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЛОТНОСТЬЮ
ПЛАЗМЫ В ТОКОМАКЕ ГЛОБУС-М2 201

**Диагностика плазмы на действующих термоядерных
установках..... 204**

КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИК ТОКАМАКА МИФИСТ-0..... 204

ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ПЛМ-М ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ
ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ВНУТРИКАМЕРНЫХ
КОМПОНЕНТ И ДИАГНОСТИКИ ПРИСТЕНОЧНОЙ
ПЛАЗМЫ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА-ТОКАМАКА ... 207

СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В
УСТАНОВКЕ СМОЛА 210

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС УСТАНОВКИ Т-15МД
..... 213

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ
ДИЭЛЕКТРИКОВ В КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТЕКТОРОВ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ
МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 214

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ
ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 С ПОМОЩЬЮ
ЛЕНГМЮРОВСКИХ ЗОНДОВ 218

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЫ И
ПРОБЛЕМА ЭРОЗИИ СТЕНКИ В ТОКАМАКЕ-РЕАКТОРЕ
..... 221

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
УДАЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТЛЕЮЩЕГО
РАЗРЯДА НА ТОКАМАКЕ Т-15МД 225

КВАДРУПОЛЬНАЯ АНТЕННА И ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ
КОМПЛЕКС ИОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА
ПЛАЗМЫ И ГЕНЕРАЦИИ ТОКОВ УВЛЕЧЕНИЯ В
СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М..... 227

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В АЛЬФВЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2	231
МГД-ДИАГНОСТИКА ТОКАМАКОВ Т-11М И Т-15МД....	234
КАЛИБРОВКА ЛОКАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ЗОНДОВ ТОКАМАКА Т-15МД.....	238
Системы сбора и обработка экспериментальных данных, диагностические средства и метрологическое обеспечение измерений.....	241
ЭЛЕМЕНТЫ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УДАЛЕННОГО УЧАСТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ИТЭР.....	241
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПЫТА МОДЕЛИ РОССИЙСКОГО ЦЕНТРА УДАЛЕННОГО УЧАСТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОГРАММЕ ИТЭР	244
КОНЦЕПЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ ЗНАНИЯМИ В ПРОЕКТЕ ИТЭР.....	247
РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ АППАРАТНО-ИНФРАСТРУКТУРНОЙ ПЛАТФОРМЫ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА В ОБЛАСТИ УТС.....	249
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К АППАРАТНО-ИНФРАСТРУКТУРНОЙ ПЛАТФОРМЕ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА В ОБЛАСТИ УТС.....	251
АППАРАТНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ТЕСТОВОЙ ПЛОЩАДКИ ПЛАТФОРМЫ ИКП	253
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ АППАРАТНО-ИНФРАСТРУКТУРНОЙ ПЛАТФОРМЫ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОГО	

ПРОСТРАНСТВА В ОБЛАСТИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РФ	255
ПОДГОТОВКА ПРОЕКТОВ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ В ENTERPRISE ARCHITECT	257
ТРЕБОВАНИЯ К РАЗРАБОТКЕ ЭКРАНОВ ОПЕРАТОРОВ ДЛЯ УСТАНОВКИ ИТЭР И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРОГРАММНОГО ИНСТРУМЕНТА CONTROL SYSTEM STUDIO.....	259
ПОДГОТОВКА К ПРОИЗВОДСТВУ И ПРОВЕДЕНИЕ ЗАВОДСКИХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИТЭР	261
РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ МОДУЛЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА	263
ИНТЕГРАЦИЯ МОДУЛЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА В CODAC CORE SYSTEM.....	265
МАКЕТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СВЕТОВОДА ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ»	267
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КАЛИБРОВКИ ФЛУКТУАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ПРИ МАЛОЙ ЗАГРУЗКЕ	270
ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДУЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ ССД ДМНП	273
ИМИТАТОР СИГНАЛОВ ДЕТЕКТОРНОГО МОДУЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДМНП ИТЭР	275
ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ	277

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНЖЕКЦИИ КАПЕЛЬ ЛИТИЯ С ПОМОЩЬЮ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ НА ТОКАМАКЕ Т-11М.....	280
УСИЛИТЕЛЬНЫЕ ТРАКТЫ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ В ПЛАЗМЕННЫХ ДИАГНОСТИКАХ.....	282
АРХИТЕКТУРА И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КОТ	284
РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСТАНОВКЕ КСПУ...	287
ВАКУУММЕТРИЯ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ УСТАНОВКИ ТОКАМАК Т-15МД.....	290
ДИАГНОСТИКА И ИНДИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАМЫКАНИЙ МЕЖДУ КОНСТРУКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ТОКАМАКА Т-15МД	294

ПОДРОБНАЯ ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

Всероссийская конференция		Понедельник, 27 сентября 2021
09:00-10:00	Регистрация участников конференции	
Зал №1		
10:00	Приветствие: <i>д.ф.-м.н. Красильников А.В.</i> ИТЭР: ЭТАП СБОРКИ И ВЫХОД В РЕЖИМ "УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ" <i>Химченко Л.Н.</i>	
Секция I Диагностика плазмы ИТЭР		
10:30	ДИАГНОСТИКА ПОЛНОГО НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА И ТЕРМОЯДЕРНОЙ МОЩНОСТИ ИТЭР <i>Кацук Ю.А.</i>	
11:00	СТАТУС РАЗРАБОТКИ ДИАГНОСТИКИ ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА ИТЭР В 2021 ГОДУ <i>Немцев Г.Е.</i>	
11:30	РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» ДЛЯ УСТАНОВКИ ИТЭР <i>Тугаринов С. Н.</i>	
12:00	Кофе брейк	
12:30	ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ (СВЛ) ИТЭР <i>Шестаков Е.А.</i>	
13:00	МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧИСТКИ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» В УСЛОВИЯХ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПОРТА ИТЭР <i>Капустин Ю.В.</i>	
13:30	ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА РАБОЧИХ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ ЗЕРКАЛ В ОПТИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИКАХ ИТЭР <i>Капустин Ю.В.</i>	
14:00	Перерыв на обед	
14:30	ПРОГРЕСС В МОДЕЛИРОВАНИИ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИТЭР <i>Серов С.В.</i>	
15:00	ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР <i>Родионов Р.Н.</i>	
15:30	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ В ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ПО СПЕКТРАМ ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ, ИЗМЕРЕННЫМ С ПОМОЩЬЮ HRGe ДЕТЕКТОРА <i>Хилькевич Е.М.</i>	
16:00	РАБОТЫ В ИЯФ СО РАН ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИТЭР <i>Иванцовский М.В.</i>	
16:30	ТЕКУЩИЙ ПРОГРЕСС РАБОТ В ИЯФ СО РАН ПО ИНТЕГРАЦИИ ВЕРХНИХ ПОРТОВ ИТЭР <i>Листопад А.А.</i>	
17:00	СТАТУС СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР <i>Семенов И.Б.</i>	
17:30	РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ИТЭР <i>Наволоцкий А.С.</i>	

Всероссийская конференция		Вторник, 28 сентября 2021
Зал №1		Зал №2
Начало	<i>Секция 2 Диагностика плазмы Токамак с Реакторными Технологими (TRT)</i>	<i>Секция 1 Диагностика плазмы ИТЭР (продолжение)</i>
10:00	ОБЗОР ПРОЕКТА TRT (ТОКАМАК С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ) <i>Коновалов С.В.</i>	ОБ ИЗМЕРЕНИИ ТЕРМОЯДЕРНОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМОЙ МОНИТОРОВ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ТОКАМАКА-РЕАКТОРА ИТЭР <i>Ковалев А.О.</i>
10:30	КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT) <i>Кацук Ю.А.</i>	ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ КОЛЛИМАТОРОВ НА ИЗМЕРЕНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР <i>Кумпилов Д.А.</i>
11:00	ДИАГНОСТИКА ПРИМЕСЕЙ И ВОДОРОДА В ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЕ TRT <i>Вукулов К.Ю.</i>	РАСЧЁТ ОТКЛИКА АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР <i>Ревякин П.А.</i>
11:30	РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» (CXRS) ДЛЯ УСТАНОВКИ ТРТ <i>Тугаринов С.Н.</i>	МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННЫХ НАГРУЗОК В ЭКВАТОРИАЛЬНОМ ПОРТУ №11 ИТЭР <i>Афанасенко Р.С.</i>
12:00	Кофе брейк	
Начало	<i>Секция 2 Диагностика плазмы Токамак с Реакторными Технологими (TRT)</i>	<i>Секция 6 Микроволновые и субмиллиметровые методы диагностики</i>
12:30	ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ПО ПОТОКАМ АТОМОВ ДЛЯ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT) <i>Несеневич В.Г.</i>	СТАТУС РАБОТ ПО СИСТЕМЕ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ СО СТОРОНЫ СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИТЭР <i>Субботин Г.Ф.</i>
13:00	ДИАГНОСТИКА КРАЕВОЙ И ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЫ СОВМЕЩЕННЫМИ ТОМСОНОВСКИМ РАССЕЯНИЕМ/ЛИФ НА ТОКАМАКЕ TRT <i>Мухин Е.Е.</i>	ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА AD8302 ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗЫ В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ТОКАМАКА Т-15МД <i>Дрозд А.С.</i>
13:30	ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БЫСТРЫХ ИОНОВ И УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ТОКАМАКЕ TRT <i>Шевелев А.Е.</i>	МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ СОБСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В МЕСТЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ АНТЕННЫ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ <i>Минашин П.В.</i>

14:00	Перерыв на обед	
14:30	ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ТРТ: ТРЕБОВАНИЯ К ДИАГНОСТИКЕ, АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ <i>Петров В.Г.</i>	ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА НА ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В РЕФРАКТОМЕТРИИ ИТЭР <i>Афонин А.Ю.</i>
15:00	КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИНЖЕКТОРА АТОМОВ ВОДОРОДА ДЛЯ ТРТ <i>Иванов А.А.</i>	ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ПРИ НЕМОНОТОННОМ ПРОФИЛЕ ПЛОТНОСТИ МЕТОДАМИ РЕФРАКТОМЕТРИИ И РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В ИТЭР <i>Афонин К.Ю.</i>
15:30	ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ПЕРВОЙ СТЕНКИ: КОНТРОЛЬ ЭРОЗИИ И ДИАГНОСТИКА НАКОПЛЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО ТОПЛИВА <i>Раздобарин А.Г.</i>	ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ДИСПЕРСИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЛОТНОСТЬЮ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 <i>Иваненко С.В.</i>
16:00	ТОКАМАК С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT): ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТА ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ <i>Портнов Д.В.</i>	
16:30	КОНЦЕПЦИЯ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ УСТАНОВКИ ТРТ <i>Немцев Г.Е.</i>	
17:00	КОНЦЕПЦИЯ СПЕКТРОМЕТРА БЫСТРЫХ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ НА ДИАГНОСТИЧЕСКОМ ПУЧКЕ С АЛМАЗНЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ ДЛЯ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT) <i>Артемьев К.К.</i>	
17:30	ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ТРТ <i>Миронова Е.Ю.</i>	

Всероссийская конференция		Среда, 29 сентября 2021
Зал №1		Зал №2
Начало	Секция 5 Корпускулярные методы диагностики	Секция 7 Диагностика плазмы на действующих термоядерных установках
10:00	СОЗДАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ СИНТЕТИЧЕСКОЙ НЕЙТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 <i>Скрель О.М.</i>	КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИК ТОКАМАКА МИФИСТ-0 <i>Гаспарян Ю.М.</i>
10:30	ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНОЙ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 <i>Бахарев Н.Н.</i>	ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ПЛМ-М ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ВНУТРИКАМЕРНЫХ КОМПОНЕНТ И ДИАГНОСТИКИ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА-ТОКАМАКА <i>Карпов А.В.</i>
11:00	АНАЛИЗАТОР НЕЙТРАЛОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ДЛЯ ТОКАМАКА ST40 <i>Полосаткин С.В.</i>	СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ СМОЛА <i>Устюжанин В.О.</i>
11:30	О СТАТУСЕ ДВОЙНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД <i>Драбинский М.А.</i>	ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС УСТАНОВКИ Т-15МД <i>Сушков А.В.</i>
12:00	Кофе брейк	
Начало	Секция 5 Корпускулярные методы диагностики	Секция 4 Спектроскопия плазмы и лазерные методы диагностики
12:30	РАЗРАБОТКА МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА ДЛЯ D-D НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА <i>Кормилицын Т.М.</i>	ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОННОГО КОМПОНЕНТА ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ ТОМСОНОВКОГО РАССЯНИЯ В УСЛОВИЯХ СТАЦИОНАРНЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ И ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ <i>Курскиев Г.С.</i>
13:00	АНАЛИЗ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА ХЛОРИДА ЛАНТАНА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ <i>Панкратенко А.В.</i>	ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ МАКЕТОВ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В УСТАНОВКЕ ПЛМ <i>Чан Куанг Винь</i>

13:30	КОМПАКТНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 <i>Ильсова М.В.</i>	ПЕРЕЗАРЯДНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПОТОКА ПЛАЗМЫ В РАСШИРИТЕЛЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКИ <i>Лизунов А.А.</i>
14:00	Перерыв на обед	
14:30	МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЗОНД ДЛЯ КОМПЛЕКСА ИЗМЕРЕНИЙ В ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК С ЦЕЛЬЮ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПЛАЗМА-СТЕНКА <i>Беграмбеков Л.Б.</i>	РАЗВИТИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ VM1D2V ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРА Н-АЛЬФА НА ХОРДАХ НАБЛЮДЕНИЯ В ОСНОВНОЙ КАМЕРЕ ТОКАМАКА <i>Хуснутдинов Р.И.</i>
15:00	ОТКРЫТИЕ ГЕНЕРАЦИИ В ПЛАЗМОФОКУСНОМ РАЗРЯДЕ УЗКОНАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДД-НЕЙТРОНОВ <i>Аблесимов В.Е.</i>	МЕТОД РАСЧЕТА СИГНАЛА ПАССИВНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ ДЛЯ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ТОКАМАКАХ <i>Сдвиженский П.А.</i>
15:30	РЕГИСТРАЦИЯ ПРОДУКТОВ D-D РЕАКЦИЙ АЛМАЗНЫМ СПЕКТРОМЕТРОМ НА УСТАНОВКЕ ГЕЛИС <i>Артемьев К.К.</i>	ДИВЕРТОРНОЕ ТОМСОНОВСКОЕ РАССЕЙНИЕ ДЛЯ T-15МД <i>Толпегина Ю.И.</i>
16:00	ИНЖЕКТОР АТОМОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ В С-2W С БЫСТРОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПУЧКА <i>Ступишин Н.В.</i>	ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С НАПУСКОМ АЗОТА И ГЕЛИЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 <i>Тюхменева Е.А.</i>
16:30	СЕМИНАР	ДИАГНОСТИКА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙНИЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 – ПРОТОТИП СИСТЕМЫ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА <i>Жильцов Н.С.</i>
17:00		ДИНАМИКА НАВЕДЁННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ <i>Бондаренко А.В.</i>

<i>Всероссийская конференция</i>		<i>Четверг, 30 сентября 2021</i>	
Зал №1		Зал №2	
<i>Начало</i>	<i>Секция 7 Диагностика плазмы на действующих термоядерных установках (продолжение)</i>	<i>Начало</i>	<i>Секция 8 Системы сбора и обработка экспериментальных данных, диагностические средства и метрологическое обеспечение измерений</i>
<i>10:00</i>	МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ В КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТЕКТОРОВ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ <i>Зайцев В.И.</i>	<i>10:00</i>	ЭЛЕМЕНТЫ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УДАЛЕННОГО УЧАСТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ИТЭР <i>Степанов Д.Н.</i>
<i>10:30</i>	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 С ПОМОЩЬЮ ЛЕНГМЮРОВСКИХ ЗОНДОВ <i>Хромов Н.А.</i>	<i>10:30</i>	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПЫТА МОДЕЛИ РОССИЙСКОГО ЦЕНТРА УДАЛЕННОГО УЧАСТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОГРАММЕ ИТЭР <i>Семенов О.И.</i>
<i>11:00</i>	ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЫ И ПРОБЛЕМА ЭРОЗИИ СТЕНКИ В ТОКАМАКЕ-РЕАКТОРЕ <i>Будаев В.П.</i>	<i>11:00</i>	КОНЦЕПЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ ЗНАНИЯМИ В ПРОЕКТЕ ИТЭР <i>Семенов Е.В.</i>
<i>11:30</i>	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УДАЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НА ТОКАМАКЕ Т-15МД <i>Архипов И.И.</i>	<i>11:30</i>	РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ АППАРАТНО-ИНФРАСТРУКТУРНОЙ ПЛАТФОРМЫ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА В ОБЛАСТИ УТС <i>Портоне С.С.</i>
		<i>11:45</i>	ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К АППАРАТНО-ИНФРАСТРУКТУРНОЙ ПЛАТФОРМЕ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА В ОБЛАСТИ УТС <i>Ежова З.В.</i>

12:00	Кофе брейк		
12:30	КВАДРУПОЛЬНАЯ АНТЕННА И ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ИОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ГЕНЕРАЦИИ ТОКОВ УВЛЕЧЕНИЯ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М <i>Мещеряков А.И.</i>	12:30	АППАРАТНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ТЕСТОВОЙ ПЛОЩАДКИ ПЛАТФОРМЫ ИКП <i>Ларионов А.С.</i>
		12:45	ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ АППАРАТНО-ИНФРАСТРУКТУРНОЙ ПЛАТФОРМЫ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА В ОБЛАСТИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РФ <i>Григорян Л.А.</i>
13:00	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В АЛЬФВЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 <i>Балаченков И.М.</i>	13:00	ПОДГОТОВКА ПРОЕКТОВ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ В ENTERPRISE ARCHITECT <i>Нагорный Н.В.</i>
		13:15	ТРЕБОВАНИЯ К РАЗРАБОТКЕ ЭКРАНОВ ОПЕРАТОРОВ ДЛЯ УСТАНОВКИ ИТЭР И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРОГРАММНОГО ИНСТРУМЕНТА CONTROL SYSTEM STUDIO <i>Звонарева А.А.</i>
13:30	МГД-ДИАГНОСТИКА ТОКАМАКОВ Т-11М И Т-15МД <i>Балашиов А.Ю.</i>	13:30	ПОДГОТОВКА К ПРОИЗВОДСТВУ И ПРОВЕДЕНИЕ ЗАВОДСКИХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИТЭР <i>Мионов А.Ю.</i>
14:00	Перерыв на обед		
14:30	КАЛИБРОВКА ЛОКАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ЗОНДОВ ТОКАМАКА Т-15МД <i>Степин А.В.</i>	14:30	РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ МОДУЛЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА <i>Журавлёв М.К.</i>
		14:45	ИНТЕГРАЦИЯ МОДУЛЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА В CODAS CORE SYSTEM <i>Гужев Д.И.</i>

<i>Всероссийская конференция</i>		<i>Пятница, 1 октября 2021</i>
Зал №1		Зал №2
<i>Начало</i>	<i>Секция 3 Инженерные вопросы диагностики плазмы</i>	<i>Секция 8 Системы сбора и обработка экспериментальных данных, диагностические средства и метрологическое обеспечение измерений (продолжение)</i>
<i>10:00</i>	УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ВНК <i>Таскаев А.С.</i>	МАКЕТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СВЕТОВОДА ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» <i>Кудрявцев А.В.</i>
<i>10:30</i>	ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕМЕНТОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИЯФ СО РАН <i>Гавриленко Д.Е.</i>	ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КАЛИБРОВКИ ФЛУКТУАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ПРИ МАЛОЙ ЗАГРУЗКЕ <i>Воробьев В.А.</i>
<i>11:00</i>	РЕЗУЛЬТАТЫ ВАКУУМНЫХ И АКТИВАЦИОННЫХ ТЕСТОВ КЕРАМИКИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОРТОВ ИТЭР <i>Шошин А.А.</i>	ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДУЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ ССД ДМНП <i>Мартазов Е.С.</i>
<i>11:30</i>	ОСОБЕННОСТИ И ТОЧНОСТЬ ПИРОМЕТРИИ ВОЛЬФРАМА ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЕГО ПОВРЕЖДЕНИЙ МОЩНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ УДАРАМИ <i>Рыжков Г.А.</i>	ИМИТАТОР СИГНАЛОВ ДЕТЕКТОРНОГО МОДУЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДМНП ИТЭР <i>Николаев А.И.</i>
<i>12:00</i>	<i>Кофе брейк</i>	
<i>12:30</i>	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА, ВОЗДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ТВЕРДОТЕЛЬНУЮ МИШЕНЬ <i>Карташева А.А.</i>	ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНЖЕКЦИИ КАПЕЛЬ ЛИТИЯ С ПОМОЩЬЮ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ НА ТОКАМАКЕ Т-11М <i>Джурик А.С.</i>
<i>13:00</i>	ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ ТУГОПЛАВКИХ ПОКРЫТИЙ ВО ВРЕМЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ МОЩНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ УДАРОВ <i>Касатов А.А.</i>	УСИЛИТЕЛЬНЫЕ ТРАКТЫ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ В ПЛАЗМЕННЫХ ДИАГНОСТИКАХ <i>Пурыга Е.А.</i>

13:30	ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЕННО-ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ДИВЕРТОРА ИТЭР <i>Федорович С.Д.</i>	АРХИТЕКТУРА И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КОТ <i>Зубарев П.В.</i>
14:00	Перерыв на обед	
14:30	ИСПЫТАНИЯ ЛИТИЕВОЙ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СИСТЕМЫ СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ В УСТАНОВКЕ ПЛМ <i>Коньков А.А.</i>	РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСТАНОВКЕ КСПУ <i>Малютин А.Ю.</i>
15:00	ДИАМАГНИТНАЯ ДИАГНОСТИКА УСТАНОВКИ Т-15МД <i>Рогозин К.А.</i>	ВАКУУММЕТРИЯ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ УСТАНОВКИ ТОКАМАК Т-15МД <i>Образцов И.С.</i>
15:30	ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА Cu—Cr—Zr <i>Суворова А.А.</i>	ДИАГНОСТИКА И ИНДИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАМЫКАНИЙ МЕЖДУ КОНСТРУКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ТОКАМАКА Т-15МД <i>Хайрутдинов Э.Н.</i>
16:00	ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ АЛМАЗНЫХ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ CVD-СИНТЕЗА И АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ВЫРАЩЕННЫХ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК <i>Кириченко А.Н.</i>	

ДИАГНОСТИКА ПОЛНОГО НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА И ТЕРМОЯДЕРНОЙ МОЩНОСТИ ИТЭР

Обудовский С.Ю.^{1,4}, Кормилицын Т.М.^{1,4}, Ковалев А.О.^{1,4},
Родионов Р.Н.^{1,4}, Портнов Д.В.^{1,4}, Нагорный Н.В.¹, Миронова
Е.Ю.¹, Воробьев В.А.^{1,4}, Кащук Ю.А.^{1,4}, Красильников А.В.¹,
Гавриленко Д.Е.², Иванцевский М.В.², Бурдаков А.В.²,
Мартазов Е.С.³, Селяев Н.А.³, Федоров В.А.³

¹ Частное учреждение «ИТЭР-Центр», г. Москва, Россия

² ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³ НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

⁴ АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия

В работе представлен обзор текущего состояния разработки нейтронной диагностики ИТЭР «Диверторный монитор нейтронного потока» (ДМНП). Предложенная российскими учеными концепция измерения полного нейтронного выхода и термоядерной мощности ИТЭР [1] предусматривает измерение параметров термоядерной плазмы в широком динамическом диапазоне с требуемыми временным разрешением и погрешностью измерений. Отличительной особенностью ДМНП является возможность абсолютной калибровки с помощью нейтронного генератора, перемещаемого внутри вакуумной камер ИТЭР (in-situ).

В докладе представлено обоснование принятого технического решения и описание устройства детекторных узлов, используемых для регистрации полного нейтронного выхода. Обсуждаются результаты проведенного инженерного анализа, включающего расчеты нейтронного транспорта и активации конструкционных материалов, радиационный разогрев и тепловой анализ различных режимов работы внутрикамерных элементов диагностики, электромагнитные расчеты и анализ структурной целостности.

Также в докладе рассмотрены системы сбора и обработки данных диагностики ДМНП. Обсуждается архитектура системы сбора данных, техническая реализация, используемые алгоритмы при обработке «сырых» данных, результаты испытаний [2,3].

Отдельное внимание уделено подходу к абсолютной калибровке диагностики ДМНП. Рассмотрена стратегия абсолютной калибровки нейтронных диагностик ИТЭР и роль ДМНП в этом процессе [4,5].

Разработанная в РФ нейтронная диагностика измерения полного нейтронного выхода и термоядерной мощности, а также разработанные и апробированные методики испытаний и калибровки детекторов и измерительных систем предназначены для использования на токамаке-реакторе ИТЭР. Однако, данные системы нейтронной диагностики могут быть адаптированы для работы на других современных термоядерных установках меньшего размера, на которых ожидается значительный нейтронный выход.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» в рамках Государственного контракта № Н.4а.241.19.21.1038 от 11 мая 2021 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

Представленные материалы отражают мнение авторов и могут не совпадать с позицией Международной организации ИТЭР.

Литература

- [1]. Yu. A. Kashchuk et al. “A conceptual project for a divertor monitor of the neutron yield in the ITER”, Instruments and Experimental Techniques, vol.49, pages 179–186 (2006)
- [2]. V.A. Fedorov et al «Data acquisition system for ITER neutron diagnostic «Divertor neutron flux monitor», IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018 Vol. 65, No. 9, pp. 2392-2397.
- [3]. 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.
- [4]. А.А. Борисов и др. «КАЛИБРОВКА НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ ИТЭР» — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 3, с. 31-48, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 4, с. 79-95, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 2, с.44-57, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 4 с.55-67.
- [5]. T. Nishitani et al. «Neutronics Assessment of a Compact D-D Neutron Generator as a Neutron Source for the Neutron Calibration in Magnetic Confinement Fusion Devices», Plasma and Fusion Research, Vol. 15, 2402017 (2020)

СТАТУС РАЗРАБОТКИ ДИАГНОСТИКИ ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА ИТЭР В 2021 ГОДУ

Немцев Г.Е., Родионов Р.Н., Хафизов Р.Р., Кумпилов Д.А.,
Нагорный Н.В., Журавлев М.К., Мещанинов С.А., Голачев В.М.,
Степанов С.Б.

Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
G.Nemtsev@iterrf.ru

В работе приведен обзор диагностической системы токамака ИТЭР Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК). ВНК - система, предназначенная для измерения профиля нейтронного источника в полоидальном сечении плазмы в реальном времени, а также профиля ионной температуры и топливного отношения [1]. В настоящий момент ведется разработка финального проекта диагностики. Основными компонентами диагностики являются детекторные модули – сборки, состоящие из нейтронных коллиматоров, детекторов, кабелей и труб охлаждения. Детекторные модули интегрируются в порт-плаг верхнего 18 порта и диагностический рэк нижнего 14 порта. В качестве нейтронных детекторов ВНК используются полупроводниковые алмазные детекторы и ионизационные камеры деления с радиатором на основе ^{238}U .

В докладе описывается перечень задач, решенных при разработке диагностической системы в ходе выполнения соответствующих НИОКР по ВНК: разработка, изготовление и испытания алмазных детекторов; разработка, изготовление и испытания блоков детектирования быстрых нейтронов – детекторных сборок, состоящих из двух алмазных детекторов и двух ионизационных камер деления; разработка конструкции детекторных модулей, сервисных коммуникаций и каналов коллиматоров и их интеграция в порты токамака ИТЭР;

испытания линий связи ВНК; разработка электроники предварительного усиления и оптической гальванической развязки; разработка блока обработки сигналов в реальном времени; создание алгоритмов восстановления профиля нейтронного источника и профиля ионной температуры на основе показаний детекторов ВНК. В рамках подготовки к защите финального проекта были изготовлены макеты основных элементов диагностики.

По результатам выполненных работ можно заключить, что диагностическая система ВНК обеспечит измерение профилей нейтронного источника и ионной температуры в условиях ИТЭР с требуемой по проекту погрешностью.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.21.1038 от 11 мая 2021 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

Литература

- [1].L. Bertalot, et.al. Concept design and integration aspects of ITER vertical neutron camera. Vol. 2015-Janua, 2015, pp. 1-9.

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» ДЛЯ УСТАНОВКИ ИТЭР

Тугаринов С.Н., Кузьмин Н.В., Науменко Н.Н.¹, Серов В.В.,
Серов С.В., Ярцев В.П.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
support@iterrf.ru*

¹ЗАО «СОЛАР», Минск, Республика Белоруссия

ИТЭР (ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor) – первый в мире экспериментальный термоядерный реактор, строительство которого сейчас ведется на площадке г.Кадараш, во Франции. Целью данного международного проекта является, демонстрация научной и технологической возможности реализации самоподдерживающейся стационарной термоядерной D-T реакции, и получения положительного энергетического выхода в результате термоядерной реакции.

Одной из спектроскопических диагностик, создаваемых для ИТЭР, является Активная спектроскопия. Активная спектроскопия (английское название – Charge Exchange Recombination Spectroscopy или CXRS), использует инъекцию диагностического пучка атомов водорода, которое порождает излучение водородоподобный ионов плазмы, возникающих в результате перезарядки на атомах пучка [1]. Анализ спектральных профилей излучения линий водородоподобный ионов легких примесей, позволяет измерять важнейшие параметры плазмы, такие как, ионная температура, скорость вращения и концентрация легких примесей (в том числе гелиевой золы), по всему сечению плазменного шнура с высоким пространственным и временным разрешением [2,3].

В докладе представлено описание состояния и уровня разработки диагностической системы Активная спектроскопия

(АС) на стадии перехода к подготовке защиты Финальных проектов диагностики (FDR – Final Design Review). В докладе представлено описание состояния разработки диагностической системы Активная спектроскопия на данном этапе, в целом, а также результаты разработок и испытаний отдельных подсистем диагностики АС. В частности, в докладе представлены результаты разработки узла первого зеркала, включающего, систему очистки и защитную шторку с вакуумным вводом. В докладе представлен новый дизайн трехканального спектрометра-полихроматора высокого разрешения с системой регистрации на основе двумерных камер sCMOS от фирмы XIMEA, а также результаты предварительных испытаний нового спектрометра-полихроматора.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 11.05.2021 № Н.4а.241.19.21.1038 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

Литература

- [1]. R. C. Isler, Plasma Phys. Controlled Fusion 36, 171 (1994).
- [2]. С.Н.Тугаринов, И.Л.Бейгман, Л.А.Вайнштейн, В.Н.Докука, А.В.Красильников, Н.Н.Науменко, И.Ю.Голстихина, Р.Р.Хайрутдинов, «Физика Плазмы», 2004, том 30, № 2, с. 147 – 154.
- [3]. С.В. Серов, С.Н. Тугаринов, M. von Hellermann, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез 41, 2, 89 (2018).

ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ (СВЛ) ИТЭР

Шестаков Е.А.¹, Алексеев А.Г.², Асадулин Г.М.², Вуколов Д.К.²,
Горшков А.В.², Драпико Е.А.², Капустин Ю.В.², Качкин А.Г.²,
Морозов А.А.², Орловский И.И.², Рогов А.В.²

*¹Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" "Проектный центр ИТЭР", Москва, РФ,
E.Shestakov@iterrf.ru*

²Автономная некоммерческая организация Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез – международные проекты», Москва, РФ

Одной из систем, поставляемых Российской Федерацией в качестве натурального взноса в поддержку международного проекта ИТЭР, является диагностическая система Спектроскопия водородных линий (СВЛ).

Физический пуск реактора ИТЭР намечен на 2025 г. В настоящее время проект ИТЭР находится на фазе активного оснащения и оборудования компонентами вакуумной камеры, прокладки коммуникаций, размещения запертых элементов различных диагностических и служебных систем.

Согласно последней версии ITER Research Plan (24QSG6), вывод токамака на проектный режим с дейтерий-тритиевой смесью будет производиться в несколько стадий: First plasma (FP), Pre-Fusion Operation (PFPO), Fusion Power Operation (FPO). При этом согласно System Requirements Document (28B39L) СВЛ необходима для работы установки уже на стадии FP.

СВЛ является одной из основных диагностических систем ИТЭР, которая позволяет измерять следующие параметры

плазмы: поступление примесей (бериллий, углерод, вольфрам, кислород, медь, неон, аргон, криптон) в плазму, интенсивность пристеночных мод (ELM), переход в моду с улучшенным удержанием (L-H transition), содержание дейтерия и трития в пристеночной области, поступление дейтерия и трития со стенки и пр.

Измеряемые СВЛ параметры плазмы нужны не только для исследовательских целей, многие из них задействованы в цепях обратной связи для управления плазменным шнуром и защиты установки. Именно поэтому СВЛ должна быть оборудована на токамаке уже к моменту физического пуска к стадии FP.

В настоящий момент разработка системы в конфигурации к первой плазме находится на финальной стадии, проходят защиты проектов отдельных частей системы (внутрикамерной части и системы управления).

В данном докладе представлен текущий прогресс по разработке диагностики СВЛ, в том числе с учетом требований ИТЭР к параметрам системы к первой плазме, прописанным в меморандуме (462ENA). Рассмотрены основные компоненты СВЛ: внутривакуумные компоненты, система управления, вневакуумные компоненты. Представлен график работ по поставке диагностики.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧИСТКИ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» В УСЛОВИЯХ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПОРТА ИТЭР

Капустин Ю.В.^{1,2}, Рогов А.В.^{1,2}

¹Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182, г. Москва,
Россия, пл. Академика Курчатова д. 1, стр. 3,
alex-rogov@yandex.ru

²НИЦ «Курчатowski институт», 123182, г. Москва, Россия,
пл. Академика Курчатова д. 1, Kapustin_YV@nrcki.ru

Важной особенностью внутривакуумных компонентов систем оптической диагностики плазмы установки ИТЭР является близкое расположение элементов оптического тракта (зеркал) и стенок диагностического порта. Это приводит к необходимости учёта переосаждения материала, миграция которого может быть вызвана распылением поверхности высокоэнергетическими нейтралами перезарядки в процессе рабочих импульсов установки или воздействием ионов, эмитированных из плазмы чистящего разряда [1, 2].

Схема размещения узла входного зеркала диагностики «Активная спектроскопия» в экваториальном порту №3 ИТЭР показана на рис. 1.

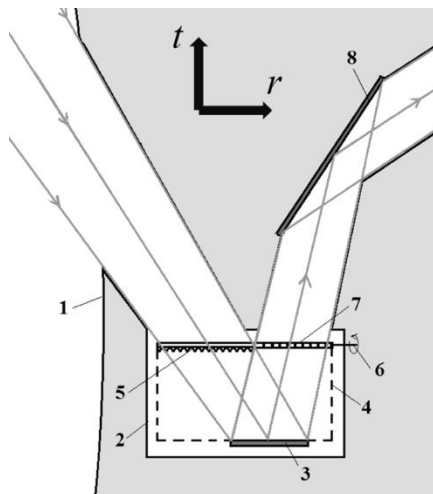


Рис. 1. Схема размещения узла входного зеркала диагностики “Активная спектроскопия” в диагностическом порту ИТЭР. 1 – первая стенка; 2 – стенка диагностического порта; 3 – входное зеркало; 4 – сеточный полый катод коробчатой формы; 5 – калибровочный уголковый отражатель; 6 – ось вращения шторки; 7 – защитная поворотная шторка с сеточным окном для прохода оптического излучения при калибровке (складывается внутрь полого катода при открывании); 8 – второе зеркало.

В работе представлены результаты экспериментальной проверки возможности повышения эффективности функционирования DC/PDC-системы очистки входного зеркала диагностики “Активная спектроскопия” путем уменьшения распыления стенок диагностического порта посредством торможения ионов, вышедших через сеточный катодный электрод за пределы разрядной ячейки. Эксперименты проводились на полноразмерном функциональном макете системы очистки при трех вариантах заземления электродов разрядной ячейки, обеспечивших разную степень торможения ионов.

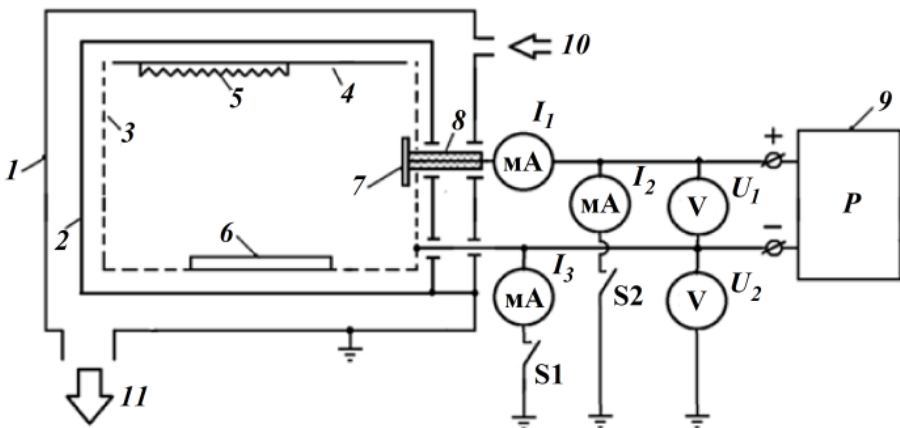


Рис. 2. Схема экспериментального оборудования: 1 – стенки вакуумной камеры, 2 – вакуумный газодинамический обтекатель, 3 – сеточный катодный электрод разрядной ячейки, 4 – макет поворотной защитной шторки, 5 – макет уголкового рефлектора, 6 – макет входного зеркала, 7 – анод, 8 – изолятор, 9 – источник питания, 10 – линия напуска газа, 11 – вакуумная откачка; I_1 – ток анода, I_2 – ток через линию заземления анода, I_3 – ток через линию заземления полого катода, U_1 – разрядное напряжение, U_2 – потенциал автосмещения

Показано, что для подавления распыления стенок диагностического порта и повышения эффективности и равномерности удаления загрязнений в системе плазменной очистки первого зеркала оптической диагностики «Активная спектроскопия» наилучшей является конфигурация с заземлённым анодом. Близкие значения по скорости очистки при несколько худшей однородности получены для изолированной разрядной ячейки. Система очистки с заземлёнными катодными элементами может быть использована только при пониженных давлениях рабочего газа (< 1 Па).

Литература

- [1]. Рогов А.В., Капустин Ю.В.; Приборы и техника эксперимента; 2021; №3; С. 60-67.

- [2]. Shigin P., Babinov N., De Temmerman G., Danisi A., Dmitriev A., Larsen J., Madsen R., Marot L., Moser L., Mukhin E., Kochergin M., Ortiz R., Razdobarin A., Reichle R., Pitts R., Samsonov D., Tsalas M., Udintsev V., Vayakis G., Walsh M.; Fusion engineering and design; 2021; V. 164; 112162.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА РАБОЧИХ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ ЗЕРКАЛ В ОПТИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИКАХ ИТЭР

Капустин Ю.В.^{1,2}, Рогов А.В.^{1,2}

¹Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182, г. Москва, Россия, пл. Академика Курчатова д. 1, стр. 3, alex-rogov@yandex.ru

²НИЦ «Курчатовский институт», 123182, г. Москва, Россия, пл. Академика Курчатова д. 1, Kapustin_YV@nrcki.ru

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 техник: подачи кратковременного импульса высокого напряжения или др.

С точки зрения расширения диапазона рабочих режимов эксплуатации системы очистки зеркал, рассмотрена возможность использования термокатода для эмиссии в разрядный промежуток электронов. Применение данного устройства позволяет решить две проблемы: во-первых, за счёт перехода к режиму несамостоятельного разряда устраняется проблема

высокого давления зажигания чистящего разряда; во-вторых, появляется возможность независимого регулирования тока разряда и энергии ионов, бомбардирующих поверхность зеркала. Последнее позволяет использовать режим тонкой очистки поверхности, когда энергия ионов < 100 эВ, что обеспечивает удаление легкораспыляемых загрязнений (Ве) без радиационного повреждения отражающей поверхности.

В работе также рассмотрена возможность улучшения эксплуатационных характеристик DC/PDC системы очистки зеркал за счёт подачи рабочего газа непосредственно в область разряда. Показано, что за счёт повышения локального давления в данной области очистка может проводиться при давлении на 20-30% меньшем, чем в случае напуска газа через удалённый накататель.

Представлены результаты измерения при помощи многосеточного анализатора зависимости энергетического спектра ионов, распыляющих поверхность зеркала, от параметров разряда: мощности, подаваемой на термоэмиссионный катод, напряжения разряда, давления и типа рабочего газа, способа газонапуска.

На основании проведённых работ сделан вывод о целесообразности включения в конструкцию системы очистки дополнительного источника ионизации. В качестве него может выступить как указанный выше термокатод, так и β -активный компонент. Также отмечается, что при переходе ко 2 и 3 фазе эксплуатации установки ИТЭР, когда ожидается появление достаточно большого числа термоядерных нейтронов, облучение конструкционных материалов установки приведёт к возникновению наведённой радиоактивности [3], что положительно скажется на условиях эксплуатации систем плазменной очистки диагностических зеркал.

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]. Sandri S., Contessa G.M., D'Arienzo M., Guardati M., Guarracino M., Poggi C., Villari R.; Environments; 2020; V. 7; Is. 1; 7010006.

ПРОГРЕСС В МОДЕЛИРОВАНИИ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИТЭР

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

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
support@iterrf.ru*

Активная спектроскопическая диагностика, называемая в англоязычной литературе Charge eXchange Recombination Spectroscopy (CXRS), позволяет измерять важнейшие параметры ионов горячей термоядерной плазмы: радиальный профиль температуры, концентрации ионов легких примесей и скорости вращения плазмы [1, 2]. Эти плазменные параметры вычисляются по так называемой «активной» спектральной линии водородоподобных ионов, высвечивающейся при прохождении высокоэнергетического пучка атомов через плазму. Однако выделение этой линии может быть затруднено из-за сильной зашумленности спектров, а также из-за наличия других спектральных линий, усложняющих картину. Поэтому моделирование является неотъемлемой частью создания диагностической системы «Активная спектроскопия» для ИТЭР [3].

В данной работе представлены последние результаты моделирования работы диагностической системы CXRS Edge на установке ИТЭР. С использованием кода Simulation of Spectra [4] была проведена оценка статистических ошибок измерения параметров плазмы по линиям рабочего газа (D, T) и примесей (He, Be, C и Ne) [5]. Кроме того, приведены результаты оценки ошибок, вносимых эффектом гало в измерение параметров плазмы. Моделирование работы диагностики также проводилось с использованием алгоритма трассировки лучей, реализованном в

коде CHERAB [6]. Эта методика позволила оценить влияние излучения, отраженного от металлических стенок вакуумной камеры ИТЭР, на проведение измерений. Сравнение результатов, полученных разными методами, позволило судить о надежности использования разных моделей.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 11.05.2021 № Н.4а.241.19.21.1038 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 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]. С.В. Серов, С.Н. Тугаринов, М. von Hellermann, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез 41, 2, 89 (2018).
- [4]. М. von Hellermann et al., Atoms 7, 30 (2019).
- [5]. S. V. Serov et al., Rev. of Sci. Instrum. 92, 053517 (2021).
- [6]. M. Carr, A. Meakins, M. Tomes, CHERAB Spectroscopy Modelling Framework, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3551871>

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР

Родионов Р.Н., Кумпилов Д.А., Немцев Г.Е.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
R.Rodionov@iterrf.ru*

Вертикальная Нейтронная Камера ИТЭР (ВНК) – нейтронная диагностическая система, предназначенная для измерения профиля нейтронного источника в полоидальном сечении плазмы, а также профиля ионной температуры и топливного отношения [1]. ВНК состоит из двух подсистем – Верхней ВНК, расположенной в верхнем диагностическом порту №18, и Нижней ВНК, расположенной в нижнем диагностическом порту №14. Верхняя ВНК содержит 6 коллиматоров, нижняя – 5. В конце каждого коллиматора расположен блок детектирования, включающий по две камеры деления с радиатором из ^{238}U и два алмазных детектора разных чувствительностей.

Восстановление профиля ионной температуры основывается на измерении нейтронных спектров в коллиматорах алмазными детекторами. Предполагается, что ионная температура и нейтронный выход постоянны вдоль магнитных поверхностей. Нейтронный спектр в коллиматоре будет зависеть как от профиля ионной температуры, так и от профиля интенсивности нейтронного источника, восстановление которого было представлено в работе [2].

В данной работе предложен алгоритм восстановления профиля ионной температуры в сценариях горения дейтерий-тритиевой плазмы по измерениям алмазных детекторов. Проведен анализ устойчивости восстановления ионной температуры к погрешностям входных данных: амплитудные

спектры алмазных детекторов, профиль нейтронного источника и форма магнитных поверхностей.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.21.1038 от 11 мая 2021 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

Литература

- [1]. L. Bertalot, et.al. Concept design and integration aspects of ITER vertical neutron camera. Vol. 2015-Janua, 2015, pp. 1-9.
- [2]. Родионов Р.Н., Кумпилов Д.А., Немцев Г.Е. Восстановление профиля источника DD и DT нейтронов по измерениям Вертикальной Нейтронной Камеры ИТЭР. Тезисы XLVIII Международной конференции по физике плазмы и УТС, 15 – 19 марта 2021 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ В ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ПО СПЕКТРАМ ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ, ИЗМЕРЕННЫМ С ПОМОЩЬЮ HPGe ДЕТЕКТОРА

Е.М. Хилькевич, М.В. Ильясова, А.Е. Шевелев, Д.Н. Дойников,
И.А. Полуновский, В.О. Найденов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук, Россия, 194021, С.-Петербург,
evgeniy-hila@yandex.ru*

В настоящее время в ФТИ им. А.Ф. Иоффе разрабатываются методы, позволяющие получать энергетические и угловые распределения быстрых частиц, основываясь на анализе данных, поставляемых гамма-спектрометрами. Разработанные методы будут в последствии применены при обработке экспериментальных данных, полученных на токамаке ИТЭР. Одним из детекторов гамма-спектрометра в составе системы анализаторов атомов перезарядки, поставляемой на ИТЭР, будет HPGe детектор высокого разрешения (High-Purity Germanium detector). Этот детектор позволяет измерять спектр гамма излучения с разрешением 2.1 кэВ на линии 1332.5 кэВ источника Co-60, что дает возможность измерять интенсивность отдельных линий гамма излучения из ядерных реакций с высокой точностью, а также анализировать форму гамма линий, уширенных за счет эффекта Доплера. Детектор с аналогичными параметрами в настоящий момент используется в составе гамма-спектрометрического комплекса на токамаке JET. В экспериментах с D-³He плазмой на JET ионы дейтерия инжектировались в плазму и ускорялись входе ион-циклотронного нагрева до энергий МэВ-диапазона. По гамма излучению из реакций ⁹Be(D,pγ)¹⁰Be и ⁹Be(D,nγ)¹⁰B было

получено угловое и энергетическое распределение быстрых ионов D в плазме на основе соотношений интенсивностей гамма-переходов, а так же по форме линий гамма излучения.

Особый интерес вызывают распределения альфа-частиц, рожденных в реакциях термоядерного синтеза и удерживаемых в плазме токамака. В ходе экспериментальной кампании на токамаке JET изучались распределения альфа-частиц в D³-He плазме, рожденных в ходе реакции ${}^3\text{He}(\text{D},\text{p}){}^4\text{He}$. Из анализа формы линии 4.44 МэВ гамма излучения из реакций ${}^9\text{Be}(\alpha,\text{n}\gamma){}^{12}\text{C}$ были получены энергетическое и угловое распределение быстрых альфа-частиц. В работе рассматриваются методы восстановления энергетических и угловых распределений быстрых ионов D и ${}^4\text{He}$, приводятся примеры полученных распределений.

РАБОТЫ В ИЯФ СО РАН ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИТЭР

А.В. Бурдаков^{1,3}, Г.Е. Гавриленко¹, М.В. Грехова¹, Н.А. Золотухна¹, М.В. Иванцовский¹, В.М. Константинов¹, Д.Э. Кравцов², А.А. Листопад¹, Ю.А. Манаенкова¹, П.А.Селезнев¹, В.В. Серемин¹, Ю.С. Суляев^{1,4}, А.С. Таскаев¹, Е.В. Шабунин¹, С.Р. Шарафеева¹, С.В. Шиянков¹, А.А. Шошин^{1,4}

¹*Институт Ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, РФ, e-mail: M.V.Ivantsivsky@inp.nsk.su*

²*Частное учреждение ГК «РосАтом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, РФ, e-mail: D.Kravtsov@iterrf.ru*

³*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, РФ, e-mail: A.V.burdakov@inp.nsk.su*

⁴*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, РФ, e-mail: A.A.shoshin@inp.nsk.su*

Институт ядерной физики Сибирского отделения РАН участвует в работах, связанных с проектом ИТЭР, с 2013 года. Первой из них была разработка и интеграция диагностического экваториального порта №11. В 2021 году число работ по проектированию и изготовлению диагностического оборудования достигло семи. В настоящее время в ИЯФ СО РАН ведет разработку по следующим направлениям:

- проектирование и интеграция диагностического экваториального порта №11;
- проектирование и интеграция диагностического верхнего порта №02;

- проектирование и интеграция диагностического верхнего порта №07;
- проектирование и интеграция диагностического верхнего порта №08;
- изготовление модуля ДМНП (диверторный монитор нейтронного потока);
- проектирование и интеграция защиты верхней и нижней ВНК (вертикальная нейтронная камера);
- разработка и изготовление внутривыводных компонентов диагностической системы анализаторы атомов перезарядки.

Все работы ведутся параллельно и находятся на разных стадиях проекта, от предварительного проекта (ВНК) до получения разрешения на начало изготовления (ЭП11).

В докладе представлен общий обзор по всем направлениям работ, ведущимся в рамках проекта ИТЭР в ИЯФ СО РАН.

ТЕКУЩИЙ ПРОГРЕСС РАБОТ В ИЯФ СО РАН ПО ИНТЕГРАЦИИ ВЕРХНИХ ПОРТОВ ИТЭР

Е.В. Баянов⁵, А.В. Бурдаков^{1,5}, И.В. Буслаков³, Ю.Г. Высоких², Д.Е. Гавриленко¹, М.В. Иванцовский¹, Д.Э. Кравцов², [А.А. Листопад](mailto:a.a.listopad@inp.nsk.su)¹, И.Н. Логинов³, В.С. Модестов³, Д.В. Портнов², Р.Н. Родионов², П.А.Селезнев¹, В.В. Серемин¹, Н.В. Сорокина², Ю.С. Суляев¹, А.С. Таскаев¹, Е.В. Шабунин¹, О.Б. Шагниев³, С.В. Шиянков¹, А.А. Шошин^{1,4}

¹Институт Ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, РФ, e-mail: a.a.listopad@inp.nsk.su

²Частное учреждение ГК «РосАтом» «Проектный центр
ИТЭР», Москва, РФ, e-mail: d.kravtsov@iterrf.ru

³ Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет, Санкт-Петербург, РФ, e-mail:
vmodestov@spbstu.ru

⁴Новосибирский государственный университет, Новосибирск,
РФ, e-mail: a.a.shoshin@inp.nsk.su

⁵Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, РФ, e-mail: a.v.burdakov@inp.nsk.su

Целью работы является разработка финальных проектов устройств для размещения диагностического и вспомогательного оборудования в верхних портах № 02, № 07 и № 08 токамака ИТЭР.

В ходе прошедшего периода был выполнен очередной этап проектирования верхних портов. В частности, доработаны трехмерные модели порт-плаггов верхних портов № 02, № 07 и № 08, опорных рам в околопортовом пространстве и в порт-камерах верхних портов № 02 и № 08 до уровня финального проекта. Внесены конструктивные изменения в соответствии с новыми

моделями размещаемого оборудования, а также текущей версией базового дизайна ИТЭР.

На каждом этапе проектирования работоспособность разрабатываемых конструкций была подтверждена серией инженерных расчетов по моделированию радиационных, теплогидравлических, электромагнитных, сейсмических и механических нагрузок. Подготовлены документы к проведению защит финальных проектов верхних портов № 02, № 07 и № 08 в МО ИТЭР.

Очередной этап нейтронных расчетов был посвящен оценке активации конструктивных элементов верхних портов 02 и 08 на стадии их утилизации. Для данной задачи были подготовлены расчетные модели, где каждому элементу были присвоены свойства соответствующих материалов. Был произведен расчет активации, соответствующий полноценному сценарию работы установки в течении 20 лет, включая дейтерий-трибиевый режим в течении последних 12 лет.

В рамках выполнения проектов интеграции в верхних портах была изготовлена новая версия макета патрубка газового/водяного ввода с использованием специально разработанного автоматического сварочного оборудования, способного работать в затесненных условиях на реальной гермоплите порт-плага.

Дан краткий обзор дооборудования и процесса ввода в эксплуатацию сборочного помещения с обеспечением специальных условий чистоты согласно правилам RCC-MR 2007. В частности, для крупногабаритных изделий верхних портов ИТЭР изготовлено четыре кантователя: это технологическое оборудование для сборки и тестирования порт-плага верхнего порта на интеграционной площадке.

СТАТУС СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР

Семенов И.Б., Голачев В.М., Ларионов А.С., Лазарева С.Г.,
Миронова Е.Ю., Миронов А.Ю., Нагорный Н.В., Портоне С.С.,
Семенов О.И., Звонарева А.А., Устинов А.Л.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
I.Semenov@iterrf.ru*

Система управления установкой ИТЭР - CODAC (Control, Data Acquisition and Communication) разделена два уровня управления - на центральный супервайзер, за создание которого отвечает Международная Организация ИТЭР, и нижний локальный уровень управления, за который отвечают Национальные Агентства. Супервайзер включает в себя центральное ядро системы управления (CODAC Core System), систему ядерной безопасности, систему блокировок и защит, систему управления плазмой и центральное вычислительное ядро, обеспечивающее работу установки в реальном времени. На нижнем уровне находятся более 130 технологических и диагностических подсистем установки. CODAC использует SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) EPICS, построенной на идеологии сервер-клиент и в настоящее время базирующейся на компьютерных сетях с пропускной способностью 10-40 Гбит/сек.

В докладе дан обзор состояния дел на август 2021 года по системе управления верхнего уровня, а также по системам управления технологических и диагностических систем за которые отвечает Российское Национальное Агентство ИТЭР (Divertor Neutron Flux Monitors, Divertor Thomson Scattering, Neutral Particle Analyzer, CXRS based on DNB (edge), Vertical Neutron Camera, High Field Side Reflectometry, Port Plug Test Facility, EC RF Gyrotrons). Состояние дел по данным системам

подробно рассмотрено в докладах авторов, непосредственно отвечающих за эти направления. Также рассмотрены проблемы, которые решались по мере создания систем управления в 2021 году. В частности, вопросы, связанные с проектированием и последующей интеграцией технологических и диагностических систем в центральную систему управления на стадиях приемосдаточных испытаний на предприятиях изготовителях, на площадке ИТЭР, во время запуска установки и работа во время получения первой плазмы, а также проблемы электромагнитной и радиационной совместимости. Отдельно рассмотрены вопросы интеграции, сбора данных и управления диагностическими комплексами установки в режиме удаленного доступа в рамках созданной в Проектном центре ИТЭР «Модели Центра Удаленного Участия» (Model of Remote Participation Center).

Доклад представляет интерес для физиков и инженеров, работающих в области управляемого термоядерного синтеза.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 11.05.2021 № Н.4а.241.19.21.1038 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ИТЭР

В.И. Афанасьев¹, А.Д. Мельник¹, М.И. Миронов¹, А.С. Наволоцкий¹, В.Г. Несеневич¹, М.П. Петров¹, С.Я. Петров¹, Ф.В. Чернышев¹, И.В. Александров², И.С. Кияев², Г.В. Маринин², С.М. Пашковский², Д.В. Терентьев², А.В. Яценко², А.В. Белов³, А.Н. Лабусов³, В.Н. Танчук³, А.А. Хитрук³, А.Н. Мокеев⁴

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, post@mail.ioffe.ru

²ООО «РУССКИЕ ТЕХНОЛОГИИ», 195279, Россия, Санкт-Петербург, Индустриальный пр., д. 44, пом. 409а, rtechster@gmail.com

³АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», 196641, Россия, Санкт-Петербург, дор. на Металлострой, д. 3, mail@niiefa.spb.su

⁴Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182, Россия, Москва, площадь ак. Курчатова 1, строение 3, support@iterrf.ru

Объектом исследования диагностической системы атомных анализаторов на ИТЭР являются испускаемые плазмой потоки нейтральных атомов дейтерия и трития. Измерение и анализ энергетических спектров этих атомов позволяет получить информацию об изотопном соотношении дейтерий-тритиевой топливной смеси внутри плазмы. Контроль этого соотношения является задачей первостепенной важности – её решение позволит обеспечить оптимальный режим термоядерного горения.

Диагностическая система атомных анализаторов включает в себя два масс-спектрометрических прибора LENPA и HENPA,

работающих соответственно в тепловом и сверхтепловом (МэВ) диапазонах энергии. Оба прибора располагаются в портовой пространстве 11-го экваториального порта за пределами бетонной биологической защиты.

В докладе представлены результаты разработки вакуумного трубопровода в межпортовом пространстве, который необходим для транспортировки атомов от камеры реактора до портового пространства. Описана система прогрева трубопровода, включающая в себя нагреватели, подвижный тепловой экран и специальные опоры, позволяющие минимизировать тепловой поток от трубопровода на окружающие конструкции. Представлена модульная конструкция нейтронной защиты гетерогенного типа, содержащая нержавеющую сталь и карбид бора в объемном соотношении 1:1.

Также приведены результаты разработки электромагнитной системы анализатора HENPA, которая включает в себя вакуумную камеру, магнитопровод и катушки с системой водяного охлаждения. Описана конструкция магнитного экрана анализатора HENPA в которую интегрирована модульная нейтронная защита.

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ТЕРМОЯДЕРНОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМОЙ МОНИТОРОВ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ТОКАМАКА-РЕАКТОРА ИТЭР

Ковалев А.О., Родионов Р.Н., Портнов Д.В., Кащук Ю.А.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
support@iterrf.ru*

Плазма ИТЭР, как источник нейтронов, является пространственно распределенным трёхмерным объектом, характеристики которого изменяются во времени. К таким характеристикам относятся: форма плазмы, положение магнитной оси и распределение нейтронов источника в полоидальном сечении плазмы [1].

Наблюдаемая погрешность измерений полного выхода нейтронов представляет собой комбинацию двух ошибок: статистической и систематической. Статистическую погрешность можно минимизировать, оптимизируя чувствительность детектора, увеличивая количество детекторов или увеличивая время измерения. Источники и возможный уровень систематической погрешности должны быть хорошо изучены на этапе проектирования.

Для измерения термоядерной мощности и выхода нейтронов плазмы ИТЭР будут применены радиометры нейтронного потока: ДМНП [2] (Россия), НФМ [3] (Китай), МКД [4] (Япония).

В данной работе проведено моделирование радиационных условий работы данных диагностических систем ИТЭР для ДД и ДТ плазмы по методу, описанному в работах [5-7]. Определены статистическая и систематическая ошибки измерений. Проанализированы различные алгоритмы определения термоядерной мощности и выхода нейтронов плазмы.

Разработан метод измерения, который основан на интеграции нейтронных радиометров ИТЭР в единую измерительную систему, что поможет снизить систематическую погрешность и достичь минимальной погрешности измерений для ДД и ДТ плазмы ИТЭР.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.21.1038 от 11 мая 2021 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

Литература

- [1]. A.R. Polevoi et al., “Assessment of neutron emission from DD to DT operation of ITER,” 42th EPS Conference on Plasma Physics, (2015).
- [2]. Yu.A. Kaschuck et al., “Divertor Neutron Flux Monitor: Conceptual Design and Calibration,” AIP Conference Proceedings, 988, 303 (2007).
- [3]. Yang Jinwei et al., “Fusion Neutron Flux Monitor for ITER,” Plasma Science and Technology, 10, 141 (2008).
- [4]. Nishitani T., Johnson L.C., et al., "Design of ITER Neutron Monitor using Micro Fission Chambers", JAERI-Research 98-049 (1998).
- [5]. A.R. Polevoi et al., “Fast simulation of local radiation fields for synthetic diagnostics,” 45th EPS Conference on Plasma Physics, (2018).
- [6]. A.O. Kovalev et al., “Evaluation of the ITER plasma parameters dynamics impact on neutron flux monitor data,” Problems of Atomic Science and Technology, Series Thermonuclear Fusion, 42, 3 (2019).
- [7]. A.O. Kovalev et al., “Simulations of Fusion Power Measurements by Monitors of Neutron Flux in Evolving ITER Plasma,” Journal of Fusion Energy, 39, 40–52 (2020).

ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ КОЛЛИМАТОРОВ НА ИЗМЕРЕНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР

Кумпилов Д.А., Родионов Р.Н., Немцев Г.Е.

Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
d.kumpilov@iterrf.ru

Вертикальная Нейтронная Камера ИТЭР (ВНК) – нейтронная диагностическая система, предназначенная для измерения профиля нейтронного источника в полоидальном сечении плазмы [1]. ВНК состоит из двух подсистем – Верхней ВНК, расположенной в верхнем диагностическом порту №18, и Нижней ВНК, расположенной в нижнем диагностическом порту №14. Верхняя ВНК содержит 6 коллиматоров, нижняя – 5. В конце каждого коллиматора расположен блок детектирования, включающий по две камеры деления с радиатором из ^{238}U и два алмазных детектора разных чувствительностей.

Коллиматоры нижней ВНК проходят через три не связанных жестко компонента: детекторный модуль, диверторная кассета №40, бланкет. Геометрическое расположение компонентов токамака после установки может не соответствовать проектным значениям. В связи с этим, нейтронные коллиматоры в диверторной кассете №40 могут не совпадать с коллиматорами в детекторном модуле нижней ВНК. Это будет влиять на отношение сигнал/фон по нейтронам, что, в свою очередь, влияет на возможности восстановления профиля нейтронного источника.

В работе приведены результаты моделирования отклика детекторов ВНК при различных положениях диверторной кассеты и детекторного модуля нижней ВНК относительно выреза в бланкете. Определено влияние смещений вдоль

различных осей и поворотов на отношение сигнал/фон для различных конфигураций нейтронного источника плазмы.

Работа выполнена в рамках государственного контракта Н.4а.241.19.21.1038 от 11 мая 2021 года: «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

Литература

- [1]. Bertalot, L. et al. Concept design and integration aspects of ITER vertical neutron camera. Proc. Sci. 2015-January, 1–9 (2015).

РАСЧЁТ ОТКЛИКА АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР

Ревякин П.А., Немцев Г.Е., Кумпилов Д.А., Родионов Р.Н.,
Кормилицын Т.М.

Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
P.Reviakin@iterrf.ru

Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК) – диагностическая система ИТЭР, предназначенная для измерения пространственного профиля нейтронного источника в полоидальном сечении плазмы, а также ионной температуры [1]. ВНК состоит из 6 верхних и 5 нижних коллиматоров. В конце каждого коллиматора расположен Блок Детектирования Быстрых Нейтронов (БДБН), включающий по две ионизационные камеры деления с радиатором из ^{238}U и два алмазных детектора разных чувствительностей.

Для решения задачи восстановления профиля ионной температуры плазмы необходимо измерять энергетический спектр нейтронов в месте расположения детекторов. Для измерения спектра нейтронов в ВНК предполагается использовать алмазные детекторы. Чтобы обеспечить требуемую точность измерений, требуется провести калибровку детекторов перед установкой на токамаке. Калибровка доступна только для ограниченного диапазона энергий нейтронов, кроме того, на отклик детектора оказывают влияние окружающие конструкции, которые сложно воссоздать в условиях лаборатории. Математическое моделирование позволяет учитывать произвольную геометрию эксперимента и широкий диапазон энергий нейтронов.

При взаимодействии ДТ нейтронов с ядром углерода на амплитудном спектре наблюдается отдельно стоящий пик реакции (n,α) , в то время как при измерении ДД-нейтронов

необходимо разделять отклики от нейтронов и гамма-излучения. Это возможно в более тонких детекторах из-за разных длин пробега электронов, возникающих в реакции с гамма-излучением, и ионов, возникающих при облучении нейтронами ядер углерода.

В докладе приведены результаты моделирования отклика алмазных детекторов ВНК в сборке БДБН на нейтронное излучение ДД и ДТ нейтронных генераторов ИНГ-07Д и НГ-24М. С помощью программного кода Geant4 рассчитывались функции отклика алмазного детектора для различных типов излучений. Была получена зависимость формы амплитудного спектра при облучении нейтронами и гамма излучением от геометрических параметров кристалла для широкого диапазона энергий. Результаты моделирования экспериментального стенда хорошо согласуются с экспериментом по облучению детекторов ВНК на нейтронном генераторе.

Работа выполнена в рамках государственного контракта Н.4а.241.19.21.1038 от 11 мая 2021 года: «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

Литература

- [1]. L. Bertalot, et.al., “Concept design and integration aspects of ITER vertical neutron camera”, First EPS Conference on Plasma Diagnostics - 1st ECPD 14-17 April 2015, Villa Mondragone, Frascati (Rome), Italy.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННЫХ НАГРУЗОК В ЭКВАТОРИАЛЬНОМ ПОРТУ №11 ИТЭР

Афанасенко Р.С.^{1,2}, Высоких Ю.Г.¹, Дерябина Н.А.^{1,2}, Портнов Д.В.¹, Родионов Р.Н.¹

¹*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия, r.afanasenko@iterrf.ru*

²*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Гамма - нейтронная обстановка в портах ИТЭР определяет работоспособность технологических и диагностических систем, характеристики безопасности установки и возможности ее обслуживания. Анализ нейтронных нагрузок требует разработки трехмерных расчетных моделей, учитывающих как геометрические параметры системы, так и детальные характеристики использованных материалов.

В работе проведен анализ радиационной обстановки в зоне экваториального порта №11 (ЭП№11) ИТЭР для стандартного источника DT нейтронов с термоядерной мощностью 500 МВт [1]. Получены карты нейтронных полей и вторичных гамма-квантов. Особое внимание уделено повреждениям в конструкционных материалах диагностического защитного модуля (ДЗМ) и диагностической первой стенки (ДПС), как наиболее нагруженных элементов ЭП№11. Приведены результаты радиационного нагрева для ключевых элементов Российских диагностических систем – СВЛ (узел входного зеркала) [2] и НРА (нейтронный коллиматор) [3].

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» №

Н.4а.241.19.21.1038 от 11 мая 2021 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

Литература

- [1]. R. Juárez, J.P. Catalan et al. ITER plasma source and building modelling to produce radiation maps. Nuclear Fusion, Volume 58, Number 12, 2018
- [2]. Р.С. Афанасенко, А.Г. Алексеев, Б.В. Кутеев, А.А. Морозов, Д.К. Вуколов, Радиационные нагрузки на узел входного зеркала диагностики СВЛ в экваториальном порту ИТЭР № 12, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 1, DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-1-39-45
- [3]. Афанасьев В. И. Особенности измерения изотопного состава водородных ионов в плазме ИТЭР с помощью диагностики по потокам атомов в условиях инжекции в плазму нейтральных пучков // Физика плазмы. 2015. 41(12). 1062

**КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ
ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ
ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT)**

Ю.А.Кащук^{1,2}, А.В.Красильников¹, С. В. Коновалов^{1,3}

¹ Частное учреждение «ИТЭР-Центр», г. Москва

² АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва

³ НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

В работе приведена классификация диагностик термоядерной плазмы, предлагаемых для квазистационарного токамака с реакторными технологиями с магнитной системой на основе высокотемпературных сверхпроводников [1]. Выполнена оценка возможности измерения каждого из основных параметров плазмы TRT. Аналогичный подход был принят при разработке диагностики ИТЭР [2]. Для каждого параметра плазмы оценен статус разработки соответствующей диагностики и принято решение о соответствии с требованиями к измерениям. Такой подход позволил сгруппировать параметры плазмы в три категории: (а) хорошо измеряемые, для которых можно ожидать выполнение целевых требований к измерениям; (б) измеряемые с определенными трудностями и по которым требуется дополнительная информация (применение расчетных кодов, моделирование, анализ); (в) параметры при измерении которых

существуют серьезные трудности и невозможно выполнить целевые требования к измерениям.

Другой подход к классификации диагностик TRT основан на использовании данных диагностических измерений для защиты установки, управления параметрами плазмы в режиме реального времени и реализации научной программы TRT. При этом диагностики, используемые для управления плазмой, в свою очередь могут быть разделены на три группы – контроль равновесия, контроль кинетики плазмы и контроль МГД активности [3].

Предложенная классификация диагностик, диапазоны измерений параметров плазмы, требования к пространственному и временному разрешению, рассмотренные в настоящей работе, могут быть использованы в качестве исходных проектных технических требований при разработке комплекса диагностик термоядерной плазмы токамака TRT.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке АО «Наука и инновации» в рамках договора № 313/1671-Д от 05.09.2019 «НИОКР в обоснование концептуального проекта токамака с реакторными технологиями».

Литература

- [1]. Krasilnikov, A.V., Konovalov, S.V., Bondarchuk et al. «Tokamak with Reactor Technologies (TRT): concept, mission, main features and the expecting performance characteristics» (Submitted to journal “Plasma Physics”, 2021)
- [2]. ITER Physics Expert Group on Diagnostics “Chapter 7: Measurement of plasma parameters”, Nuclear Fusion, Vol. 39, No. 12, p. 2541–2575 (1999)
- [3]. W. Biel, R. Albanese, R. Ambrosino et al. “Diagnostics for plasma control – From ITER to DEMO”, Fusion Engineering and Design 146 (2019) p. 465–472.

ДИАГНОСТИКА ПРИМЕСЕЙ И ВОДОРОДА В ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЕ TRT

Вукулов К.Ю.^{1,2,3}, Андреев Е.Н.¹, Горбунов А.В.¹

¹НИИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия,

Vukolov_KY@nrcki.ru

²Координационный Центр "УТС-Центр", Москва, Россия

³Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Доклад посвящен проблемам разработки диагностического комплекса для контроля примесей и водорода в диверторе токамака с реакторными технологиями (TRT) с помощью пассивной и активной спектроскопии [1]. Планируются измерения в спектральном диапазоне от 300 до 1100 нм с пространственным разрешением около 1 мм на диверторной пластине. Рассматриваются актуальные физические задачи и построение диагностики, включая организацию сбора излучения из дивертора, а также основные проблемы этой диагностики.

Измерения параметров плазмы в TRT нужно обеспечить в квазистационарных режимах (≥ 100 с) с водородной, гелиевой и дейтериевой плазмой (n_e до $2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$), а также в режимах с короткими ($t < 10$ с) дейтерий-тритиевыми разрядами с $Q > 1$ на заключительном этапе программы исследований. Поток энергии в дивертор (проектная тепловая нагрузка до 15 МВт/м^2) существенно выше, чем на первую стенку (ПС), длительность его эксплуатации оценивается в 1000 плазменных разрядов полной мощности. В качестве обращенного к плазме материала ПС и дивертора будут использованы, соответственно, Ве и W. На второй стадии эксплуатации дивертора планируется использование жидкого лития [1].

Высокий поток мощности из плазмы в дивертор, предполагает его работу с частичным или полным отрывом плазмы от диверторных пластин для снижения пиковой нагрузки и перераспределения приходящей мощности на большую

площадь за счёт рекомбинации и переизлучения. Лазерная резонансная спектроскопия (метод лазерного индуцированного тушения – ЛИТ) хорошо подходит для измерения концентрации нейтрального водорода вдоль хорды зондирования и контроля положения ионизационного фронта в диверторе TRT [2]. Совместное использование ЛИТ с томсоновским рассеянием позволит измерять n_e , T_e , n_a (H, D, T) в одних и тех же точках. ЛИТ и ТР дадут необходимую количественную информацию для контроля эффективности работы дивертора установки.

Исходя из вышесказанного, актуальность построения пассивной и активной спектроскопии в диверторе не вызывает сомнений. Основные задачи можно сформулировать как: исследование режимов работы дивертора и эффективности откачки примесей, контроль эрозии диверторных пластин, уровень нагрузки на диверторную пластину, пространственное положение SOL. Кроме того, в TRT предполагается применение качания областей пересечения сепаратрисой мишеней дивертора, что делает крайне важным визуальный контроль этого процесса. Что из указанных задач можно будет реализовать в условиях дивертора TRT должны показать дальнейшие расчеты и численное моделирование. На данный момент очевидны трудности с организацией сбора света из дивертора, который затруднен изломом диверторного патрубка.

Проблемой для оптических диагностик TRT может стать рассеянный диверторный свет (РДС), поскольку ПС будет полностью металлической. Эта проблема замечена на всех современных токамаках с металлической ПС [3, 4]. Согласно результатам моделирования РДС существенно осложнит работу оптических диагностик ИТЭР [5]. Для диагностик в основной камере уровень РДС может превышать полезный сигнал в 100 и более раз, однако для диверторных диагностик уровень паразитного света обычно сравним с уровнем сигнала или даже ниже. В этом случае моделирование РДС может сгладить проблему путем восстановления исходного профиля излучения с учетом смоделированных отражений [6].

Другой актуальной проблемой оптических диагностик является деградация внутрикамерной оптики ввиду загрязнения или эрозии (зеркало, линза или вакуумное окно). В токамаках с металлической ПС было показано, что поверхность оптических элементов обращенных к плазме довольно сильно подвержена загрязнению при экспонировании в диверторной зоне [7], поэтому необходимо предусмотреть защитные механизмы (использование малого входного зрачка, шторы для защиты оптики во время чистящих разрядов и т.д.). Скорость деградации внутрикамерных оптических элементов можно предсказать с помощью моделирования [8] после того, как будет спроектирована система сбора излучения и появятся расчётные данные о величинах потоков атомов перезарядки на ПС.

Литература

- [1]. А. В. Красильников, С. В. Коновалов и др. ТОКАМАК С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT): КОНЦЕПЦИЯ, МИССИИ, ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ОЖИДАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. Будет опубликована в журнале Физика плазмы, 2021
- [2]. E.E. Mukhin, G.S. Kurskiev, A.V. Gorbunov et al. / Integration of Thomson scattering and laser-induced fluorescence in ITER divertor // Nuclear Fusion. 2019. Vol. 59. № 8. P. 086052
- [3]. E. M. Hollmann, A. Yu. Pigarov, and R. P. Doerner, Review of Scientific Instruments 74, 3984-3990 (2003)
- [4]. A. B. Kukushkin, et al., Int. Conf. on Fusion Reactor Diagnostics, Varenna, AIP Conf. Proc., 2014, 1612, Pages 97-100
- [5]. Andreenko E.N., Alekseev A.G., Kukushkin A.B., Neverov V.S., Lisgo S.W. and Morozov A.A., Fusion Engineering and Design, Vol. 123, 2017, P.825-829
- [6]. Shin Kajita, et al., 2017, Nucl. Fusion, Volume 57, Number 11, 116061 (9pp)
- [7]. A. Litnovsky et al., 2019, Nucl. Fusion, Volume 59, Number 6, 066029 (10pp)
- [8]. Е.Н. Андреевко, И.И. Орловский, А.Г. Алексеев, А.А. Морозов, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 3, с. 13—24

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» (CXRS) ДЛЯ УСТАНОВКИ TRT

Тугаринов С.Н., Красильников А.В., Кузьмин Н.В., Серов В.В.,
Серов С.В.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
support@iterrf.ru*

Токамак TRT (Токамак с Реакторными Технологями) будет являться следующим, после токамака Т-15МД, шагом в реализации национальной программы управляемого термоядерного синтеза и создании проекта гибридного реактора. Установка TRT предназначена для отработки технологий обеспечения длительного, свыше 100 секунд, рабочего импульса, что возможно при использовании высокотемпературной сверхпроводимости. Для управления работой установки ТРТ и контроля параметров термоядерной плазмы, требуется разработка и создание целого комплекса диагностических систем. Одной из проектируемых диагностических систем для ТРТ, является Активная спектроскопия (АС). Активная спектроскопия (английская аббревиатура CXRS – Charge Exchange Recombination Spectroscopy) будет реализовываться с использованием нагретых пучков атомов. В задачи диагностики АС будет входить измерение важнейшие параметры плазмы, таких как, ионная температура, скорость вращения плазмы, а также концентрация легких, по всему радиусу плазменного шнура. Диагностика АС, позволяет осуществлять измерения параметров плазмы с высоким пространственным и временным разрешением.

В докладе представлена разработанная концепция диагностической системы Активная спектроскопия для установки ТРТ. Предложены схемы проведения измерений, с учетом необходимости регистрации пространственных профилей для различных пламенных параметров. Приведено описание предполагаемой измерительной аппаратуры, а именно многоканальных спектрометров-полихроматоров и двумерных детектирующих систем.

В докладе приведены оценки уровней активного и фонового сигнала, а также соотношения сигнал-шум. Приведены результаты моделирования спектральных профилей излучения для активного и фонового сигнала и сделана оценка точности измерения отдельных параметров плазмы.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ПО ПОТОКАМ АТОМОВ ДЛЯ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (ТРТ)

Афанасьев В. И.¹, Гончаров П. Р.², Козловский С. С.²,
Мельник А. Д.¹, Миронов М. И.¹, Наволоцкий А. С.¹,
Несеневич В. Г.¹, Петров М. П.¹, Петров С. Я.¹, Чернышев Ф. В.¹

¹ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,
val@npd.ioffe.ru

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого, Санкт-Петербург, Россия, p.goncharov@spbstu.ru

Применение диагностики плазмы по потокам атомов осуществляется с помощью атомных анализаторов, способных измерять интенсивность и энергетическое распределение потоков нейтральных частиц H^0 , D^0 , T^0 , испускаемых плазмой термоядерных установок. Эти приборы являются эффективным инструментом получения информации о функции распределения соответствующих ионов H^+ , D^+ , T^+ и о соотношении их концентраций внутри плазмы (изотопном соотношении). В настоящее время в ФТИ им. А. Ф. Иоффе разрабатывается комплекс атомных анализаторов для международного термоядерного реактора ИТЭР, который позволит проводить измерения в условиях высокого радиационного фона и больших значений рассеянного магнитного поля [1]. Прототипы таких атомных анализаторов успешно использовались на крупнейших токамаках: TFTR (США), JET (Великобритания), JT-60U (Япония), в частности, в дейтерий-тритиевом (DT) режиме.

В настоящем докладе представлены результаты расчетов потоков нейтральных частиц H^0 , D^0 , T^0 из плазмы установки ТРТ. Показано, что атомные анализаторы, аналогичные разрабатываемым для ИТЭР, могут быть эффективно использованы и на установке ТРТ, в частности, в полномасштабных DT разрядах. Рассмотрены возможности

диагностики по измерению изотопного соотношения водородного компонента плазмы в тепловом и надтепловом (МэВ) диапазонах энергий. Для МэВ диапазона энергии приведены результаты моделирования энергетических распределений ионов отдачи D^+ и T^+ , возникающих в результате лобовых столкновений ионов D^+ и T^+ тепловых энергий с термоядерными альфа-частицами [2, 3, 4]. Показано, что регистрация таких ионов даст возможность измерять изотопное соотношение в центральной области плазмы установки ТРТ.

В докладе также проанализирована возможность реализации на установке ТРТ так называемой активной корпускулярной диагностики для получения локальных значений изотопного соотношения плазмы при инжекции в плазму диагностического пучка атомов водорода/дейтерия с энергией 60-80 кэВ.

Кроме того, предложена схема атомного анализатора, основанная на измерении времени пролета выделенных по энергии вторичных ионов водорода, дейтерия и трития [5]. Показано, что такой анализатор в условиях применения на ТРТ будет более компактным и эффективным для подавления радиационного фона, чем общепринятые анализаторы с использованием электромагнитной дисперсии вторичных ионов после обдирки.

Литература

- [1]. V. I. Afanasyev, F. V. Chernyshev, A. I. Kislyakov, S. S. Kozlovski, B. V. Ljublin, M. I. Mironov, A. D. Melnik, V. G. Nesenevich, M. P. Petrov, S. Ya Petrov, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **621**, 456 (2010).
- [2]. D. Ryutov, Phys. Scripta, **45**, 153 (1992).
- [3]. R. K. Fisher, P. B. Parks, J. M. Chesney, and M. N. Rosenbluth, Nucl. Fusion **34**, 1291 (1994).
- [4]. L. Ballabio, G. Gorini, and J. Kallne, Phys. Rev. E **55**, 3358 (1997).
- [5]. G. Bracco, G. Betello, S. Mantovani, A. Moleti, B. Tilia, and V. Zanza, Rev. Sci. Instrum. **63**, 5685 (1992).

ДИАГНОСТИКА КРАЕВОЙ И ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЫ СОВМЕЩЕННЫМИ ТОМСОНОВСКИМ РАССЕЯНИЕМ/ЛИФ НА ТОКАМАКЕ TRT

Е.Е.Мухин¹, С.Ю.Толстяков¹, Г.С.Курскиев¹, А.В.Горбунов²,
К.Ю.Вуколов², В.С.Лисица², М.Г.Левашова², Н.С.Жильцов¹,
В.А.Соловей⁴, Н.А.Бабинов¹, А.Ф.Корнев³, А.Н.Коваль¹,
П.В.Чернаков⁵

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

² НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва

³ ООО "Лазеры и оптические системы", Санкт-Петербург

⁴ НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ, Ленинградская обл.,
г. Гатчина

⁵ АО «Спектрал-Тех, Санкт-Петербург

Важной частью экспериментальной программы по разработке токамака с термоядерными технологиями станут режимы с большими тепловыми потоками через последнюю замкнутую магнитную поверхность. В таких режимах ограничивающими факторами становятся физические ограничения тепловой нагрузки на первую стенку и элементы дивертора. Дивертор – наиболее энергонапряженный и потому самый критический элемент любого токамака-реактора. Именно поэтому в проекте TRT необходимо уделять внимание изучению пристеночной плазмы, взаимодействию плазма-стенка, исследованию и контролю рециклинга водорода, а основным режимом работы дивертора будет режим с полным или частичным отрывом плазмы, характеризующийся существенным снижением тепловой нагрузки на пластины дивертора.

Компактность и очень высокая плотность мощности дополнительного нагрева в TRT приведут к экстремально высоким нагрузкам на область дивертора, что увеличит риск серьезной аварии. Программа разработки и исследования диверторных технологий на TRT предполагает реализацию

газового дивертора, в котором существенная часть выносимой вдоль сепаратрисы энергии переизлучается внутри дивертора, что должно привести к кардинальному снижению плотности энергии в областях пересечения сепаратрисы с диверторными мишенями. Режимы работы газового дивертора их подбор и отслеживание в процессе работы приобретают особо важное значение, осуществляя защиту реактора от аварий. Модель пристеночной и диверторной плазмы, а также режима отрыва до конца не разработана. При разработке режимов работы дивертора потребуются надежные экспериментальные данные о распределении электронной, ионной и нейтральной компонент плазмы ($T_e, n_e, T_i, n_i, n_{He}/n_{D/T}$), необходимые для валидации теоретических моделей и численных кодов. Скорости реакций с участием электронной компоненты – ионизация, рекомбинация и излучение играют важную роль в охлаждении и рекомбинации плазмы. Параметры ионной компоненты и концентрация нейтрала важны при оценке скоростей ион-нейтральных столкновений, которые,

- (1) уравнивают давление в верхней части диверторной ноги;
- (2) приводят к охлаждению плазмы до ~ 1 эВ, инициируя начало рекомбинации;
- (3) за счет ‘трения’ приводят к переключению плазменных потоков от свободного течения к диффузионному распространению, делая время пребывания электронов и ионов в этой области достаточным для рекомбинации.

Другим процессом, связанным с нейтральным водородом и имеющим большое значение для краевой плазмы токамака, является рециклинг изотопов водорода с поверхности. Особенно большое значение этот процесс приобретает при увеличении длительности разряда токамака. В частности, одним из обсуждаемых режимов работы стенки токамака-реактора является режим с нулевым рециклингом на основе литиевых технологий.

Одним из технических препятствий реализации диагностики томсоновского рассеяния в термоядерных реакторах

является искажение спектральной характеристики и абсолютного пропускания оптической системы вследствие радиационно-наведенного поглощения и загрязнения оптических элементов продуктами эрозии первой стенки [1][1]. Поскольку режим работы реактора делает крайне затруднительным регулярную спектральную калибровку системы, достоверность данных лазерных диагностик диверторной плазмы будет снижаться со временем. Рутинный подход к проведению абсолютной калибровки пропускания оптической системы лазерных диагностик дивертора требует периодического напуска газа в вакуумную камеру и калибровки по рамановскому рассеянию. Переход к стационарному режиму горения потребует использования других технологий. Если для центральной плазмы n_e может рутинно отслеживаться путем сравнения профилей плотности со среднечордовыми измерениями при помощи интерферометра, то для измерения n_e в диверторе предлагается использовать анализ формы импульсов флуоресценции HeI [2]. Например, n_e надежно измеряется в диапазоне $10^{17} - 10^{21} \text{ м}^{-3}$ при $T_e = 0.3-200 \text{ эВ}$, при возбуждении линии $1s2s \ ^3S \rightarrow 1s3p \ ^3P$ импульсным лазером длительностью 10 нс, энергией 1 мДж, спектральной шириной 1000 пм при поперечном сечении пучка 1 см^2 . Для калибровки спектрального пропускания оптической системы предлагается использовать зондирование на двух длинах волн 1064 nm и 1047 nm [3] для которых разработана пара импульсно-периодических лазерных источников на кристаллах Nd:YAG и Nd:YLF, соответственно.

Разработка и апробация метода локальной диагностики концентрации нейтральных атомов водорода [1] в отличие от традиционно используемой для таких измерений пассивной спектроскопии обеспечит возможность измерения параметров необходимых для исследования процессов в пристеночной и диверторной плазме токамака. Предлагаемый новый метод диагностики атомов изотопов водорода основан на частичном тушении наиболее интенсивной линии в видимом диапазоне (H_α , D_α , T_α , переход $n = 3 \rightarrow 2$) при лазерном возбуждении с $n = 3$ уровня на один из вышележащих ($n \geq 4$) и принципиально

отличается от традиционно используемой резонансной спектроскопической схемы, которая не позволяет проводить надёжные измерения из-за паразитного лазерного излучения, рассеянного на конструкционных элементах и на пыли. Новый метод позволяет полностью избавиться от паразитной засветки, благодаря большому отличию длин волн лазерного излучения и линии наблюдения.

Диагностику ЛИФ предполагается использовать для измерений распределения n_{HeI} для оценки эффективности удаления гелия – продукта синтеза дейтерия и трития, и для измерения T_i в диверторе. Подробное описание способности метода соответствовать требованиям приведено в [4].

Описанные выше диагностические методики разрабатывались в рамках создания диагностики диверторной плазмы ИТЭР. Все они прошли или проходят апробацию на токамаке Глобус-М и планируются к использованию на токамаке Т-15МД. В докладе рассматривается возможность и особенности применения лазерной диагностики томсоновского рассеяния/ЛИФ для токамака с реакторными технологиями. Приводится сравнительный анализ для разных сочетаний возможных длин волн.

Литература

- [1]. E.E. Mukhin, et al Physical aspects of divertor Thomson scattering implementation on ITER 2014 Nucl. Fusion 54 043007
- [2]. E.E. Mukhin et al Integration of Thomson scattering and laser-induced fluorescence in ITER divertor 2019 Nucl. Fusion 59 086052
- [3]. G.S. Kurskiev; et al A study of core Thomson scattering measurements in ITER using a multi-laser approach 2015, Nucl. Fusion, v.55, 053024
- [4]. A.V. Gorbunov et al Laser-induced fluorescence for ITER divertor plasma 2017 Fusion Engineering and Design 123, 695-698

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БЫСТРЫХ ИОНОВ И УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ТОКАМАКЕ TRT

Шевелев А.Е.¹, Хилькевич Е.М.¹, Ильясова М.В.¹, Дойников
Д.Н.¹, Полуновский И.А.¹, Найденов В.О.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,
shevelev@cycla.ioffe.ru

Гамма-спектрометрия предоставляет эффективные инструменты диагностики быстрых ионов и электронов в термоядерной плазме. Так, недавние эксперименты с дейтериевой D-³He плазмой на JET продемонстрировали способность гамма-спектрометрической системы предоставлять информацию об энергетическом и пространственном распределениях ионов дейтерия, ускоренных в трех-частичном сценарии ионно-циклотронного резонансного нагрева [1, 2]. Отработанные на JET методы могут быть применены на токамаке TRT для восстановления энергетического распределения ионов дейтерия в МэВ-диапазоне при регистрации гамма-излучения 2.86 МэВ, 3.59 МэВ из реакций ${}^9\text{Be}(d,n\gamma){}^{10}\text{B}$ и 3.37 МэВ из ${}^9\text{Be}(d,p\gamma){}^{10}\text{Be}$. Информацию о распределении альфа-частиц, рожденных в ходе реакции термоядерного синтеза, предоставит анализ уширенной эффектом Доплера линии 4.44 МэВ из реакции ${}^9\text{Be}(\alpha,n\gamma){}^{12}\text{C}$. Измерения на JET гамма линии 16.7 МэВ в экспериментах с дейтериевой плазмой с примесью ³He позволили определить скорость D-³He реакции, используя известный коэффициент ветвления ${}^3\text{He}(d,\gamma){}^5\text{Li}/{}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He}$. Аналогичным образом может быть диагностирована скорость рождения альфа-частиц в DT плазме на токамаке TRT по измеренной линии 16.8 МэВ из

реакции ${}^3\text{H}(d,\gamma){}^5\text{He}$. Необходимым условием обеспечения безопасной эксплуатации такой крупной плазменной установки, как TRT, является своевременное обнаружение убегающих электронов (УЭ). Особенно важна диагностика УЭ на стадии гашения разряда и в случае срыва разряда. Регистрация потоков жесткого рентгеновского излучения с энергией $E > 0.1$ МэВ гамма-спектрометрами предоставит необходимую информацию об энергетическом и пространственном распределении пучка удерживаемых в плазме ускоренных электронов. При проектировании системы гамма-диагностики для TRT могут быть применены технические решения, использованные на токамаках JET и ITER. В докладе приводятся оценки сигналов при диагностировании рожденных и удерживаемых альфа-частиц, а также убегающих электронов.

Литература

- [1]. M. Iliasova et al., 28th IAEA Fusion Energy Conference, 10-15 May 2021, Nice, France
- [2]. M. Nocente et al., Nucl. Fusion **60** (2020) 124006

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ТРТ: ТРЕБОВАНИЯ К ДИАГНОСТИКЕ, АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Афонин А.Ю.^{1,2}, Афонин К.Ю.^{1,2}, Вершков В.А.¹, Петров В.Г.^{1,2},
Субботин Г.Ф.¹, Шелухин Д.А.¹

¹УТС-Центр, Москва, Россия, V. Petrov@fc.iterru.ru

²МФТИ, Москва, Россия

Требования к диагностике для измерения плотности и ее особенности определяются параметрами токамака ТРТ.

Токамак с Реакторными Технологиями (TRT) [1] с высоким магнитным полем ($Bt_0 = 8$ Тл), с достижением термоядерных режимов плазмы с $Q > 1$ при существенно уменьшенных размерах установки ($R = 2.15$ м, $a = 0.57$ м). TRT будет способен работать в квазистационарных режимах (≥ 100 с) с водородной, гелиевой и дейтериевой плазмой (с n_e до $2 \cdot 10^{20}$ м⁻³) и в режимах с короткими ($t < 10$ с) дейтерий-третиевыми разрядами с $Q > 1$, ограниченными радиационным разогревом тороидальных катушек.

Эти особенности установки, во многих отношениях близкие к особенностям установки ИТЭР, накладывают свои требования к системам диагностики плазмы, в частности к системе измерения плотности.

Предварительно, требования к системам измерения плотности на ТРТ можно сформулировать таким образом. Диапазон измерения - $(0.02 \dots 2) \cdot 10^{20}$ м⁻³, точность измерения – не хуже 5 % (в квазистационаре), временное разрешение – не хуже 10 мс. Система измерения средней плотности должна выдавать сигнал для управления плотностью плазмы в онлайн-режиме. Приведенные выше требования относятся только к измерениям средней плотности для управления плотностью, требования к диагностикам с точки зрения проведения физических исследований должны быть выше.

В данной работе рассмотрены возможности применения различных методик для измерения электронной плотности плазмы на ТРТ.

Рассмотрены возможность и особенности применения рефрактометрии для измерения средней плотности в ТРТ. Отличительная особенность данной методики - применение относительно низких частот для зондирования плазмы в области 60-90-170 ГГц на Х-волне, и в области 130-170 ГГц на обыкновенной волне. На рис. ниже представлено поведение характерных частот для ТРТ (снизу вверх: нижняя частота отсечки для Х-волны, плазменная частота, ЭЦ-частота, верхняя частота отсечки на Х-волне).

Плюсы варианта 1 (Х-волна) – более низкие частоты, варианта 2 (О-волна) - независимость результатов от магнитного поля.

Возможная геометрия зондирования – со стороны слабого магнитного поля, в экваториальной плоскости, приемная антенна – со стороны сильного магнитного поля, т.е. аналогична рефрактометру ИТЭР.

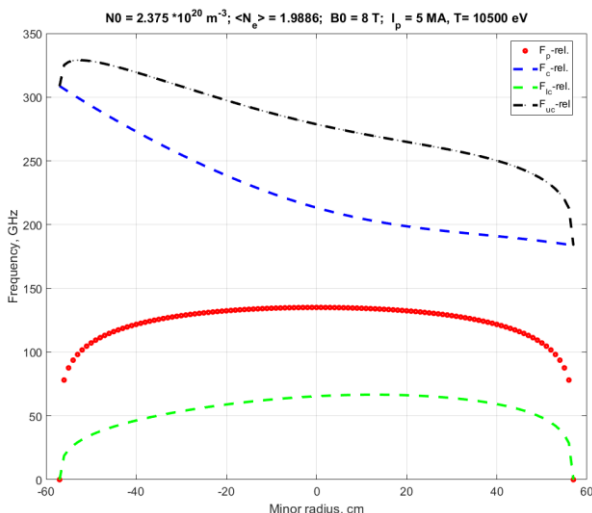


Рисунок 1. Характерные частоты для ТРТ (снизу вверх: нижняя частота отсечки для Х-волны, плазменная частота, ЭЦ-частота, верхняя частота отсечки на Х-волне)

Рассмотрены и проанализированы возможности измерения плотности плазмы методами поляриметрии в ТРТ: Коттон-Мутон поляриметрия и поляриметрия на эффекте Фарадея.

На рисунке 2 в качестве примера представлена зависимость угла поворота плоскости поляризации от длины волны зондирующего излучения. Предполагалось зондирование в экваториальной плоскости по направлению тороидального магнитного поля.

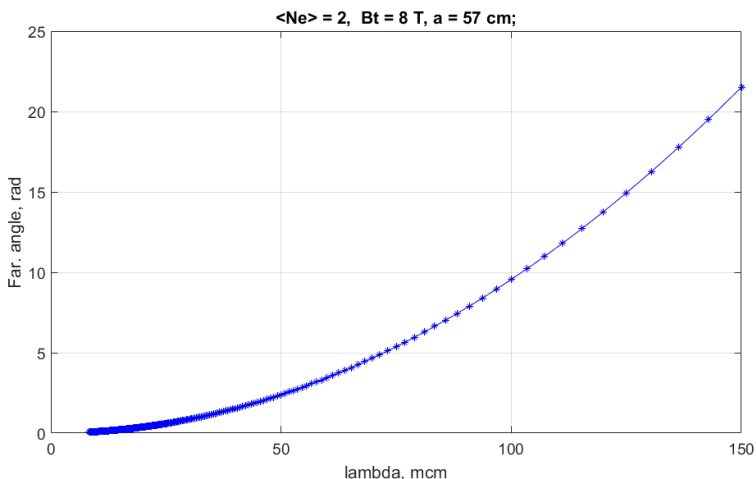


Рисунок 2. Зависимость угла поворота плоскости поляризации от длины волны зондирующего излучения

Кратко рассмотрены особенности и требования к системе рефлектометрии на установке ТРТ. Проведен анализ влияния различных факторов на измерения плотности в условиях ТРТ.

Литература

- [1]. Красильников А. В. и др. Физика плазмы. Т.47 (2021, принята к публикации).

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИНЖЕКТОРА АТОМОВ ВОДОРОДА ДЛЯ TRT

А.А. Иванов, В.И. Давыденко, Н.В. Ступишин

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия A.A.Ivanov@inp.nsk.su*

В работе представлен концептуальный проект перезарядного диагностического инжектора пучка атомов водорода для токамака TRT [1]. Инжектор предполагается использовать для измерения радиальных профилей ионной температуры, полоидальных и тороидальных скоростей движения плазмы методом пучково-эмиссионной спектроскопии, а также определения угла наклона силовых магнитного поля по динамическому эффекту Штарка.

Вследствие значительных величин плотности и поперечного размера плазмы в токамаке TRT энергия диагностического пучка атомов водорода диагностического пучка должна быть не менее 80-100 кэВ и необходимо инжектировать его поперек плазменного шнура. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН разработал серию диагностических инжекторов для современных установок с магнитным удержанием плазмы [2]. Среди этих инжекторов наибольшую энергию атомов пучка (60 кэВ) имеют диагностические инжекторы токамака T-15 МД и стелларатора W-7X. Диагностический инжектор для токамака TRT будет разработан на основе этих инжекторов.

В ионном источнике диагностического инжектора TRT баллистически сфокусированный ионный пучок будет формироваться прецизионной многоапертурной ионно-оптической системой с четырьмя электродами сферической

формы. Плазменный эмиттер создается водородной плазмой из дугового генератора, либо из генератора с индуктивным ВЧ-разрядом, расширяющейся в объем с периферийным мультипольным магнитным полем, Сформированный пучок ионов далее перезаряжается в атомы в газовой мишени нейтрализатора. Неперезарядившиеся ионы отклоняются магнитом и попадают в водоохлаждаемый приёмник. Двухступенчатая дифференциальная откачка инжекторного бака производится мощными крионасосами. Для измерения мощности полученного пучка быстрых атомов на выходе инжекторного бака пристыкован подвижный калориметр.

Эквивалентный ток инжектируемого в плазму TRT пучка атомов водорода с полной энергией должен иметь величину $\sim 3 - 5$ экв. А. При угловой расходимости пучка ~ 7 мрад и расстоянии ~ 7 м от ионно-оптической системы до плазмы TRT диаметр диагностического пучка в зоне измерений составит ~ 10 см. В течении рабочего импульса токамака TRT может быть инжектировано несколько импульсов диагностического пучка атомов водорода с длительностью ~ 1 с. Для улучшения отношения измеряемого сигнала к шуму, каждый из этих импульсов может быть промодулирован на частоте 10-100 Гц.

Литература

- [1]. А.В. Красильников, С.В. Коновалов, Э.Н. Бондарчук и др. Токамак с реакторными технологиями (TRT): Концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики. Физика плазмы, 2021, в печати.
- [2]. Ю. И. Бельченко, В. И. Давыденко, П. П. Дейчули, И. С. Емелев, А. А. Иванов и др. Исследования по физике и технике ионных и атомарных пучков в ИЯФ СО РАН (1960-2017). УФН, 2018, т. 188, № 6, с. 595–650.

ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ПЕРВОЙ СТЕНКИ: КОНТРОЛЬ ЭРОЗИИ И ДИАГНОСТИКА НАКОПЛЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

А.Г.Раздобарин¹, А.М.Дмитриев^{1,2}, Д.И.Елец^{1,2}, Е.Е.Мухин¹,
Л.А.Снигирев¹, Ю.М.Гаспарян², Д.Г. Булгадарян², Е.Д.
Вовченко², В.С. Ефимов², Н.Е. Ефимов², С.А. Крат²,
Д.Н.Синельников², И.В.Алексеев³

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, post@mail.ioffe.ru

² НИЯУ МИФИ, Москва, info@terphi.ru

³ БФУ им. И. Канта, Калининград, post@kantiana.ru

Согласно выводам, основанным на текущих исследованиях в токамаках и в лабораторных условиях, взаимодействие плазмы со стенкой, в частности, срок службы компонентов, обращенных к плазме, и долгосрочное удержание термоядерного топлива будет являться одним из ключевых факторов, ограничивающих энергетические характеристики проектируемых в настоящее время термоядерных установок. В условиях экстремально высоких нагрузок на элементы первой стенки и дивертора вопросы безопасности обуславливают необходимость осуществления эффективного контроля состояния наиболее энергонагруженных компонентов и накопления термоядерного топлива в элементах конструкции токамаков. Так, в проекте ИТЭР разработка диагностики мониторинга накопления трития в диверторной области и диагностика контроля эрозии стенки в области пересечения с сепаратрисой включены в список приоритетных задач. Компактные размеры разрабатываемой установки ТРТ при высокой удельной мощности нагрева плазмы, обуславливают высокую энергонагруженность конструктивных элементов установки, а, следовательно, и необходимость постоянного мониторинга

обращенных к плазме конструкционных элементов. При этом интерес представляет, как глубина эрозии облицовочных пластин дивертора, так и исследование осадений перепыленных материалов первой стенки для определения, в первую очередь, поверхностной плотности накопленных изотопов водорода.

В настоящее время основными методами определения доли изотопов водорода, поглощенных в стенке установок с магнитным удержанием плазмы, является оценка дефицита термоядерного топлива и лабораторные исследования образцов-коллекторов, экспонировавшихся на первой стенке токамака. Как показывают исследования в действующих установках, накопление изотопов водорода происходит преимущественно в осадениях материалов, эродировавших при взаимодействии с плазмой в рабочих режимах термоядерных установок. Для дистанционного мониторинга содержания термоядерного топлива в осадениях на первой стенке токамак-реакторов предлагается методика, основанная на анализе увеличения концентрации изотопов водорода в объеме токамака при воздействии лазерного излучения на элементы первой стенки. При этом физические процессы на поверхности стенки будут определяться длительностью лазерного импульса и плотностью мощности излучения. Лазерные импульсы с длительностью 1-10 мс с плотностью мощности 5-10 кВт/см² термически десорбируют топливо в области лазерного пятна. Скорость десорбции резко возрастает по достижении температуры плавления материала осадений. При увеличении мощности лазерного излучения происходит переход от плавления к абляции материала с образованием лазерной искры. Регистрацию высвободившихся изотопов водорода планируется осуществлять спектроскопически в отдельном плазменном разряде и/или методами масс-спектрометрии. В [1], была продемонстрирована возможность измерения парциального давления Н/D $4 \cdot 10^{-7}$ Па со стандартными отклонениями $\pm 16,5\%$ путем регистрации эмиссионных линий изотопов водорода $\text{H}\alpha$ 656.28 нм, $\text{D}\alpha$ 656.10 нм в разряде Пеннинга. В пересчете на ~ 100 м³ объема камеры ТРТ это соответствует $\sim 10^{16}$ атомов. Для этого в [1]

использовался принятый в ИТЭР для измерения базового давления вакуумметр Alcatel CF2P на основе пенинговского разряда и спектрометр высокого разрешения SPT-DDHR-04 со временем интегрирования CCD камеры -1 с. Оценки для бериллиевых осадений показывают, что облучение лазерными импульсами с длительностью нс и короче с плотностью энергии 10 Дж/см^2 обеспечит скорость абляции $\sim 1 \text{ мкм}$ за импульс. Использование стандартного нс лазера с энергией в импульсе $\sim 1 \text{ Дж}$, частотой повторения $\sim 100 \text{ Гц}$ позволит проводить измерение изотопов водорода накопленных в осадениях толщиной до 100 мкм с поверхностной плотностью – от $\sim 10^{16}$ атомов/см² за время $\sim 1 \text{ с}$ не превышающее время откачки вакуумного объема ТРТ. Спектроскопия лазерного пробоя (LIBS), изучающая характеристики излучения лазерного факела, предоставит дополнительную информацию о составе осадений, а также будет использоваться для контроля процесса абляции, чтобы избежать повреждения поверхности стенки токамака. В настоящее время в рамках совместного проекта ФТИ и МИФИ готовится апробация диагностики накопления изотопов водорода в токамаке Глобус -2М.

Для контроля эрозии обращенных к плазме элементов токамака предлагается двухволновой метод цифровой голографии. Данный метод позволяет оценить амплитуду и фазу волнового фронта путем анализа интерференции опорного и предметного пучков [2]. Две голограммы на разных длинах волн записываются одновременно, либо последовательно с использованием одного перестраиваемого или двух лазеров. Пространственное распределение разности фаз, извлеченных из голограмм, зарегистрированных на двух разных длинах волн дает информацию о профиле поверхности. Так если направление освещения и наблюдения объекта перпендикулярны его поверхности, то для рассчитанной разности фаз в 2π изменение профиля поверхности объекта будет определяться выражением:

$$\Delta z = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{2 \cdot |\lambda_1 - \lambda_2|} = \frac{\Lambda}{2}$$

где λ_1 и λ_2 - длины волн, используемые для записи голограмм, а Λ - синтетическая длина волны. Исследование применимости метода для контроля эрозии в ИТЭР [3] показало возможность измерения формы объектов, находящихся на расстоянии более 20 м от измерительной системы, за время ~100 мкс с точностью по глубине ± 10 мкм.

Литература

- [1]. E.E. Mukhin et al. Nucl. Fusion 56 (2016) 036017
- [2]. Schars, U., Jueptner W., Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [3]. G. Pedrini et al. Applied Optics Vol. 58, Issue 5, pp. A147-A155 (2019)

ТОКАМАК С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT): ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТА ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Портнов Д.В., Высоких Ю.Г., Кашук Ю.А., Родионов Р.Н.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
D.Portnov@iterrf.ru*

Прогресс в развитии высокотемпературных сверхпроводников на основе лент REBCO открывает возможность строительства компактного ($R = 2.15\text{м}$, $a = 0.57\text{м}$) и, в следствие этого, относительно недорогого токамака. Проектируемый токамак TRT позволит отладить целый ряд реакторных технологий в условиях квазистационарного разряда (100-150с) с высоким выходом термоядерной энергии. На короткое время выход энергии может превосходить вклад от внешних источников, что позволит выявить технологические проблемы, возникающие при высоких ядерно-радиационных нагрузках, и оценить способы их решения.

В данном докладе оценены влияющие на конструкторские решения факторы, связанные с нейтронным и гамма полями, создаваемыми термоядерными нейтронами из плазмы.

Компактный токамак не позволяет использовать защиту большого объема. В связи с этим, возникают ограничения на допустимый уровень термоядерной мощности и ее длительность. Эти ограничения также оцениваются в представляемой работе.

В докладе представлена предварительная модель ядерно-радиационного транспорта в TRT. Более детально, чем в предыдущих публикациях, представлены результаты расчетов потоков и энерговыделения, создаваемых ионизирующими излучениями в вакуумной камере и магнитных катушках. Представлено сравнение результатов для DD и DT плазмы. В

докладе сделаны оценки источников энерговыделения в тороидальных катушках, а также нескольких вариантов защиты. Подтверждена возможность работы с DD плазмой и определены проблемы радиационной защиты в случае с DT плазмой.

Работа выполнена при поддержке Государственной корпораций по атомной энергии «Росатом» в рамках договора между АО «Наука и инновации» и Частным учреждением «ИТЭР-Центр» № 313/1671-Д от 5 сентября 2019 г. «НИОКР в обоснование концептуального проекта токамака с реакторными технологиями».

КОНЦЕПЦИЯ СПЕКТРОМЕТРА С АЛМАЗНЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БЫСТРЫХ АТОМОВ НА ТОКАМАКЕ С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT)

Артемьев К.К.¹, Красильников А.В.¹, Кормилицын Т.М.¹,
Миронов М.И.², Афанасьев В.И.², Петров М.П.², Петров С.Я.²,
Кедров И.В.³, Антропов Д.А.³

¹Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
k.artemev@iterrf.ru

²ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,

³НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия.

В компактном ($R = 2.15$ м, $a = 0.57$ м) Токамаке с Реакторными Технологией (TRT), благодаря применению высокотемпературных сверхпроводников на основе лент REBCO, планируется создать высокие магнитные поля ($B_{10} = 8$ Тл), не свойственные большинству существующих термоядерных установок аналогичных размеров [1]. Всестороннее изучение эволюции функции распределения быстрых ионов представляет особый интерес при высоком плазменном давлении. Помимо атомных анализаторов [2], обладающих неоспоримым преимуществом разрешения частиц по массе, для исследования потоков быстрых атомов перезарядки применяются также спектрометры с алмазными детекторами, обладающие возможностью более гибкой настройки энергетического и временного разрешений. Подобные спектрометры применялись на целом ряде крупнейших термоядерных установок (TFTR [3], JT-60U [4], JET [5]). Компактные алмазные детекторы могут быть размещены внутри портовых каналов с лучами обзора, имеющими значительную тангенциальную составляющую.

В настоящем докладе представлена концепция спектрометра быстрых атомов перезарядки с алмазными детекторами, интегрированная в систему с диагностическим инжектором нейтральных атомов и атомным анализатором. Показаны предпочтительные схемы их совместного расположения и прохождения лучей обзора, включая систему активной корпускулярно-спектроскопической диагностики (CXRS). Рассмотрены возможности синергии этих диагностик с целью реконструкции трёхмерной функции распределения скоростей быстрых ионов плазмы и исследования её эволюции в результате развития неустойчивостей в плазме. Показан потенциал многоканального алмазного спектрометра для изучения эффективности дополнительного нагрева плазмы TRT. Приведены результаты расчётов сигналов алмазного спектрометра и оценка эффективности его применения. Кроме того, в работе представлена компонентная схема многоканального алмазного спектрометра атомов перезарядки для TRT и план дальнейших исследований и разработки проекта.

Авторы доклада выражают благодарность сотруднику Международной Организации «ИТЭР» (Сэн-Поль-ле-Дюранс, Франция) В.А. Красильникову за помощь в проработке концепции спектрометра с алмазными детекторами и обстоятельные обсуждения результатов.

Литература

- [1]. А.В. Красильников, С.В. Коновалов, Э.Н. Бондарчук и др. Токамак с реакторными технологиями (TRT): Концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики. Физика плазмы, 2021, в печати.
- [2]. V.I. Afanasyev, F.V. Chernyshev, A.I. Kislyakov et al. Neutral particle analysis on ITER: present status and prospects. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 621, 2010, P. 456 – 467.
- [3]. A.V. Krasilnikov, S.S. Medley, N.N. Gorelenkov et al. Tokamak Fusion Test Reactor charge exchange atom spectrometry using a

natural diamond detector, *Rev. Sci. Instrum.*, 1999, Vol. 70, N. 1, P. 1107 – 1110/

- [4]. M. Ishikawa, Y. Kusama, M. Takechi et al. Charge exchange neutral particle measurements with natural diamond detector under the deuterium–deuterium neutron field on JT-60U tokamak. *Review of scientific instruments*, 2004, Vol. 75, N. 10, P. 3643 – 3645.
- [5]. V.N. Amosov, A.V. Krasilnikov, D.A. Skopintsev et al. A Diamond-Detector-Based System for Spectrometry of Fast Atoms on the JET Tokamak, *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, Vol. 51, N. 2, P. 258 – 262.

ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ TRT

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

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
E.Mironova@iterrf.ru*

Токамак с Реакторными Технологями (TRT) находится на стадии концептуального проектирования. Перспективная термоядерная установка TRT требует создания передовой автоматизированной системы сбора, обработки данных и управления. Для технологических и диагностических подсистем установки, а также создания центральной системы управления с удаленным доступом необходимо использовать опыт ведущих современных мировых и российских установок УТС-исследований.

В общем случае система сбора, обработки данных и управления термоядерной установкой-реактором должна иметь несколько централизованных жизнеобеспечивающих подсистем, таких как – центральная система управления, подсистема блокировок и защит оборудования, подсистема безопасности, а также отдельная высокопроизводительная подсистема управления плазмой. Центральная система управления обеспечивает реализацию режимов работы установки, функционал управления технологическими и диагностическими подсистемами установки как комплексом из групп подсистем и узлов, которые в свою очередь управляются контроллерами и компьютерным оборудованием, а также централизованный сбор данных и обработку аварийных событий. Система управления плазмой предполагает интеграцию вычислительных алгоритмов, базирующихся на экспериментальных данных диагностических

систем, алгоритмов принятия решений для обеспечения управления в контуре обратной связи.

Программно-аппаратное обеспечение систем сбора данных и управления должно отвечать требованиям доступности, надежности, отказоустойчивости, масштабируемости.

В докладе представлены подходы к проектированию систем сбора данных и управления передовых российских и мировых установок УТС исследований типа токамак, которые предполагается использовать при разработке системы сбора, обработки данных и управления TRT.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.04.2021 №Н.4Q.241.09.21.1092 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в РФ. Этап 2021 года».

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ
ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ВНК**

А.С. Таскаев¹, М.В. Иванцовский¹, А.В. Бурдаков^{1,3},
С.В. Шиянков¹, П.А. Селезнев¹, Ю.А. Манаенкова¹,
М.В. Грехова¹, А.А. Шошин^{1,5}, Г.Е. Немцев², А.Б. Смирнов⁴,
А.А. Пожилов⁴, И.Д. Кириенко⁴, В.С. Модестов⁴

¹*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, РФ*

²*Частное учреждение ГК «РосАтом» «Проектный центр
ИТЭР», Москва, РФ*

³*Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, РФ*

⁴*Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет, Санкт-Петербург, РФ*

⁵*Новосибирский государственный университет, Новосибирск,
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.

Во время развития дизайна и интеграции данной диагностики были произведены следующие основные изменения и результаты работ:

- изменена передняя часть защитных кассет – она имеет скошенный передний край (как у ДЗМ), проведена обновлённая система водяных каналов охлаждения. На передней части кассет были добавлены элементы крепления, с помощью которых обеспечивается точная финальная установка кассет относительно ДЗМа.

- изменена геометрия защиты детекторных модулей. В данном дизайне с помощью сложной геометрии защиты было максимально заполнено свободное пространство вокруг детекторов для обеспечения улучшенной защиты.

- в связи с изменениями в диагностическом защитном модуле электрические разъёмы ВВНК были передвинуты в направлении от плазмы. На задних частях защитных кассет с помощью болтов крепятся опорные структуры, вдоль которых проводятся сигнальные кабели. На конце опорных структур устанавливаются ответные части электрических разъёмов.

- в следствии проведения работ по оптимизации конструкции ВВНК было принято решение об изменении маршрута прокладки кабелей. В предыдущем дизайне кабели прокладывались над детекторами, что требовало опускать сами детекторы ближе к плазме. В изменённом дизайне провода прокладываются по бокам кассет (слева и справа от детекторов), что позволило поднять детекторы, отдалив их от плазмы и улучшив соотношение сигнал/шум.

- была изменена разводка труб системы сервисного вакуума. В данном дизайне три трубки SVS от каждого из детекторов (на каждой из двух кассет) прокладываются вблизи с сигнальными кабелями и рядом с опорной структурой, соединяются в одну трубку для дальнейшей сварки с трубой SVS порт-интегратора.

- в конструкции предусмотрены места крепления для элементов диагностики вакуумного ультрафиолетового

излучения, которую разрабатывает Корейское домашнее агентство.

- Подрядной организацией были подготовлены исходные данные для прочностного анализа финального проекта верхней ВНК (внутривакуумные элементы).

ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕМЕНТОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИЯФ СО РАН

Гавриленко Д.Е.¹, Бурдаков А.В.^{1,2}, Иванцовский М.В.¹, Буренков Д. Б.¹, Ваулин Н. А.¹, Бурдин П.Н.¹, Синчева А. Г.¹, Рувинский Е.С.¹, Стешов А.Г.¹, Шиянков С.В.¹

¹*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, РФ,*
inp@inp.nsk.su

²*Новосибирский государственный технический университет,*
Новосибирск, РФ, inter@nstu.ru

В рамках подготовки к производству Диагностических защитных модулей (ДЗМ) экваториального порта №11, которые представляют собой структуры сложного профиля с большим количеством каналов охлаждения, в ИЯФ СО РАН была проведен ряд квалификационных процедур специальных процессов (процессов глубокого сверления, сварочных процессов, процессов неразрушающего контроля).

Одной из ключевых задач при проведении квалификации процедур глубокого сверления было определение прямолинейности каналов. Сложная форма поверхности ДЗМ и большая плотность отверстий в толще изделия в конечном счёте делают невозможным применение для этих целей метода ультразвукового контроля. Кроме того, микроструктура стали 316L(N)-IG практически непригодна для применения ультразвуковых методов контроля для проведения геометрических измерений высокой точности.

Для решения данной задачи был предложен и успешно апробирован метод контроля прямолинейности оси глубоких отверстий с применением лазер-трекера и оптических калибров. Общая схема измерений и их результатов представлена на рисунках 1 и 2.

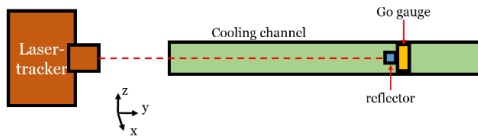


Рисунок 1. Общая схема измерений

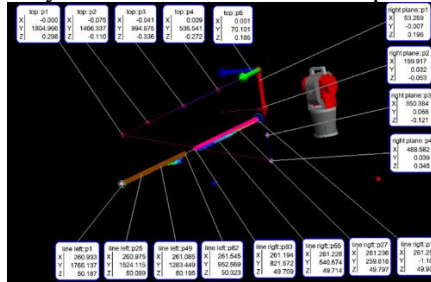


Рисунок 2. Измерение
прямолинейности «встречных» каналов
охлаждения

Применение данного метода контроля при текущих требованиях к прямолинейности каналов ($\varnothing 2\text{мм}/1\text{м}$) позволяет с высокой точностью проконтролировать гидравлическую систему охлаждения ДЗМ.

На основе данного метода разработана процедура контроля геометрических параметров операций глубокого сверления «Dimensional control procedure of gun drilling operation».

РЕЗУЛЬТАТЫ ВАКУУМНЫХ И АКТИВАЦИОННЫХ ТЕСТОВ КЕРАМИКИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОРТОВ ИТЭР

Шошин А.А.^{1,2}, Бурдаков А.В.^{1,3}, Иванцовский М.В.¹,
Полосаткин С.В.^{1,2,3}, Суляев Ю.С.^{1,2}, Семенов А.М.^{1,3}, Таскаев
С.Ю.^{1,2}, Касатов Д.А.^{1,2}

¹ *Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия,*
shoshin@inp.nsk.su

² *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

³ *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

При интеграции диагностик плазмы в портах строящегося во Франции экспериментального международного термоядерного реактора ИТЭР возникла задача создания эффективной радиационной защиты оборудования, а также снижения дозы радиации на обслуживающий персонал после остановки реактора. Было предложено использовать керамику карбида бора благодаря ее низкой плотности и эффективного поглощения как быстрых, так и медленных нейтронов. Ранее керамику карбида бора в большом количестве не устанавливали, поэтому потребовалось проведение вакуумных тестов керамики, для подтверждения возможности использования карбида бора в вакуумной камере ИТЭР. Были проведены тесты различных видов керамики В4С 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. Один из тестов

длится более двух лет, образцы керамики всё это время не извлекались из вакуумного стенда. Продемонстрировано существенное снижение удельного газовыделения керамики карбида бора после нескольких месяцев нахождения в вакууме.

Также 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. Флюенс и потоки нейтронов в экспериментах были сравнимы с условиями внутри порт-плаггов во время дейтерий-тритиевых разрядов. Активационные эксперименты не выявили запрещенных в ИТЭР примесей в керамике.

По результатам тестов сделан вывод о удовлетворении керамикой карбида бора требований ИТЭР, начата подготовка к закупке керамики у российских производителей.

ОСОБЕННОСТИ И ТОЧНОСТЬ ПИРОМЕТРИИ ВОЛЬФРАМА ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЕГО ПОВРЕЖДЕНИЙ МОЩНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ УДАРАМИ

Рыжков Г.А.^{1,2}, Васильев А.А.¹, Вячеславов Л.Н.^{1,2}, Кандауров
И.В.¹, Касатов А.А.^{1,2}, Черепанов Д.Е.^{1,2},

¹*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, РФ,
a.a.kasatov@inp.nsk.su*

²*Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск,
РФ*

Одна из основных проблем при создании термоядерного реактора – выбор материалов стенки, обращенной к плазме. Наиболее интенсивно плазма воздействует на стенку в диверторе. Для проекта ITER вольфрам был выбран в качестве материала для покрытия стенки дивертора. В процессе работы термоядерного реактора вольфрамовое покрытие наиболее интенсивно повреждается вследствие импульсных тепловых нагрузок (термоударов), которые возникают из-за неустойчивости на краю удерживаемой в реакторе плазмы. Скорость и физика процесса эрозии зависят от температуры, до которой нагревается покрытие под воздействием плазмы. Поэтому при экспериментальном моделировании воздействия термоударов на стенку в диверторе важно знать точное значение температуры поверхности вольфрама. На установке БЭТА в ИЯФ СО РАН термоудары экспериментально моделируются с помощью мощного электронного пучка миллисекундной длительности или такого же по длительности импульса лазерного излучения. Электронный пучок имеет большую мощность и позволяет нагревать и расплавлять большую площадь поверхности образца. Лазерное излучение даёт возможность

проводить эксперименты по плавлению поверхности образцов в сильном магнитном поле независимо от его направления. В данных экспериментах единственным возможным методом определения температуры поверхности является радиационная пирометрия – измерение температуры по тепловому излучению, и данный метод позволяет измерять достаточно высокие температуры (порядка температуры плавления вольфрама). Однако точность измерения температуры с помощью пирометрии зависит от спектральной излучательной способности вольфрама. В известных литературных данных существует разброс излучательной способности, связанный с шероховатостью поверхности, которая также может изменяться из-за пластической деформации приповерхностного слоя вольфрама во время экспериментов по нагреву, что дополнительно влияет на точность измерения температуры. Также существует проблема недостатка данных по излучательной способности в широком диапазоне температур и длин волн, что создаёт дополнительную сложность. Помимо этого, в экспериментах лазерное излучение может отразиться от поверхности образца и попасть в оптическую систему диагностики, и не только серьезно исказить результаты, но и повредить саму систему, что вносит свои особенности в пирометрию. В экспериментах для пирометрии используются обычные, основанные на кремнии, быстрые камеры и фотоприёмники, а также InGaAs камеры и InGaAs фотодиоды с разными спектральными чувствительностями. В работе рассматриваются особенности работы пирометров в экспериментах на БЭТА, их калибровка, и её экстраполяция на высокие температуры (до 4500 К). Для камер и фотодиодов оценена точность определения температуры поверхности до 4500 К с учетом шероховатости поверхности и разброса литературных данных излучательной способности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА, ВОЗДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ТВЕРДОТЕЛЬНУЮ МИШЕНЬ

Карташева А.А., Подковыров В.Л., Васильев Г.Б., Гуторов К.М.,
Коваленко Д.В.

*Акционерное общество "Государственный научный центр
Российской Федерации Троицкий институт инновационных и
термоядерных исследований"., г. Москва, г. Троицк, Россия,
liner@triniti.ru*

Цель данной работы заключается в диагностике плазменного потока, воздействующего на твердотельную мишень. Описанные в работе методы экспериментального исследования являются очередным шагом в изучении процессов формирования и динамики примешенного плазменного слоя при воздействии плазменного потока на поверхность материала. Полученные экспериментальные результаты также могут представлять интерес при разработке термоядерных установок, в которых остро стоит проблема эрозии обращенных к плазме материалов под действием мощных потоков плазмы.

Плазменный поток водорода генерировался в квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе (КСПУ) [1]. Концентрация заряженных частиц плазменного потока диаметром 10 см принимала значение $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при энергии ионов 17 эВ.

Результаты анализа процесса взаимодействия плазменного потока с твердотельной мишенью показывают, что для мишеней с большим атомным номером материала основным способом доставки энергии на поверхность облучаемой мишени является

радиационный перенос [2]. Однако прослеживается тенденция увеличения роли электронной теплопроводности по мере приближения к поверхности облучаемого образца, что показывает необходимость измерения электронной температуры. Для экспериментального определения значения температуры электронов разработан и реализован метод на основе многоэлектродного зонда. Теория подобного метода впервые была рассмотрена в [3], диагностика сверхзвуковых плазменных потоков с использованием многоэлектродных зондов проводилась в работах [4,5]. Для измерения температуры в условиях сверхзвукового плазменного потока длительностью 1 мс с высокой концентрацией заряженных частиц электростатический метод на основе многоэлектродного зонда был использован впервые. В качестве электродов использовались тонкие вольфрамовые стержни, помещенные в керамический кожух. Электрическая схема для измерения температуры электронов включает в себя источник постоянного напряжения для создания фиксированной отрицательной разности потенциалов между двумя стержнями, шунт для регистрации тока в цепи, и два делителя напряжения для измерения падения напряжения на одном из двух стержней и плавающего потенциала на третьем зонде. На основе теории, изложенной в работе [3], вычислялась температура электронов. Эксперименты дали значение температуры 2 эВ. Использование подобной схемы измерений позволяет устранить сложности, вызванные измерением полной вольт-амперной характеристики быстропротекающего процесса. Также отрицательный потенциал на каждом из зондов препятствует их разрушению потоком плазмы.

Сверхзвуковой плазменный поток, генерируемый КСПУ, позволяет использовать клин Маха в качестве независимого экспериментального метода определения температуры электронов. Для реализации данного метода основание стального клина с углом раствора 20 градусов располагается параллельно направлению распространения потока. Синус угла разлёта налетающего на клин плазменного потока, зарегистрированный с

помощью высокоскоростной камеры, позволит получить значение температуры электронов.

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

Литература

- [1]. Д.В. Коваленко, Н.С. Климов, А.М. Житлухин, А.Д. Музыкаченко, В.Л. Подковыров, В.М. Сафронов, А.Д. Ярошевская. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 4, с.39-48.
- [2]. Wuerz H., Arkhipov, N., Bakhtin, V., Kurkin, S., Safronov, V., Toporkov, D., Vasenin, S., Zhitlukhin, A. //Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. – 1999. – Т. 1. – №. 1, 2. – С. 121-123.
- [3]. Chen S. L., Sekiguchi T // Journal of Applied Physics. – 1965. – Т. 36. – №. 8. – С. 2363-2375.
- [4]. Eckman R., Byrne L., Gatsonis N. and Pencil E. //Journal of Propulsion and Power. – 2001. – Т. 17. – №. 4. – С. 762-771.
- [5]. Pashchina A. S., Karmatsky R. E. //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1112. – №. 1. – С. 012023.

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ ТУГОПЛАВКИХ ПОКРЫТИЙ ВО ВРЕМЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ МОЩНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ УДАРОВ

Касатов А.А.^{1,2}, Васильев А.А.¹, Вячеславов Л.Н.^{1,2}, Кандауров
И.В.¹, Черепанов Д.Е.^{1,2}, Аракчеев А.С.¹, Попов В.А.¹

¹*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, РФ,
a.a.kasatov@inp.nsk.su*

²*Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск,
РФ*

Стойкость к мощным тепловым нагрузкам материалов первой стенки и дивертора является одной из важнейших проблем на пути создания термоядерного реактора.

В ИЯФ СО РАН на установке ВЕТА проводится экспериментальное моделирование взаимодействия материалов с тепловыми нагрузками, создаваемыми мощным электронным пучком. Особенностью данной установки является наличие большого комплекса оптических *in situ* диагностик для определения параметров поверхности и приповерхностной области в момент теплового воздействия и сразу после него. В работе дано описание ключевых диагностик, представлены результаты, полученные на установке ВЕТА, а также рассмотрены перспективы её дальнейшего развития.

Обширный комплекс оптических диагностик использует как собственное тепловое свечение горячей поверхности образцов, так и подсветку с помощью мощного непрерывного лазера. Комплекс позволяет определять пространственное распределение температуры поверхности в нескольких точках по времени, а также временной ход температуры поверхности в

нескольких точках пространства в различных спектральных диапазонах. Лазерная подсветка даёт возможность оценивать динамику пластических деформаций, возникающих под действием термических ударов, и величину механических напряжений, являющихся следствием остаточных пластических деформаций. Также с помощью лазерной подсветки возможно определить время растрескивания поверхности образца под действием механических напряжений, плавление его поверхности, размер и скорость микрочастиц, вылетающих с поверхности расплава [1, 2, 3].

Один из векторов развития установки – создание лазерного стенда. В качестве источника теплового воздействия используется мощный неодимовый лазер способный производить импульс энергосодержанием до 200 Дж и длительностью 600 – 900 мкс, а сам лазерный луч может быть сфокусирован в пятно диаметром 2 – 30 мм. Стоит отметить, что излучение нагревного лазера представляет существенную проблему для оптических диагностик, и они были модифицированы так, чтобы наилучшим образом соответствовать условиям эксперимента. Такого рода система позволит изучать воздействие термических ударов на неметаллические материалы и плавление тугоплавких металлов в условиях, возможных в диверторе ITER.

Литература

- [1]. Vyacheslavov L.N. et al. (2021) *Journal of Nuclear Materials*, 544, doi:10.1016/j.jnucmat.2020.152669
- [2]. Vasilyev A.A. et al. (2019) *Fusion Engineering and Design*, 146, doi:10.1016/j.fusengdes.2019.03.192
- [3]. Vyacheslavov L.N. et al. (2017). *Nuclear Materials and Energy*, 12, 10.1016/j.nme.2017.01.023

ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЕННО-ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ДИВЕРТОРА ИТЭР

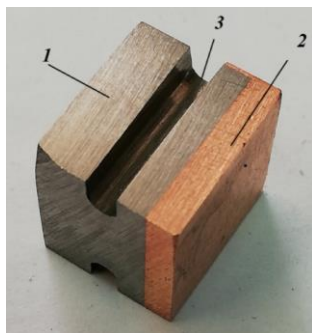
Федорович С.Д.¹, Будаев В.П.^{1,2}, Дедов А.В.¹, Карпов А.В.^{1,2},
Комов А.Т.¹, Лукашевский М.В.¹, Кавыршин Д.И.^{1,3}, Захаренков
А.В.¹, Губкин М.В.¹, Мартыненко Ю.В.^{1,2}, Лазукин А.В.¹,
Марченков А.Ю.¹, Слива А.П.¹, Рогозин К.А.¹, Коньков А.А.¹,
Чан Куанг В.¹, Васильев Г.Б.¹, Амелин А.И.¹, Белоусов С.В.¹,
Квасков В.С.¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия, budaev@mail.ru

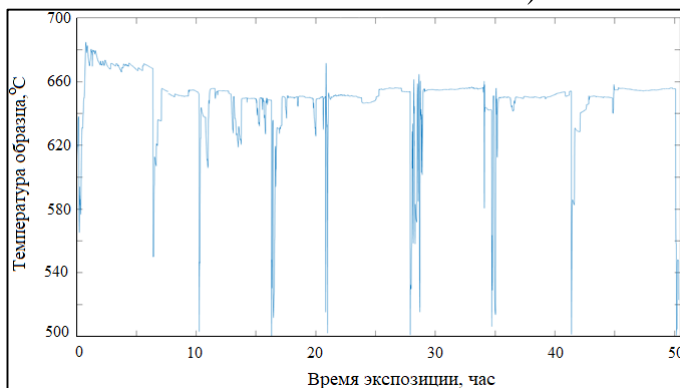
²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³ОИВТ РАН, Москва, Россия,

В плазменной установке ПЛМ усовершенствованной (ПЛМ-М) [1] проведено тестирование системы диагностики тепловых потоков на материал в экспериментах с дугowymi процессами. Для испытания использовался макет вольфрамового модуля, изготовленный из вольфрама, сертифицированного для применения при изготовлении диверторных пластин ИТЭР, рис. 1а; макет был установлен в центре плазменного пучка между катодом и анодом. Средняя температура макета вольфрамового модуля измерялась с помощью термопары, рис. 1б, установленной в вольфрамовую часть макета.



a)



б)

Рисунок 1 — (а) Макет вольфрамового модуля облицовки дивертора 1 – вольфрам; 2 – медь. (б) Температура макета в плазменном эксперименте, измеренная термопарой

В плазменном эксперименте длительностью 50 часов плотность гелиевой плазмы была 10^{18} м^{-3} , ток разряда от 5 до 7 А. На испытуемый макет подавался потенциал -100 В, ток ионов из плазмы на образец был от 0,55 до 0,65 А. Оптический спектр излучения плазмы измерялся с помощью многоканального оптоволоконного спектрометра с ультрафиолетовым рассеянием света AvaSpec-ULS2048-16-USB2-RM. Для измерения температуры поверхности вольфрамового модуля, обращенной к плазменному пучку, при плазменных испытаниях использовался промышленный инфракрасный термометр марки «Кельвин пиротельс», регистрирующий излучение через сапфировое вакуумное окно KVP-50. Для определения теплового потока на вольфрамовый макет использовалась методика, описанная в

секрете производства (ноу-хау) «Диагностика тепловых потоков на материал в экспериментах с дугowymi процессами». В экспериментах на ПЛМ-М с дугowymi процессами при испытаниях вольфрамового макета для реализации этой методики использовались двухточечные измерения температуры на поверхности макета в серии экспериментов, температура поверхности была в диапазоне от 665 оС до 709 оС, полученная оценка теплового потока составила 0,44 МВт/м².

На поверхности вольфрама после плазменного облучения в течение 6 часов 20 минут сформировался слой наноструктурированного «пуха», который наблюдается в виде черного слоя, рис. 2.



Рисунок 2— Вольфрамовый макет с наноструктурированным пухом на поверхности после испытаний гелиевой плазмой в течение 6 часов 20 минут

Для диагностики тепловых потоков на материал использовались данные измерения электрическими зондами параметров плазмы - ионного тока насыщения (концентрации ионов) и температуры электронов плазмы в зоне вблизи материальной поверхности испытываемого макета с временным разрешением не менее 10 микросекунд. Оценка теплового потока q_w из плазмы на материальную поверхность основана на теории пристеночного слоя плазмы с использованием предположения максвелловского распределения частиц плазмы по скоростям:

$$q_w = \delta_w j_i T_e$$

где δ_w коэффициент переноса тепла, j_i - ионный ток насыщения на поверхность, T_e - температура электронов. Коэффициент

теплопереноса δ_w может принимать минимальное значение $\delta_w=7$ при отсутствии эмиссии с поверхности, максимальное значение $\delta_w = 23$ при классическом рассмотрении задачи, при дуговых процессах δ_w может быть значительно более 100.

Работа выполнена при поддержке проекта № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д ГК «Росатом» ЧУ «Наука и инновации», анализ структуры стохастической поверхности – при поддержке гранта РФФ 17-19-01469, оценка радиационных эффектов – при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020, рентгеновский анализ – при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023).

Литература

- [1]. Будаев В.П. и др. ВАНТ сер. Термоядерный синтез. –2017. – Т.40,№3. С.35

ИСПЫТАНИЯ ЛИТИЕВОЙ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СИСТЕМЫ СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ В УСТАНОВКЕ ПЛМ

Федорович С.Д.¹, Будаев В.П.^{1,2}, Дедов А.В.¹, Карпов А.В.^{1,2},
Комов А.Т.¹, Люблинский И.Е.³, Вертков А.В.³, Лукашевский
М.В.¹, Кавыршин Д.И.¹, Захаренков А.В.¹, Губкин М.В.¹,
Мартыненко Ю.В.^{1,2}, Марченков А.Ю.¹, Рогозин К.А.¹,
Коньков А.А.¹, Чан Куанг В.¹, Васильев Г.Б.¹, Квасков В.С.¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия, budaev@mail.ru

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³АО Красная Звезда, Москва, Россия,

В плазменной установке ПЛМ [1] проведены экспериментальные испытания двух опытных макетов на основе литиевой жидкометаллической капиллярно-пористой системы (КПС) стационарной плазменной нагрузкой до 1 МВт/м² в гелиевом разряде. Проведены плазменные испытания опытных макетов литиевой КПС без использования системы охлаждения и с использованием системы охлаждения (рис. 2), что позволило оценить эффективность работы охлаждаемой КПС в сравнении с неохлаждаемой при длительной плазменной нагрузке в течении 500 минут. Параметры плазмы при испытаниях в ПЛМ: магнитное поле на оси 0,01 Тл, в каспах до 0,2 Тл, концентрация электронов до $2 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$, температура электронов более 1 эВ с фракцией горячих электронов более 10 эВ, ток плазменного разряда 2,20 А. Режим с водяным охлаждением: объёмный расход воды через охлаждаемый модуль КПС 1-2 л/мин., температура воды на входе 15°C.

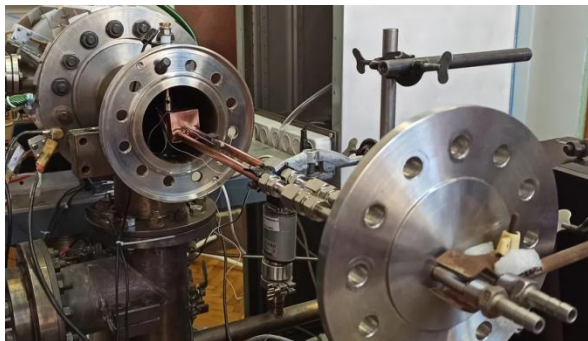


Рисунок 1 — Литиевая жидкометаллическая КПС с охлаждением в ПЛМ

При испытаниях на КПС подавался потенциал в диапазоне от -100 до $+20$ В для обеспечения регулируемого нагрева плазмой поверхности КПС и достижения различных условий испарения лития в плазму. При потенциале образца $+20$ В ток из плазмы на образец $0,5$ А. Контроль температуры КПС осуществлялся с помощью термопары ТХА. Изменение цвета излучения плазменного разряда вблизи КПС (рис.2) в зависимости от режима охлаждения КПС указывало на эффективность охлаждения КПС и возможность регулирования процесса испарения лития с поверхности КПС в плазму. В опытах без водяного охлаждения и с водяным охлаждением регистрируемые интенсивности спектральных линий были одинаковыми.

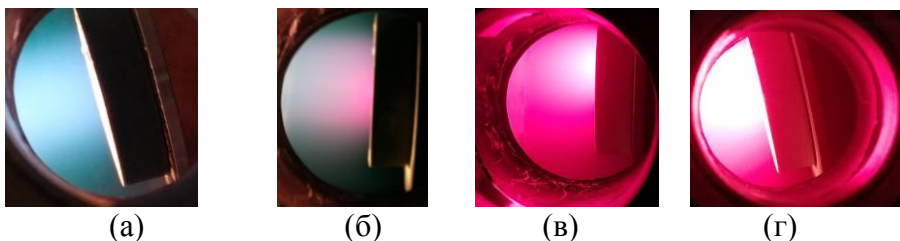


Рисунок 2 — Испытание охлаждаемой литиевой КПС в стационарном плазменном разряде в ПЛМ, температура поверхности литиевой КПС (а) 300 К, нет испарения лития с КПС, (б) 450 К, начало режима с испарением лития (в) 550 К, интенсивное испарение лития (г) 600 К, интенсивное испарение лития

Величина плазменно-тепловой нагрузки при испытаниях с охлаждением КПС выше в 1,76 раз, что указывает на эффективность охлаждения КПС. Использование системы охлаждения позволило поднять ток плазменного разряда ПЛМ в ~2 раза (с 1,25А до 2,2А) при поддержании одинаковой температуры стенки КПС, в два раза увеличилась интенсивность испарения, что подтверждается контролем массы материала лития, испарённого в плазму, которая составила 0,21 грамм и 0,41 грамм в эксперименте без охлаждения и с охлаждением соответственно.

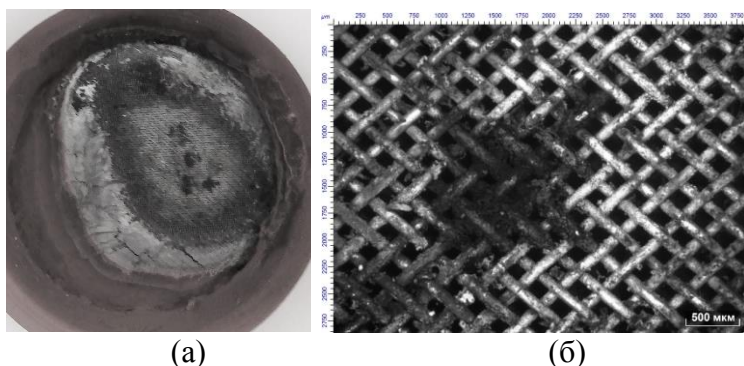


Рисунок 3 — Поверхность литиевой КПС с водяным охлаждением после плазменных испытаний в ПЛМ (а) общий вид ; (б) молибденовая сетка КПС с остатками неиспарившегося лития

После испытаний на поверхности молибденовой сетки КПС наблюдаются композитные слои и агломераты темного цвета, которые кластеризовались в наиболее перегретых зонах. Микроскопические исследования не выявили повреждений нитей молибденовой сетки КПС, рис.3. Стационарные плазменные испытания в течение 500 минут в установке ПЛМ, моделирующей условия периферийной плазмы в токамаке крупного размера, продемонстрировали работоспособность охлаждаемой литиевой КПС.

Работа выполнена при поддержке проекта № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д ГК «Росатом» ЧУ «Наука и инновации», анализ

структуры стохастической поверхности – при поддержке гранта РФФИ 17-19-01469, оценка радиационных эффектов – при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020, рентгеновский анализ – при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023).

Литература

- [1]. Будаев В.П. и др. ВАНТ сер. Термоядерный синтез. –2017. – Т.40,№3. С.35

ДИАМАГНИТНАЯ ДИАГНОСТИКА УСТАНОВКИ Т-15МД

К.А. Рогозин^{1,2}, А.В. Сушков¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ, nrcki@nrcki.ru

²ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Москва, РФ, universe@mpei.ac.ru

Диаманитные измерения имеют большое значение в экспериментах на установках типа токамак. Измерение изменения потока продольного магнитного поля, проходящего через полоидальное сечение плазмы, позволяет определить полный запас тепловой энергии в плазме [1]. Измерения обычно осуществляются с помощью диаманитных петель, охватывающих плазму в полоидальном направлении. Эти петли измеряют напряжение, вызванное изменением проходящего через них магнитного потока, который состоит из потоков созданных полоидальным током плазмы, токами во внешних обмотках и вихревых токов камеры. Кроме того, на сигнал диаманитной обмотки может влиять механическое смещение петель относительно плазмы.

Основной проблемой диаманитных измерений является то, что вклад изменения магнитного потока, созданного плазмой $\Delta\Phi_p$, много меньше флуктуаций магнитных потоков, созданных внешними обмотками. Обычно $\Delta\Phi_p$ в 10^4 раз меньше вклада потоков внешних полей [2]. Для выделения диаманитного эффекта плазмы из общего потока применяется аппаратная и программная компенсация.

На установке Т-15МД будет использоваться двухпетлевая схема диаманитной диагностики [3,4]. Благодаря тому, что произведение $n_1S_1=n_2S_2$ (где n – число витков диаманитной обмотки, а S – площадь охватываемого контура), удается

исключить влияние внешних потоков. Равенство nS обеспечивается калибровкой измерительной схемы.

В данной установке диамагнитная система состоит из двух катушек, размещённых на стенке и ребре камеры соответственно и компенсационного витка, расположенного на стенке камеры и измеряющего вертикальное поле. Для дополнительной компенсации предусмотрена возможность включения пояса Роговского в измерительную схему.

Монтаж осуществлён с помощью контактной сварки непосредственно к камере.

В докладе приведена конструкция и принципиальная электрическая схема данной диагностики.

Литература

- [1]. *Арцимович Л.А.* Установки ТОКАМАК: теория, конструкция, расчёт ч.1./ Л.А. Арцимович – Москва – 1974 г. (Препринт / ИАЭ им. Курчатова);
- [2]. *G. Tonetti, J. P. Christiansen, and L. de Kock* Measurement of the energy content of the JET tokamak plasma with a diamagnetic loop / *Rev. Sci.Instrum.*, Vol. 57, No.8, August 1986;
- [3]. *Пустовитов В. Д.* Диагностические возможности диамагнитных измерений с двумя петлями в токамаках / В.Д. Пустовитов – 2020 – Физика плазмы, Т. 46, № 8 – стр. 675-684;
- [4]. *Dubrov M L and Pustovitov V D* Diamagnetic diagnostics of rapid events in the T-15MD tokamak / *M L Dubrov , V D Pustovitov – 2019 – Plasma Phys. Control. Fusion* 61 – 065018.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА Cu—Cr—Zr

Суворова А.А.¹, Коростелев А.Б.², Гославский О.В.²

¹ АО «Наука и инновации», Москва, Россия,

AnnaSuvorova@rosatom.ru

² АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала», Москва, Россия

При изготовлении неразъемных соединений для элементов конструкций термоядерных реакторных установок предполагается использовать горячее изостатическое прессование, которое является одним из перспективных для получения качественных соединений металлических материалов. Однако оно может оказывать существенное влияние на структуру и свойства материала.

Влияние горячего изостатического прессования исследовали на сплаве Cu—Cr—Zr, выбранном для изготовления отдельных элементов реакторов термоядерного синтеза, таких как, например, опорной конструкции диагностики плазмы «Диверторный монитор нейтронного потока». Этот сплав является предпочтительным из-за повышенных характеристик электропроводности и теплопроводности, а также высоких характеристик прочности.

В настоящей работе рассмотрены исследования влияния воздействия температуры, имитирующей горячее изостатическое прессование, на структуру и свойства сплава. Определена оптимальная температура горячего изостатического прессования в сочетании с последующей термической обработкой, обеспечивающие необходимые физико-механические свойства сплава Cu—Cr—Zr.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ АЛМАЗНЫХ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ CVD-СИНТЕЗА И АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ВЫРАЩЕННЫХ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК

Кириченко А.Н., Родионов Н.Б., Родионова В.П., Трапезников
А.Г.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
akir73@mail.ru*

Создание алмазного материала электронного качества методом CVD требует тщательного контроля качества подложек и процессов, происходящих при синтезе — давление и чистота газов, мощность ВЧ-разряда и температура и т.д. Процесс подготовки подложек и синтеза синтетических CVD алмазов включает ряд этапов.

На первом этапе проводится отбор подложек для выращивания на них CVD алмазных кристаллов. На основании анализа картин двулучепреломления, полученных с помощью оптического люминесцентного микроскопа Olympus VX43, проводится анализ напряженных областей подложек. Требованием для отбора является наименьшее содержание напряженных областей, проявляющихся в виде ярких крестов (двойников) в скрещенных поляризаторах оптического микроскопа.

На втором этапе, на основании анализа картин фотолюминесценции, полученных прибором DiamondView, выбираются подложки с максимальной площадью сектора (001). Прибор также используется и для синтезированных CVD алмазных пленок для отбора образцов, не имеющих желтоватой или красноватой люминесценции при облучении интегрированным в прибор источником УФ излучения.

На третьем этапе все отобранные подложки и синтезированные на них CVD алмазные пленки проходят диагностику оптическими методами (ИК, поглощение в диапазоне 200-800 нм, Рамановское рассеяние и фотолюминесценция) с целью определения степени совершенства кристаллической структуры алмаза и оценки содержания примесей азота и бора. Рамановский конфокальный спектрометр позволяет получить карты распределения интенсивности сигнала как по поверхности образца, так и по глубине.

С помощью автоматизированного исследовательского атомно-силового микроскопа SolverNext компании NT-MDT измеряется шероховатость подложек, при необходимости подложки шлифуются. В результате отбора, выбираются алмазные подложки пригодные для синтеза CVD алмазных кристаллов и пленок электронного качества.

В данной работе представлено исследование CVD алмазной пленки B21, синтезированной на борированных подложках на установке ARDIS-300. Эффективность сбора заряда, полученной пленки более 90 %. Спектры фотолюминесценции, полученные на различной глубине этого образца и распределение интенсивности линии 637 нм по объему образца при возбуждении лазером с длиной волны 532 нм представлены на рисунке 1.

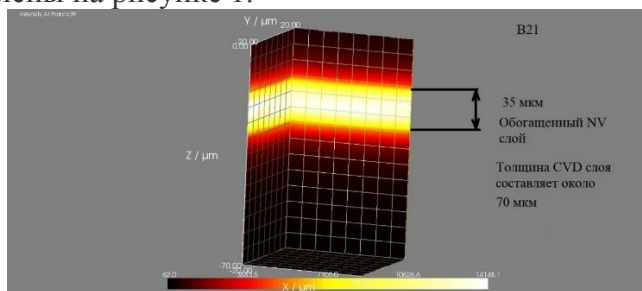


Рисунок 1. Карта распределения интенсивности линии NV(-) центров (БФЛ 637 нм) по объему CVD алмазной пленки B21. Спектры получены при возбуждении лазером с длиной волны 532 нм.

На представленной на рисунке 1 карте более ярким тонам соответствуют области с более высокой интенсивностью линии 637 нм (NV (-) центры). Самая большая люминесценция (ей соответствует белая полоса) наблюдается в слое толщиной 35 мкм, выращенному, который рос в начальный период синтеза. Неравномерность азота объясняется различной концентрацией азота в газовой смеси в различное время синтеза. В начальный период синтеза происходит нагрев стенок аппарата синтеза и десорбция азота, поэтому концентрация азота в газовой фазе растет. С течением времени вводимые в систему газы (метан и водород) вытесняют десорбированный азот, и содержание азот-вакансионных комплексов в последние часы синтеза (верхняя более темная часть на рисунке 1) снижается.

Для синтезированных методом CVD алмазных пленок проведено комплексное исследование кристаллической структуры, выполнен анализ содержания азотно-вакансионных и кремний-вакансионных комплексов. В ходе исследований была установлена неравномерность распределения азота в виде азот-вакансионных комплексов по толщине образца. Содержание комплексов в несколько раз выше в первые часы синтеза, чем в конце синтеза.

Работа выполнена в рамках реализации государственного контракта № Н.4ф.241.09.20.1087 от 05.06.2020 г.

**ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОННОГО
КОМПОНЕНТА ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ
ТОМСОНОВКОГО РАССЯНИЯ В УСЛОВИЯХ
СТАЦИОНАРНЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ
РЕАКТОРОВ И ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ**

Курскиев¹ Г.С., Жильцов¹ Н.С., Коваль¹ А.Н., Корнев² А.Ф.,
Макаров² А.М., Мухин¹ Е.Е., Петров¹ Ю.В., Сахаров¹ Н.В.,
Соловей³ В.А., Толстяков¹ С.Ю., П.В. Чернаков⁴, Горшков⁵ А.В.,
Асадулин⁵ Г.М.

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

² ООО "Лазеры и оптические системы", Санкт-Петербург

³ НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ, Ленинградская обл.,
г. Гатчина

⁴ АО «Спектрал-Тех, Санкт-Петербург

⁵ НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва

Успех крупных термоядерных экспериментов сильно зависит возможностей диагностических систем. Диагностика электронного компонента плазмы методом томсоновского рассеяния (ТР) лазерного излучения позволяет достоверно измерить динамику пространственных распределений температуры $T_e(R,t)$ и концентрации $n_e(R,t)$ электронов. На

основании этих измерений можно определить ключевые параметры плазмы – энергозапас электронного компонента (W_e , β_e), среднее значение плотности ($\langle n_e \rangle$), градиенты температуры и плотности (L_{Te} и L_{ne}), а также в некоторых случаях и скорость тороидального вращения плазмы $V_{tor}(R)$. Данные диагностики ТР необходимы для определения положения магнитной оси и достоверной реконструкции карты полоидального магнитного потока. Знание $T_e(R, t)$ и $n_e(R, t)$ необходимо для исследования протекающих в реакторе физических процессов, влияющих на эффективность нагрева плазмы и её МГД устойчивость, которые определяют мощность генерации высокоэнергичных нейтронов – целевого продукта термоядерного источника нейтронов (реактора). Надежные мониторинговые измерения W_e , $\langle n_e \rangle$ и β_e необходимы для управления режимом работы реактора, а также предотвращения аварийных ситуаций, связанных со срывом тока плазмы. Другой, не менее значимой задачей диагностики ТР является возможность реализации перспективных схем управлением профилем тока плазмы (так называемый «advanced control»). Целью таких схем является оптимизации выхода термоядерной реакции путем управления профилем энерговклада и систем нагрева и генерации неиндукционного тока 0.

Одним из препятствий реализации диагностики ТР в термоядерных реакторах является искажение спектральной характеристики оптической системы вследствие радиационно-наведенного поглощения и загрязнения оптических элементов продуктами эрозии первой стенки [1]. Поскольку режим работы реактора делает крайне затруднительным регулярную спектральную калибровку системы, достоверность данных диагностики ТР будет снижаться со временем. Изменение абсолютной калибровки системы может рутинно отслеживаться по рамановскому рассеянию и путем сравнения профилей плотности со среднехордовыми интерферометрическими измерениями. Вместе с тем, спектральная калибровка требует помещение в вакуумную камеру реактора источника света с известной спектральной характеристикой, что невозможно в условиях работающего реактора. Данная проблема решается с

помощью метода мульти-волнового лазерного зондирования [4]. Этот подход, основанный на одновременном наблюдении сигналов отклика на зондирующее излучение с разными длинами волн, планируется применять во всех трех диагностических системах ТР реактора ИТЭР [5]. Несмотря на то, что были проведены предварительные эксперименты с использованием данного подхода [6], до недавнего времени не было демонстрации экспериментальной системы, соответствующей требованиям, предъявляемым к оборудованию диагностики стационарного реактора.

В докладе приводятся результаты экспериментов по измерению электронной температуры по мульти-волновой лазерной методике на токамаке Глобус-М2. Используются два импульсно-периодических лазерных источника на кристаллах Nd:YAG и Nd:YLF, излучающие на длинах волн 1064 нм и 1047 нм соответственно. Nd:YAG лазер генерирует импульсы с энергией в каждом импульсе ≤ 3 Дж при длительности импульса 10 нс на частоте следования импульсов до 300 Гц. Для Nd:YLF лазера энергия импульсов составляет до 2 Дж при длительности импульса 3 нс на частоте следования импульсов до 50 Гц. Расходимость излучения в дальней зоне у обоих лазеров не превышает значение 1,5 дифракционного предела. Для регистрации сигналов рассеяния применялась система фильтровых спектрометров, оснащенная прецизионной системой регистрации [7]. Особенностью диагностической системы является возможность точной регулировки временной задержки между лазерными импульсами 1064 нм Nd:YAG и 1047 нм Nd:YLF лазеров, обеспечивающей синхронизацию лазерных импульсов с наносекундной точностью. Данная особенность позволяет достоверно определять температуру электронов даже в случае значительного искажения спектрального отклика регистрирующей аппаратуры, что было продемонстрировано в плазменном эксперименте с введением известного искажения спектрального пропускания системы сбора.

В докладе рассматривается возможность и особенности применения лазерной диагностики томсоновского рассеяния для

токамака с реакторными технологиями. Приводится сравнительный анализ для разных сочетаний возможных длин волн и схем зондирования/наблюдения в рамках как традиционной «многоточечной» диагностики ТР, так и в рамках времяпролетной системы типа ЛИДАР, основанной на коммерчески доступных лазерных источниках и детекторах.

Подготовка лазерной системы Nd:YLF 1047 выполнена при частичной финансовой поддержке в рамках выполнения работ по договору № 17706413348210001850/29-21/01 от 28.05.2021 г.

Литература

- [1]. ITER Project Requirements Document [27ZRW8]
- [2]. E.E. Mukhin, R.A. Pitts, P. Andrew, et al 2014 Nucl. Fusion 54 043007
- [3]. Kurskiev,GS; Sdvizhenskii,PA; Bassan 2015, Nucl. Fusion, v.55, 5
- [4]. O. R. P. Smith, C. Gowers, P. Nielsen, and H. Salzmann, Rev. Sci. Instrum. 68, 725 (1997)
- [5]. Bassan M; Andrew P; Kurskiev G et. al.; J. Instrum., v.11, 1, #C01052-2016
- [6]. O McCormack, L Giudicotti et. el., Plasma Phys. Control. Fusion 59 (2017) 055021 (7pp)
- [7]. G.S. Kurskiev, A.I.P. Chernakov, V.A. Solovey et. al., A 963 (2020) 163734

ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ МАКЕТОВ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В УСТАНОВКЕ ПЛМ

Кавыршин Д.И.^{1,2}, Федорович С.Д.¹, Чиннов В.Ф.²,
Карпов А.В.^{1,3}, Будаев В.П.^{1,3}, Лукашевский М.В.¹, Чан Куанг В.¹,
Муравьева Е.А.¹, Мязин А.С.¹, Рогозин К.А.¹, Коньков А.А.¹,
Штелинг В.С.¹, Васильев Г.Б.¹

¹НИУ «МЭИ», Москва, Россия, fedorovichsd@mail.ru

²Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва, Россия,

dimakav@rambler.ru

³НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия,

budaev@mail.ru

С целью исследования эффектов воздействия интенсивной плазменной нагрузки на макеты элементов первой стенки термоядерного реактора в НИУ «МЭИ» создан экспериментальный стенд – ПЛМ (плазменный линейный мультикасп) [1,2]. Установка представляет собой магнитную ловушку с минимумом магнитного поля на оси, плазма в которой создаётся потоком электронов, движущихся от термокатода в левой части установки (см. рис. 1) к аноду. В установке удастся создать стационарный поток гелиевой плазмы и поддерживать его в течение нескольких часов при постоянных параметрах разряда обеспечивая тепловую нагрузку на поверхность мишени до 10 МВт/м².

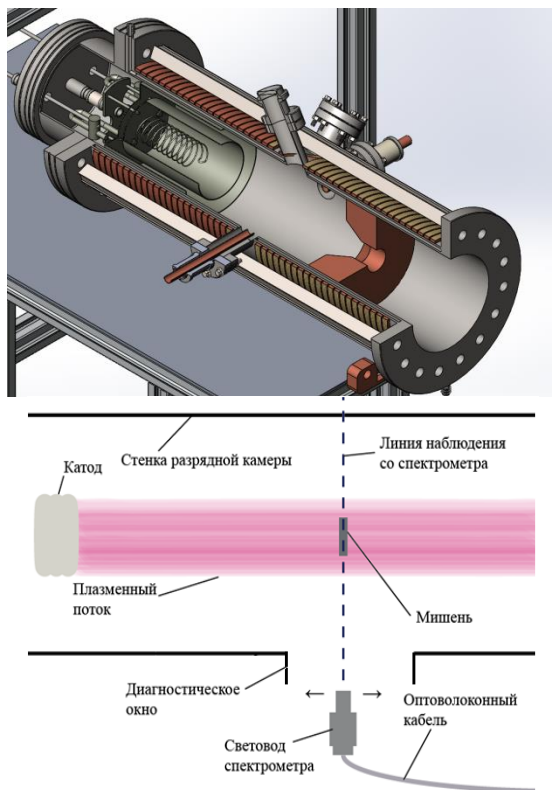


Рис. 1. Разрез установки ПЛМ-2 и схема наблюдения плазмы и образца.

Для контроля параметров плазмы в области ее взаимодействия с испытуемым образцом на установке была организована регистрация оптических эмиссионных спектров. На рисунке 2 представлены спектры излучения плазмы в области ее взаимодействия с мишенью при силе тока разряда 4 и 6 А. Во втором случае к образцу также прикладывается отрицательный потенциал, обеспечивающий повышенный ионный ток и на ее поверхность 0.25 А и, соответственно, увеличивающий тепловую нагрузку. Давление в установке при этом составляет $7\text{-}9\cdot 10^{-3}$ торр, напряжение разряда около 140 В.

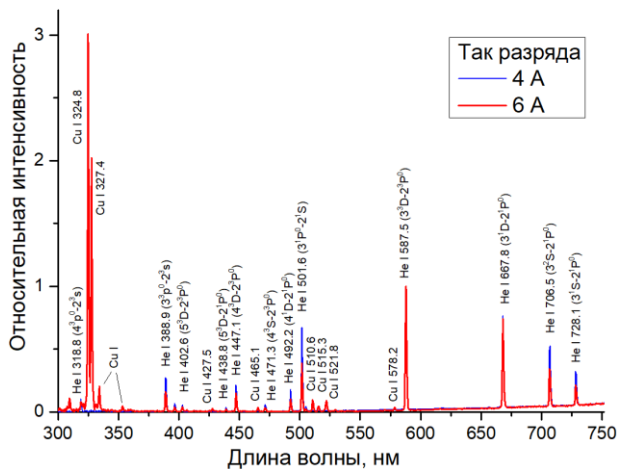


Рис. 2. Зарегистрированные оптические спектры плазмы.

В зарегистрированных спектрах наблюдаются интенсивные спектральные линии атомов гелия, к которым во втором случае добавляются линии атомов меди, указывающие на расплавление и испарение медной подложки испытуемого вольфрамового образца. Подъём сплошного спектра в области больших длин волн связан с тепловым излучением нагретой поверхности мишени. Полученные данные позволяют определить температуру электронов плазмы (1.0÷1.2 эВ) и поверхности испытуемого образца (1800÷1900 К).

Спектроскопическое исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ 21-79-10281, испытания материалов на установке ПЛМ - при поддержке проекта № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д ГК «Росатом» ЧУ «Наука и инновации», оценка радиационных эффектов – при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020, структурный анализ материалов– при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023).

Литература

- [1]. V. P. Budaev, S. D. Fedorovich, M. V. Lukashevsky, M. K. Gubkin, A. V. Lazukin, D. I. Kavyrshin & K. S. Rogozin The PLM Plasma

Device for Tests of Tungsten with Powerful Stationary Heat Plasma Loads. *Phys. Atom. Nuclei* 82, 1281–1291 (2019). <https://doi.org/10.1134/S1063778819090023>

- [2]. V Budaev, S Fedorovich, A D, Yu Martynenko, A Karpov, M Lukashovsky, M Gubkin, A Lubenchenko, A Komov, V Dragunov, A Sliva, A Marchenkov, A Zakharenkov, D Kavyrshin, G Vasilyev, V Tran Quang, K Rogozin, A Konkov Studying of in-vessel component materials under high power electron beam and steady-state plasma loads // *Fusion Engineering and Design*, Volume 167, June 2021, 112335 <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112335>

ПЕРЕЗАРЯДНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПОТОКА ПЛАЗМЫ В РАСШИРИТЕЛЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКИ

Лизунов А.А.

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия <mailto:lizunov@inp.nsk.su>*

Развитие перспективных прикладных приложений линейных систем с магнитным удержанием плазмы подразумевает использование эффективной технологии подавления продольного потока энергии из центральной части. Эти потери энергии связаны с электронной теплопроводностью плазмы вдоль магнитного поля на торцевую стенку. В газодинамической ловушке (ГДЛ) с торцевыми секциями расширителей, основным механизмом продольной термоизоляции плазмы является генерация положительного амбиполярного потенциала, препятствующего проникновению холодных электронов, эмитированных поверхностью абсорбера плазмы, в центр установки через магнитную пробку. Ионы основной компоненты и примесей в вытекающем потоке плазмы ускоряются разностью потенциалов, приобретая дополнительную продольную скорость. Для измерения направленной скорости иона и соответствующей разности электростатического потенциала, а также ионной температуры, использован метод перезарядной спектроскопии (CXRS) с мишенью на основе термальной струи H_2 . Измерения проводились в области расширителя за магнитной пробкой с пробочным отношением $k \leq 1/40$ (по полю в центре), поэтому дополнительная инжекция газа не влияла на параметры плазмы в центральной части. Небольшой угловой разброс в диагностической струе-мишени в сочетании со значительным уменьшением размера наблюдаемой

области в проекции в центральную плоскость ГДЛ, позволили добиться пространственного разрешения измерений CXRS около 0.5 см. Оптическая система регистрации на базе спектрометра с дифракционной решёткой и быстрой CCD камеры, обеспечили соотношение сигнала к шуму в измеряемом спектре порядка 10 при длительности экспозиции 0.5 мс и частоте следования кадров 1.1 кГц. В качестве рабочих спектральных линий, в пилотных измерениях использовались H- α и D- α основной плазмы с длиной волны 656.3 нм и 656.1 нм. Наилучшие результаты были получены в режиме с малой добавкой He и наблюдением доплеровского спектра линий He-I 667.8 нм и 587.6 нм. Абсолютная погрешность измерения потенциала составила около 15 В при величине разности потенциала 250-700 В. В работе представлены результаты измерения динамики потенциала и ионной температуры, поперечный профиль потенциала, зависимость высоты термоизолирующего барьера потенциала от электронной температуры.

РАЗВИТИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ VM1D2V ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРА Н-АЛЬФА НА ХОРДАХ НАБЛЮДЕНИЯ В ОСНОВНОЙ КАМЕРЕ ТОКАМАКА

Неверов В.С.¹, Хуснутдинов Р.И.^{1,2}, Кукушкин А.Б.^{1,2}

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия,

Khusnutdinov_RI@nrcki.ru

²НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

С помощью одномерной по координате и двумерной по проекциям скорости баллистической модели (БМ) рециклинга атомарного и молекулярного водорода в пристеночной плазме токамака, названной VM1D2V [1, 2], проведены численные расчеты функций распределения (ФР) нейтральных атомов водорода по их координате, проекции скорости на перпендикулярное первой стенке направление и модулю проекции скорости на направление вдоль первой стенки для условий периферийной плазмы ИТЭР, смоделированных кодом SOLPS4.3 [3]. С использованием модели VM1D2V проведен расчет спектров высокого разрешения для синтетической Н-альфа диагностики термоядерной плазмы для различных направлений хорд наблюдения относительно первой стенки.

Модель VM1D2V является обобщением на двумерный по проекции скорости случай простой и вычислительно эффективной БМ [4-6] для одномерной по скорости и координате ФР нейтральных атомов и молекул водорода в пристеночной плазме токамака. Обобщение позволяет использовать VM1D2V для интерпретации наблюдений излучения плазмы токамака в спектральных линиях атомов изотопов водорода на хордах наблюдения, направленных под косым углом (не

перпендикулярно) относительно первой стенки вакуумной камеры, и развития синтетической диагностики Н-альфа в ИТЭР.

БМ итеративно решает кинетическое уравнение для ФР атомов и упрощенно решает кинетическое уравнение для ФР молекул, учитывая проникновение медленных нейтралов со стенки в плазму, диссоциацию молекул на атомы и ионизацию атомов и молекул, перезарядку медленных нейтральных атомов на быстрых ионах плазмы, а также упругое и неупругое отражение атомов от стенки, отражение ионов от стенки с их нейтрализацией, поступление молекул со стенки. В качестве входных данных БМ использует профили плотности и температуры ионов и электронов в пристеночном слое плазмы и температуру стенки.

Использование BM1D2V позволит заменить моделирование кодом EIRENE [7] в диагностике Н-альфа в основной камере (но не в диверторе, где одномерная по координате модель неприменима), что намного ускорит решение обратной задачи восстановления плотности потока атомов и молекул со стенки в основной камере по спектрам высокого разрешения линий бальмер-альфа изотопов водорода. Это касается как задач синтетической Н-альфа диагностики [8] для планирования и оптимизации диагностического оборудования и интерпретация будущих экспериментов в токамаках, включая ИТЭР и Т-15МД, так и интерпретации экспериментов в действующих токамаках, в частности, усовершенствования методики, использованной в [9] для общеевропейского токамака JET.

Литература

- [1]. Хуснутдинов Р.И., Кукушкин А.Б., Неверов В.С. Сборник аннотаций XLVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 15 – 19 марта 2021 г, с. 213 (<http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVIII/E/ru/HM-Khusnutdinov.docx>)
- [2]. Кукушкин А.Б., Неверов В.С., Хуснутдинов Р.И. Сборник научных трудов VII Международной конференции «Лазерные,

- плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2021, 23 – 26 марта 2021 г., ч.1. М.: НИЯУ МИФИ, 2021, стр. 384. (<https://conf.laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2021/03/Тезисы.pdf>)
- [3]. Kukushkin A.S., Pacher H.D., Kotov V., Pacher G.W. and Reiter D. 2011 *Fusion Eng. Des.* **86** 2865 (<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.06.009>)
- [4]. Kadomtsev M.B., Kotov V., Lisitsa V.S. and Shurygin V.A. 2012 Proc. 39th EPS Conf. 16th Int. Congress on Plasma Physics (Stockholm, Sweden, 2–6 July 2012) p P4.093 (<http://ocs.ciemat.es/epsicpp2012pap/pdf/P4.093.pdf>)
- [5]. Lisitsa V.S., Kadomtsev M.B., Kotov V., Neverov V.S. and Shurygin V.A. 2014 *Atoms* **2** 195–206 (<https://doi.org/10.3390/atoms2020195>)
- [6]. Kukushkin A.B., Kukushkin A.S., Lisitsa V.S., Neverov V.S., Pshenov A.A., Shurygin V.A. *Plasma Phys. Contr. Fusion* 2021 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6587/abd97f/pdf>)
- [7]. Reiter D., Baelmans M. and Börner P. 2005 *Fusion Sci. Tech.* **47** 172 (<https://doi.org/10.13182/FST47-172>), www.eirene.de
- [8]. Kukushkin A.B., Neverov V.S., Alekseev A.G., Lisigo S.W., Kukushkin A.S. 2016 *Fusion Sci. Tech.* **69** 628 (<https://doi.org/10.13182/FST15-186>)
- [9]. Neverov V.S., Kukushkin A.B., Stamp M.F. et al. 2017 *Nucl. Fusion* **57** 016031 (<https://doi.org/10.1088/0029-5515/57/1/016031>)

МЕТОД РАСЧЕТА СИГНАЛА ПАССИВНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ ДЛЯ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ТОКАМАКАХ

Сдвиженский П.А.¹, Кукушкин А.Б.^{1,2}, Кукушкин А.С.^{1,2},
Левашова М.Г.¹, Лисица В.С.^{1,2}, Неверов В.С.¹, Пшенов А.А.^{1,2},
Ромазанов Ю.А.³, Серов С.В.⁴, Толстихина И.Ю.⁵,
Тугаринов С.Н.⁴, Хуснутдинов Р.И.^{1,2}

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия,

Sdvizgenskii_PA@nrcki.ru

²Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

³Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie und
Klimaforschung—Plasmaphysik, Partner of the Trilateral Euregio
Cluster (TEC), Jülich, Germany

⁴Частное учреждение Государственной корпорации по атомной
энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия

⁵Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва,
Россия

Активная спектроскопическая диагностика (в англоязычной литературе — charge-exchange recombination spectroscopy, CXRS) широко применяется на современных токамаках для измерения таких важных параметров плазмы, как концентрация и распределение примесей, профили ионной температуры и скорость вращения плазмы. Одним из важнейших источников фонового сигнала в CXRS-диагностике является пассивная перезарядка, обусловленная перезарядкой ионов примеси на нейтральных атомах водорода, но не в пучке инжектируемых атомов водорода, а в периферийной плазме. Предсказательное моделирование сигнала пассивной перезарядки

остаётся актуальной проблемой, поскольку требует совместного решения ряда теоретических задач, для чего необходимо сложное численное моделирование (см. [1–4]).

В данной работе, в соответствии с ранее разработанным алгоритмом [3, 4], для одного из расчетных сценариев работы дивертора в ИТЭР выполнены расчеты фонового излучения от пассивной перезарядки для одной из линий иона бериллия Be IV, используемой для диагностики CXRS Edge пристеночной плазмы. Рассчитан вклад перезарядки ионов бериллия Be(+4) на нейтральных атомах дейтерия в основном и первом возбужденном состояниях. При этом использованы сечения реакции перезарядки, в интересующем нас диапазоне невысоких энергий рассчитанные численным кодом ARSENY [5] и другими кодами (анализ существующих данных для перезарядки Be(+4) на водороде был проведен в [6]). Для пространственного распределения основных параметров периферийной плазмы использованы данные из базы данных моделирования диверторной и пристеночной плазмы ИТЭР на основе численного кода SOLPS [7, 8]. Последующие расчеты кинетики рециклинга дейтерия, позволившие рассчитать скорости перезарядки в термодинамически неравновесной плазме, проведены кодом EIRENE [9] и с помощью быстрого кода VM1D2V [10], обобщающего баллистическую модель [11, 12] на случай двумерного распределения по скоростям атомов. Эрозия бериллиевой первой стенки и распределение бериллия в пристеночной плазме рассчитаны кодом ERO2.0 [13]. Расчеты эффективных коэффициентов эмиссии фотонов, излучаемых ионами бериллия Be(+3) в пристеночной плазме, выполнены с помощью кода *nl*-KINRYD [14].

Начальный этап настоящей работы выполнен при частичной финансовой поддержке Частного учреждения Госкорпорации «Росатом» «Проектный центр ИТЭР».

Литература

- [1]. von Hellermann M.G., De Bock M., Marchuk O., Reiter D., Serov S., Walsh M. Atoms 2019, 7, 30. (<https://doi.org/10.3390/atoms7010030>)

- [2]. Serov S.V., De Bock M., von Hellermann M.G., Tugarinov S.N. *Rev. Sci. Instrum.* 2021 92, 053517 (<https://doi.org/10.1063/5.0042029>).
- [3]. Sdvizhenskii P.A., Kukushkin A.B., Levashova M.G., *et al.* In: Proc. 46th EPS Conf. Plasma Phys. Milan, Italy, 2019, ECA, vol. 43C, P4.1006.
- [4]. Сдвиженский П.А., Левашова М.Г., Кукушкин А.Б., Лисица В.С., Неверов В.С., Ромазанов Ю.А., Серов С.В., Толстихина И.Ю., Тугаринов С.Н. Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 4, с. 27–38 (http://vant.iterru.ru/vant_2020_4/3.pdf).
- [5]. Solov'ev E.A. Workshop on Hidden Crossings in Ion-Collisions and in Other Nonadiabatic Transitions. Harvard Smithsonian Centre for Astrophysics, 1991.
- [6]. Sdvizhenskii P.A., Tolstikhina I.Yu., Lisitsa V.S., Kukushkin A.B., Tugarinov S.N. *Symmetry* 2021, 13(1), 16, (<https://doi.org/10.3390/sym13010016>)
- [7]. Kukushkin A.S., Pacher H.D., Kotov V., *et al.* *Fusion Eng. Des.* 2011, 86, 2865.
- [8]. Ligo S.W., Börner P., Kukushkin A., *et al.* *J. Nucl. Mater.* 2011, 415, S965.
- [9]. Reiter D., Baelmans M., Börner P. *Fusion Sci. Technol.* 2005, 47, 172.
- [10]. Кукушкин А.Б., Неверов В.С., Хуснутдинов Р.И. Сборник научных трудов VII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2021, 2021 г., ч.1. М.: НИЯУ МИФИ, 2021, стр. 384 (<https://conf.laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2021/03/Тезисы.pdf>).
- [11]. Kadomtsev M.B., Kotov V., Lisitsa V.S., Shurygin V.A. 2012 In Proc. 39th EPS Conf. 16th Int. Congress on Plasma Physics (Stockholm, Sweden, 2–6 July 2012) P4.093 (<http://ocs.ciemat.es/epsicpp2012pap/pdf/P4.093.pdf>).
- [12]. Kukushkin A.B., Kukushkin A.S., Lisitsa V.S., Neverov V.S., Pshenov A.A., Shurygin V.A. *Plasma Phys. Contr. Fusion* 2021, 63, 035025 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6587/abd97f/pdf>).
- [13]. Romazanov J., Brezinsek S, Kirschner A, *et al.* *Contrib. Plasma Phys* 2019, 60 (5-6), e201900149 (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ctpp.201900149>).

- [14]. Kadomtsev M.B., Levashova M.G., Lisitsa V.S., JETP 2008, 106, 635–649
(<https://link.springer.com/article/10.1134/S106377610804002X>).

ДИВЕРТОРНОЕ ТОМСОНОВСКОЕ РАССЕЙЯНИЕ ДЛЯ Т-15МД

Ю.И. Толпегина^{1,2}, А.В. Горшков¹, Г.М. Асадулин¹,
И.С. Бельбас¹, А.В. Горбунов^{1,3}, Д.Д. Криворучко^{1,4},
А.А. Пшенов¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва

²МГТУ им Н.Э. Баумана, Москва

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

⁴МФТИ ГУ, Долгопрудный МО

Модернизированная установка Т-15МД – токамак с тороидальным магнитным полем $B_{tor} = 2$ Тл, малым аспектным соотношением $A = 2.2$, большой вытянутостью $k = 1.7-1.9$ и током плазмы до 2 МА [1]. Существенной частью физической программы нового токамака являются задачи создания, эволюции и управления диверторными магнитными конфигурациями [2]. Данные задачи требуют наличия ряда активных и пассивных диагностик для исследования диверторной плазмы и оптимизации работы дивертора как одной из наиболее сложных и ответственных систем термоядерной установки.

Диагностику диверторного томсоновского рассеяния (ДТР) предлагается использовать для измерения концентрации (n_e) и температуры (T_e) электронов во внешней ноге дивертора. Вместе с совмещённой диагностикой лазерного индуцированного тушения (ЛИТ) [3], разработанной для измерения концентрации и температуры рабочего газа ($n_a(H,D)$), ДТР позволит проводить эксперименты по исследованию режимов работы дивертора Т-15МД с полным или частичным отрывом плазмы. ДТР и ЛИТ – локальные диагностики, что позволяет проводить измерения в условиях больших градиентов параметров плазмы вдоль и

поперёк магнитного поля без использования сложных интерпретационных кодов [4].

Для зондирования плазмы предлагается использовать лазер Nd:YAG (длина волны 1064 нм) с энергией импульса до $E = 3$ Дж, при длительности в $\tau = 10$ нс. В работе были рассмотрены несколько возможных схем зондирования плазмы, включая вариант с изменением угла наклона лазерного луча с целью “сканирования” дивертора. Полезный сигнал рассеяния и сигнал паразитной засветки излучением лазера, отраженным от стенок вакуумной камеры токамака, будут разделены по времени. В верхней области измерений сбор излучения будет осуществляться атмосферным объективом через горизонтальный патрубок, а исследование нижней области зондирования возможно только внутривакуумной оптикой.

Для регистрации рассеянного излучения предлагается использоваться 4-канальные полихроматоры на основе интерференционных фильтров и лавинных фотодиодов. Моделирование с помощью кода SOLPS показало, что ожидаемый диапазон параметров плазмы в диверторе составит: $T_e = 1-100$ эВ, $n_e = 10^{18}-10^{21}$ м⁻³. Ширины пропускания фильтров полихроматора были оптимизированы для измерения T_e и n_e в ожидаемых диапазонах. Для выбранной геометрии и конфигурации системы произведена оценка точности измерений. При расчете учитывался тормозной фон и шумовые характеристики лавинных фотодиодов.

Для использования схемы зондирования с возможностью сканирования диверторной зоны необходима установка внутривакуумных зеркал. При этом они будут располагаться в непосредственной близости от зоны измерений и точки фокусировки лазерного луча. Рассмотрена возможность проведения измерений с уменьшением энергии импульса лазера для снижения нагрузки на зеркала. При уменьшении энергии до 0,5 Дж ошибка измерений сохраняется в пределах 20%.

Существенный вклад в фоновую засветку также будет вносить излучение поверхности нагретых элементов дивертора,

находящихся в поле зрения системы сбора. Произведена оценка предельной температуры нагрева диверторных пластин, при которой ошибки измерения не превысят 20%.

Литература

- [1]. Khvostenko P.P. и др. Tokamak T-15MD—Two years before the physical start-up // Fusion Eng. Des. Elsevier, 2019. Т. 146, № February. С. 1108–1112.
- [2]. Докука В.Н. и др. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ NUMERICAL SIMULATION OF PLASMA CONTROL IN MODERNIZED TOKAMAK T-15 // ВАЯТ Сер. Термоядерный синтез. 2014. Т. 37, № 3. С. 56–70.
- [3]. Mukhin E.E. и др. Integration of Thomson scattering and laser-induced fluorescence in ITER divertor // Nucl. Fusion. IOP Publishing, 2019. Т. 59, № 8. С. 086052.
- [4]. Neverov V.S. и др. Determination of divertor stray light in high-resolution main chamber $H\alpha$ spectroscopy in JET-ILW // Nucl. Fusion. Institute of Physics Publishing, 2017. Т. 57, № 1. С. 016031.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С НАПУСКОМ АЗОТА И ГЕЛИЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Тюхменева Е.А.¹, Бахарев Н.Н.¹, Гусев В.К.¹, Жильцов Н.С.¹,
Киселев Е.О.¹, Тельнова А.Ю.¹, Толстяков С.Ю.¹, Курские Г.С.
¹, Сахаров Н.В.¹, Минаев В.Б.¹, Петров Ю.В.¹, Щеголев П.Б.¹,
Тимохин В.М.², Векшина Е.О.²

¹*ФТИ им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, РФ,*

tuxmeneva@gmail.com

²*СПБПУ, Санкт-Петербург, РФ*

На сферическом токамаке Глобус-М2 [1] (УНУ «Сферический токамак Глобус-М, входит в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях») примеси исследуются при помощи комплекса диагностик, состоящего из диагностики эффективного заряда плазмы Z_{eff} , спектроскопической диагностики и диагностики мягкого рентгеновского излучения (SXR). Z_{eff} определяется по интенсивности тормозного излучения в спектральных диапазонах в ИК области спектра (948-952 нм, 1019-1040 нм и 1040-1049 нм), регистрируемого фильтровым монохроматором [2]. Спектроскопическая система [3] на установке представлена обзорным спектрометром Avaspec-2048, регистрирующим спектры в диапазоне 200-1100 нм и дискретными монохроматорами на линии С III (465 нм), О II (441 нм), N II (568 нм) и Fe I (427 нм). Многохордовые измерения интенсивности SXR производятся на токамаке с помощью массивов SPD фотодиодов [3, 4].

Во время последней экспериментальной кампании (лето 2021г.) на токамаке Глобус-М2 проводились эксперименты с напуском азота и гелия в диверторную область. Напуск азота в

диверторную область производится для исследования режимов с отрывом и переизлучением энергии на атомах примеси для уменьшения нагрузки на пластины дивертора [5, 6], напуск гелия - для определения температуры и концентрации электронов на периферии [7]. При этом инжектируемая примесь не должна влиять на параметры плазмы в основном объеме. Контролируя содержание примеси в плазме при помощи диагностического комплекса, можно управлять напуском азота и гелия без охлаждения центральной области плазменного шнура.

В данной работе проведено исследование накопления примеси в основном объеме плазмы для разрядов с разными режимами инжекции азота.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-32-90183.

Литература

- [1]. V.B. Minaev et al 2017 Nucl. Fusion 57 066047.
- [2]. Tukhmeneva E. A. et al 2019 Plasma Sci. Technol. 21 105104.
- [3]. Sladkomedova et A. D. al, Rev. Sci. Instrum. 89, 083509 (2018).
- [4]. Tukhmeneva E.A. et al. 47th EPS Conference on Plasma Physics P5.1010.
- [5]. F. Reimold et al 2015 Nucl. Fusion 55 033004.
- [6]. O Février et al 2020 Plasma Phys. Control. Fusion 62 035017.
- [7]. В.М. Тимохин и др. Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 15.
- [8]. L. Delgado-Aparicio et al 2013 Nucl. Fusion 53 043019.

ДИАГНОСТИКА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 – ПРОТОТИП СИСТЕМЫ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Н.С. Жильцов¹ nisovru@gmail.com, Г.С. Курскиев¹,
А.Н. Коваль¹, С.Е. Александров¹, А.Н. Баженов¹,
В.И. Варфоломеев¹, В.К. Гусев¹, Е.О. Киселёв¹,
В.Б. Минаев¹, Е.Е. Мухин¹, А.Н. Новохацкий¹,
М.И. Патров¹, Ю.В. Петров¹, Н.В. Сахаров¹,
В.А. Соловей², Е.Е. Ткаченко¹, С.Ю. Толстяков¹,
П.В. Чернаков³

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ, Ленинградская обл.,
г. Гатчина

³АО СпектралТех, Санкт-Петербург, Россия

Диагностика томсоновского рассеяния (ТР) – укоренившийся инструмент контроля и изучения электронного компонента плазмы. Информация о динамике пространственного распределения температуры и концентрации требуется не только для исследования удержания плазмы, но и для оптимизации протекающих в плазме процессов при помощи расширенного управления токамаком. Отсюда возникают повышенные требования к надёжности диагностики и достоверности её данных.

На сферическом токамаке Глобус-М2 установлен новый комплекс экваториальной диагностики ТР [1] на основе отечественного Nd:YAG лазера [2]. Зондирование осуществляется на длине волны 1064 нм импульсами с частотой

330 Гц и энергией до 3 Дж в каждом. Рассеянное излучение проецируется объективом на оптоволоконные жгуты, которые передают сигнал на фильтровые полихроматоры. Область обзора объектива одновременно покрывает пространство от 26 до 56 см по большому радиусу (большой радиус токамака – 36 см, малый – 24 см).

Сигналы ТР с каждого из 6-ти канальных полихроматоров поступают на высокоскоростной 3,2 Гвыб./с оцифровщик на основе массива переключаемых конденсаторов (CAEN V1743 на базе микросхем SAMLONG). В совокупности с малой длительностью лазерного импульса (10 нс FWHM) это позволяет значительно повысить соотношение сигнал/шум системы регистрации [3]. Осциллографическая запись сигнала также увеличивает достоверность данных диагностики за счёт анализа формы сигнала рассеяния, позволяющего отделять события, не связанные с ТР, такие как попадание в детектор квантов с высокой энергией и сигнал паразитного отражения [4]. Помимо этого, интерес представляет рассеяние лазерного излучения на пыли [5], которое также идентифицируется в новой диагностике по форме зарегистрированных сигналов.

Одновременно сигналы каналов полихроматоров регистрируются на протяжении всего разряда более медленным 500 кГц классическим АЦП. Эти данные несут информацию о собственном излучении плазмы и используются при оценке погрешности сигнала ТР, а также позволяют оценить динамику профиля эффективного заряда плазмы [6].

Высокая чувствительность системы сочетается с низким уровнем собственных шумов специально разработанных усилителей. Ранее была предложена методика оценки погрешности единичного измерения температуры и концентрации электронов методом ТР [7]. Также внимание уделено подавлению систематической ошибки абсолютного измерения, связанных с сильной зависимостью внутреннего коэффициента усиления детекторов от температуры.

В докладе представлено описание нового диагностического комплекса ТР на токамаке Глобус-М2.

Приводится анализ чувствительности и диапазона измеряемых параметров на основе экспериментальных данных. Рабочий диапазон диагностики составляет $5 \cdot 10^{17}$ — $3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ по концентрации и 6—5000 эВ по температуре электронов при использовании унифицированных спектральных приборов [8] во всём диапазоне параметров.

В докладе также показан анализ результатов измерения температуры и концентрации электронов в разрядах токамака Глобус-М2. В частности, приводятся экспериментальные результаты измерения температуры электронов за сепаратрисой. Это открывает возможности не возмущающего измерения методом ТР параметров плазмы в обдирочном слое. Продемонстрирован экспресс способ верификации измерений среднехордовой концентрации электронов на основе исключительно данных магнитной диагностики и ТР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект No 17-72-20076).

Литература

- [1]. N. S. Zhiltsov, et.al., «Thomson scattering diagnostics reconstruction at the Globus-M2», international conference on plasma physics and controlled fusion, 2021.
- [2]. ЛОС, «1 kW LD pumped High Beam Quality Q-switched Nd:YAG laser» 06 2021. https://los.su/images/2020/prod_en/1_kW_LD_pumped_High.pdf.
- [3]. B. Kurzan, et.al., «Signal processing of Thomson scattering data in a noisy environment in ASDEX Upgrade» Plasma Phys. Control. Fusion, т. 46, 2003.
- [4]. J. H. Lee, et.al., «Research of Fast DAQ system in KSTAR Thomson scattering diagnostic» JINST, 12, 2017.
- [5]. S. Krasheninnikov, A. Smolyakov, A. Kukushkin, «Dust in Fusion Plasmas» “On the Edge of Magnetic Fusion Devices”, 2020, pp. 89-114.
- [6]. E. A. Tukhmenova, et. al., «Measurement results of the power of radiation losses and effective ion charge in experiments on the Globus-M2 tokamak» 47th EPS Conference on Plasma Physics, 2021.

- [7]. N. S. Zhiltsov, et.al., «A note on measurement accuracy and thermal stability of filter polychromators for Thomson scattering diagnostics» Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, т. 976, 2020.
- [8]. G. S. Kurskiev, et.al., «Digital filter polychromator for Thomson scattering applications» Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 2020.

ДИНАМИКА НАВЕДЁННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Бондаренко А.В., Кашук Ю.А., Красильников А.В., Скопинцев
Д.А., Тугаринов С.Н., Ярцев В.П.

*Частное учреждение Госкорпорации Росатом «Проектный
центр ИТЭР», г. Москва, РФ, A.Bondarenko@iterrf.ru*

В некоторых диагностических системах ИТЭР предполагается использовать кварцевые световоды для передачи световых сигналов или оптических изображений со стороны плазмы к диагностической аппаратуре. Возможности такого применения световодов в условиях ИТЭР ограничены возникающими в них под воздействием радиации наведённым поглощением света (НП) и радиолоуминесценцией (РЛ) [1]. С точки зрения практического применения актуальным являются исследования радиационно-индуцированных явлений в оптических волокнах. В работе [2] для оптоволоконного датчика ионизирующего излучения измерено отношение полезного сигнала от сцинтиллятора к фону, обусловленному РЛ волокна. Динамика НП также была исследована в процессе облучения оптических волокон на гамма-источнике [3].

В ранее опубликованной нашей работе [4] представлены результаты испытаний восьми типов кварцевых световодов от разных производителей на исследовательском ядерном реакторе ИР-8 (РНЦ “Курчатовский институт”). Пять образцов были изготовлены в фирмах “Гераус” (Германия), “Фуджикура” и “Мицубиши” (Япония). Три образца были разработаны и изготовлены в Научном центре волоконной оптики НЦВО ИОФ РАН. Эти световоды содержали водород, растворённый в стекле и имели герметичное (алюминиевое) покрытие, препятствующее выходу газа из волокна [5]. В ходе испытаний измеряли пропускание и РЛ световодов в процессе их облучения (in-situ).

Предметом обсуждения в [4] было сравнение спектров НП и РЛ для разных типов волокон.

В настоящей работе проводится анализ полученных в эксперименте [4] зависимостей наведённого поглощения $D(t)$ [дБ/м] от времени. Цель работы состояла в исследовании динамики НП в ходе облучения, оценке скоростей изменения НП и выяснении факторов, влияющих на «потемнение-просветление» оптических волокон.

Сценарий испытаний [4] и пример временной зависимости НП для одного из световодов показаны на рисунке 1.

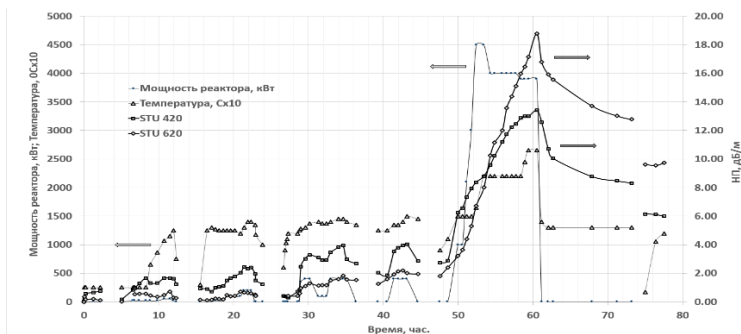


Рисунок 1. Разрывами графиков обозначены ночные перерывы.

Измерения [4] проводились в течение 6 дней, до набора флюенса быстрых (с энергией выше 100 кэВ) нейтронов 10^{18} н/см² и гамма-дозы 16 МГр. Мощность реактора поднималась до 4,5 кВт, плотность потока быстрых нейтронов - до $2.8 \cdot 10^{13}$ н/(см²/с), мощность гамма-дозы до 400 Гр/с. Потоки гамма-излучения и нейтронов в месте расположения облучаемых световодов предварительно были измерены в работе [6]. Температура облучаемых участков изменялась от 30 до 270 °С - с помощью встроенного электронагревателя и за счёт радиационного разогрева. Графики $D(t)$ для разных типов световодов заметно различаются как по своей форме, так и по величине НП, но для всех характерны немонотонный ход и наличие «переменной составляющей», свидетельствующей об «обратимости», в какой-то мере, процессов «потемнения - просветления». На рисунке 1 НП и в синей, и в красной областях

спектра растёт со скоростью, увеличивающейся с мощностью реактора, а распадается с характерным «временем отжига-релаксации» t_{rel} , зависящим от температуры световода. Местами, кривые $D(t)$ рисунке 1 отслеживают ход кривой для мощности; видимо, на этих участках скорости наработки и отжига НП близки по величине. Отметим, что для трёх наводороженных волокон сходство кривых $D(t)$ и $W(t)$ выражено ещё более отчётливо, что говорит о более быстром отжиге НП, по сравнению с другими световодами.

1) Не обсуждая вопрос о том, какие именно частицы и с какой энергией являются определяющими в наработке НП и полагая, что скорость наработки пропорциональна потокам ионизирующих частиц, а значит - мощности реактора W_r , для описания динамики НП мы предлагаем уравнение

$$d/dt (D_K) = A_K * W_r - D_K / t_{rel K} \quad (1)$$

, где K – номер световода, и имеющее решение вида

$$D_K = A * W * t_{rel} * [(1 - \exp(-t/t_{rel}))] \quad (2)$$

, где параметры A_K и t_{rel} зависят от типа световода и длины волны.

2) Визуальный анализ экспериментальных данных с учётом выражений (1) и (2) показывает, что вид графиков $D(t)$ определяется соотношением скоростей процессов, отвечающих за потемнение и отжиг НП. Вышеизложенный подход позволяет качественно описать ход НП для всех восьми типов световодов и объяснить большинство эпизодов, происходивших при изменении условий в ходе испытаний.

3) Попытки оценить параметры A_K и t_{rel} непосредственно из графиков $D(t)$ приводят к большому разбросу вследствие больших ошибок при вычислении производных.

На основании результатов эксперимента [4] проведено исследование роста и отжига НП для восьми типов кварцевых световодов в условиях реакторного облучения. Установлено, что в условиях эксперимента величина НП имела переменную составляющую, ход которой определяется конкуренцией процессов наработки и отжига НП, с чем и связано разнообразие форм графиков.

Полученные предварительные оценки скоростей потемнения и отжига НП, могут быть полезны для прогнозов ресурса световодов в радиационных полях, а также для выбора режимов их работы. Результаты могут быть использованы при планировании экспериментов по исследованию световодов в условиях радиации.

Литература

- [1]. К.Ю. Вуколов, и др. ВАНТ. Серия Термоядерный синтез, 2017, т. 40, в.3, с. 14 – 22.
- [2]. Бондаренко А.В., и др. ПТЭ, 2006 г., №2, с. 46-48.
- [3]. K.Yu. Vukolov, et al. Fusion Engineering and Design. 146 (2019) 796–799 <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.082>
[WOS:000488307400178](https://www.wos.org/wos/doi/10.1016/j.fusengdes.2019.01.082)
- [4]. A.V. Bondarenko, et al. 2 ISSN 0020-4412, Instruments and Experimental Techniques, 2006, Vol. 49, No. 2, pp. 190–198.
- [5]. Tomashuk, A.L., et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2000, vol. 47, no. 3, part 1, p. 693.
- [6]. Kashchuk, Yu.A. et al. Instruments and Experimental Techniques, 2002, no. 4, p. 40.

**СОЗДАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ
СИНТЕТИЧЕСКОЙ НЕЙТРОННОЙ
ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2**

Скрекель О.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Ильясова М.В., Киселев Е.О., Курские Г.С., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Тельнова А.Ю., Толстяков С.Ю., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е., Щёголев П.Б.

Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: fosa97@gmail.com

Одним из основных направлений современных термоядерных исследований является разработка гибридного реактора на основе термоядерного источника нейтронов. Важной частью научной программы компактного сферического токамака Глобус-М2 являются исследования, направленные на создание компактного источника нейтронов ядерного синтеза, что является важным этапом развития гибридных технологий.

Токамак Глобус-М2, являясь модернизированной версией установки Глобус-М, сохранил геометрические параметры вакуумной камеры и плазмы, при этом целевые значения тороидального магнитного поля и тока плазмы были увеличены до 1 Тл и 0.5 МА соответственно [1, 2]. Это привело к уменьшению потерь быстрых частиц, возникающих при инжекции в плазму пучка атомов высокой энергии. Как

следствие, вырос полный нейтронный выход из плазмы, поскольку на установках малых и средних размеров основная доля рожденных нейтронов приходится на реакции взаимодействия быстрых ионов с тепловыми ионами основной плазмы и друг с другом [3].

Данная работа посвящена решению задачи абсолютной калибровки нейтронной диагностики токамака Глобус-М2, модельного расчёта выхода нейтронов из плазмы токамака Глобус-М2 при её инжекционном нагреве и связи результатов моделирования с результатами экспериментов. Для этого был реализован алгоритм расчета пространственной функции источника нейтронов с учетом анизотропии функции распределения быстрых частиц по скоростям [4], а также была выполнена *in situ* калибровка коронных счетчиков нейтронов (СНМ-11 с использованием изотопа ^{10}B), позволяющая связать локально измеренный детектором поток нейтронов с полным нейтронным выходом из плазмы. Помимо этого, в работе приведена полученная по итогам калибровки оценка вклада в сигнал детектора поля рассеянных нейтронов, формируемого в результате взаимодействия нейтронов с конструкционными элементами установки и экспериментального зала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21–72–20007).

Литература

- [1]. Gusev V.K. et al. Nucl. Fusion 53 (2013) 093013
- [2]. Minaev V.B. et al. Nucl. Fusion 57 (2017) 066047
- [3]. Бахарев Н.Н. и др. ФИЗИКА ПЛАЗМЫ. 2020. Т.46. В.7. С.1–10
- [4]. Скрекель О.М. и др. ПЖТФ. 2021. Т.47. В.4. С. 22–25

ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНОЙ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Бахарев Н.Н., Балаченков И.М., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Киселев Е.О., Курские Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Миронов М.И., Мирошников И.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Тельнова А.Ю., Тюхменева Е.А., Чернышев Ф.В., Щеголев П.Б.

Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: bakharev@mail.ioffe.ru

При использовании анализаторов потоков атомов перезарядки в пассивном режиме измерений, регистрируемый сигнал сложным образом зависит от распределения ионов и атомов вдоль линии наблюдения прибора. В частности интерпретация полученных данных затруднена из-за того, что профиль нейтральных частиц, как правило, плохо известен. Создание дополнительной мишени для перезарядки (с помощью инъекции атомов высокой энергии или пеллетов) позволяет локализовать измерения.

В работе рассматривается применение комплекса корпускулярной диагностики нового сферического токамака Глобус-М2 [1] для исследования ионного компонента плазмы. В качестве источника быстрых частиц, а также для создания дополнительной мишени перезарядки использовался инжектор атомов высокой энергии [2] в режиме с инъекцией дейтерия с энергией 28 кэВ и мощностью 800 кВт. Малая ширина пучка (порядка нескольких см) позволила локализовать активный диагностический сигнал, а большая высота (~30 см) – осуществлять измерения в широком диапазоне по высоте. Для измерений потоков атомов перезарядки применялось два анализатора типа АКОРД, которые были оснащены системой

пространственного сканирования. Сканирующая система анализатора АКОРД-12 позволяла перемещать линию наблюдения в вертикальной и горизонтальной плоскости. Данный анализатор использовался преимущественно для изучения распределения тепловых ионов. Сканирующая система анализатора АКОРД-24М позволяла наклонять линию наблюдения анализатора на угол ± 10 градусов относительно экваториальной плоскости. Данный анализатор применялся преимущественно для изучения распределения быстрых ионов.

В первой части доклада рассматривается измерение температуры ионов в плазме токамака Глобус-М2 с использованием активной диагностики атомов перезарядки [3]. Рассмотрены два подхода к восстановлению локальной температуры ионов: полуаналитический и итерационный. Полуаналитический подход позволяет рассчитать температуру ионов с помощью простого выражения, в то время как более сложный итерационный подход обеспечивает большую гибкость. Показан пример реконструкции профиля ионной температуры в компактном сферическом токамаке Глобус-М2 с использованием обоих подходов. Показано хорошее соответствие результатов, полученных с помощью данных методов, друг с другом и с данными активной диагностики спектроскопии перезарядки.

Во второй части доклада рассматривается применение активной корпускулярной диагностики для измерения распределения быстрых ионов. Обсуждаются основные особенности применения диагностики на токамаке Глобус-М2. Измерены энергетическое и пространственное распределения надтепловых ионов дейтерия. Проведено сравнение экспериментальных распределений с результатами расчетов с помощью кода NUBEAM [4].

В третьей части доклада рассмотрена эволюция пространственного и энергетического распределения быстрых ионов при МГД-неустойчивостях. Впервые с помощью активной диагностики атомов перезарядки измерено перераспределение быстрых ионов при тороидальных альфвеновских модах и пилообразных колебаниях при разных экспериментальных

условиях. Тороидальное магнитное поле варьировалось от 0.5 до 0.7 Тл, ток плазмы – от 200 до 350 кА, что сильно повлияло на характер неустойчивостей и, как следствие, на поведение быстрых ионов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 21-72-20007).

Литература

- [1]. V B Minaev et al. 2017 Nucl. Fusion 57 066047
- [2]. В К Гусев и др. 2007 ЖТФ 77 28
- [3]. N N Bakharev et al. 2020 Plasma Phys. Control. Fusion 62 125010
- [4]. A Pankin et al. 2004 Comput. Phys. Commun. 159 157

АНАЛИЗАТОР НЕЙТРАЛОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ДЛЯ ТОКАМАКА ST40

Полосаткин С.В.^{1,2,3}, Белых В.В.¹, Ровенских А.Ф.¹, С. Bradley⁴, V. Nemytov⁵

¹ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия, *s.v.polosatkin@inp.nsk.su*

²НГТУ, Новосибирск, Россия

³НГУ, Новосибирск, Россия

⁴*Tokamak Energy Ltd, Oxfordshire, UK*

Анализ энергетического спектра нейтралов перезарядки является одним из основных методов измерения параметров горячей плазмы в исследовательских термоядерных установках. Для проведения экспериментов на компактном токамаке ST40 [1] был разработан анализатор нейтралов, позволяющий измерять температуру ионов плазмы в диапазоне от 0,5 до 10 кэВ, а также функцию распределения популяции быстрых ионов, возникающей при нейтральной инжекции. Особенностью разработанного анализатора является возможность селекции регистрируемых нейтралов по атомной массе, что позволяет проводить измерения функции распределения ионов водорода (протия) или дейтерия в плазме. Энергетический диапазон анализатора составляет 0-40 кэВ для водорода и 0-20 кэВ для дейтерия, энергетическое разрешение – около 15%.

Общая конструкция анализатора повторяет конструкции анализаторов, ранее изготовленных и использовавшихся на установках С-2 и MST [2]. Покидающие плазму нейтралы ионизируются при прохождении установленной в анализаторе твердотельной обдирочной мишени, ускоряются напряжением, приложенным к фольге, проходят через магнит-сепаратор и электростатический дефлектор и регистрируются линейкой детекторов. Корпус анализатора изготовлен из углеродистой

стали для защиты от рассеянных магнитных полей токамака. Анализатор оборудован встроенным источником ионов с электростатической ионизацией газа (типа Байарда-Альперта) для калибровки и контроля целостности обдирочной мишени.

В качестве обдирочной мишени в анализаторе используется углеродная фольга толщиной 10 нм. Использование твердотельной мишени, в отличие от газовой, позволяет реализовать возможность подачи напряжения на мишень и электростатического доускорения ионов в анализаторе, что упрощает конструкцию и использование анализатора. В то же время повышенное рассеяние в фольге приводит к ухудшению энергетического разрешения (особенно существенного для низкоэнергетических каналов) и требует учета при проектировании.

Анализатор построен по схеме с параллельным магнитным и электрическим полем, что позволяет получить разделение частиц по энергиям (в горизонтальной плоскости) и массам (в вертикальной плоскости) Магнитное поле в магните-сепараторе создается набором постоянных NdFeB магнитов. Для уменьшения размеров и массы анализатора магнит-анализатор отклоняет частицы на угол в диапазоне от 45 до 120 градусов, при этом специально подобранная форма полюсов в магните позволяет увеличить дисперсию для ионов больших энергий. Форма электростатических дефлекторных пластин рассчитана для направления ионов различных энергий на сдвинутую по вертикали линейку детекторов. Выбор массы регистрируемых ионов проводится путем одновременного изменения напряжения на обдирочной фольге и дефлекторных пластинах.

Детекторная линейка состоит из 15 каналотронов MAGNUM 5900 (Photonis) [3]. Эти детекторы могут работать как в счетном, так и в токовом режиме. С точки зрения удобства измерений счетный режим предпочтителен, так как не требует учета нелинейности при больших токах и различия в коэффициентах усиления детекторов. Поскольку длительность разряда токамака ST40 не превышает нескольких секунд, в анализаторе используется метод прямого быстрого

осциллографирования сигналов с детекторов с последующим поиском и подсчетом импульсов. Для регистрации применяется шестнадцатиканальная осциллографическая система SPECTRUM DN6.441-16 с частотой дискретизации 130 МГц и разрешением 16 бит. В счетном режиме система позволяет регистрировать импульсы с частотой до 5 МГц, что достаточно для обеспечения требуемого временного разрешения 1 мс. При необходимости измерений с большим временным разрешением эта система может быть также использована в токовом режиме при пониженных коэффициентах усиления детекторов для обеспечения линейности их откликов.

При проектировании анализатора было использовано полное моделирование прохождения частиц от попадания в фольгу до регистрации детектором с использованием программ SRIM (прохождение частиц через вещество) и COMSOL (магнитные и электрические поля, движение заряженных частиц). Результаты моделирования достаточно хорошо совпали с результатами калибровки, проведенной после изготовления анализатора. В настоящее время анализатор используется в регулярных экспериментах на токамаке ST40 для измерения ионной температуры плазмы и функции распределения популяции быстрых ионов.

Литература

- [1]. M. Gryaznevich, “Faster fusion: ST40, engineering, commissioning, first results,” AIP Conf. Proc., vol. 2179, 2019, doi: 10.1063/1.5135481.
- [2]. S. Polosatkin et al., “Neutral particle analyzer for studies of fast ion population in plasma,” Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 720, pp. 42–44, 2013, doi: 10.1016/j.nima.2012.12.039.
- [3]. “Photonis Magnum 5900.” <https://www.photonis.com/products/channeltron-electron-multipliers>.

О СТАТУСЕ ДВОЙНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

М.А.Драбинский¹, А.В.Мельников^{1,2,3}, Л.Г.Елисеев¹,
Н.К.Харчев^{1,4}, С.Е.Лысенко¹, Ф.О.Хабанов¹, Н.А.Вадимов^{1,2},
О.Д.Крохалев^{1,2}, М.С.Горбун^{1,2}, Г.А.Саранча^{1,2}, Е.И.Гуцевич¹,
Т.Ю.Прокофьева¹, К.О.Недбайлов²

¹НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: nrcki@nrcki.ru,
Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

²НИУ МФТИ, e-mail: info@mipt.ru, Московская область, г.
Долгопрудный, Институтский пер., 9

³НИЯУ МИФИ, e-mail: info@mephi.ru, Москва, Каширское ш., 31

⁴ИОФ РАН им. А.М.Прохорова, e-mail: office@gpi.ru, Москва, ул.
Вавилова, д.38

На текущий момент в состоянии разработки проекта находится диагностический комплекс зондирования пучком тяжёлых ионов (ЗПТИ, англ. Heavy ion beam probe – НІВР). ЗПТИ – активная корпускулярная диагностика, позволяющая проводить измерения локального электрического потенциала плазмы и его колебания, локальных колебаний электронной плотности и флуктуации полоидального магнитного поля.

На токамаке Т-15МД планируется установка двойной диагностики ЗПТИ [2], расположенных в сечениях, сдвинутых по тороидальному обходу на 90° (см. рис.1). Аналогичной системой из двух диагностик обладает стелларатор TJ-II (СИМАТ, г. Мадрид, Испания), которая позволила совершить значительный прогресс в исследованиях турбулентности и зональных течений [3,4].

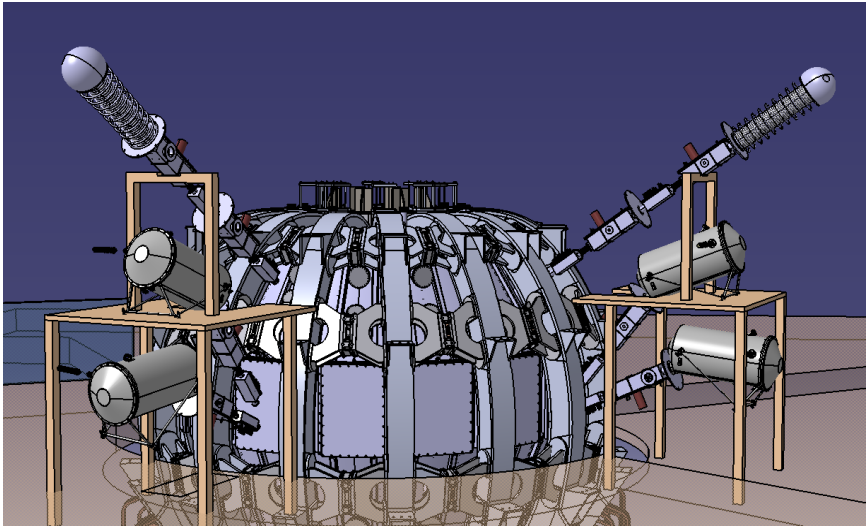
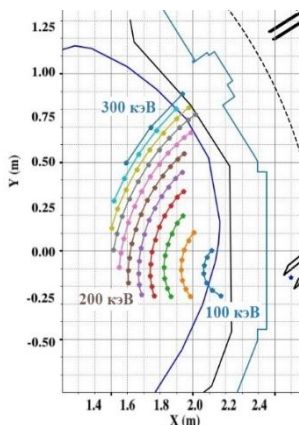


Рис.1 Расположение двойной диагностики ЗПТИ на токамаке Т-15МД

Условия установки Т-15МД позволяют проводить измерения с помощью ЗПТИ в диапазоне $0 < \rho < 1$ в режиме с $V_t = 1$ Тл, $I_{p1} = 1$ МА. При этом энергия зондирующих ионов не превышает 300 кэВ (рис.2а). В режимах с высокими параметрами плазмы ($\langle n \rangle = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $T_{e0} = 6$ кэВ) зондирующий пучок будет испытывать заметное ослабление (вплоть до отношения тока зондирующего пучка к току на детекторе $I_{\text{det}}/I_0 = 10^{-9}$, см. рис.2б). Для проведения измерений в таких условиях необходимо повышать ток пучка до уровня $I_{\text{beam}} = 1$ МА при стандартных значениях $I_{\text{beam}} = 100\text{-}300$ мкА, а также фокусировать зондирующий пучок в области измерений.

а)



б)

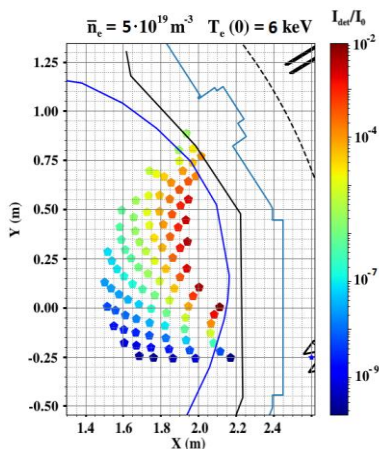


Рис. 2 а) Детекторная сетка ЗПТИ для режима $V_t = 1$ Тл, $I_{pl} = 1$ МА; б) Отношение тока зондирующего пучка к току детектора в различных областях детекторной сетки, $\langle n \rangle = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $T_{e0} = 6$ кэВ

Для повышения токов зондирующего пучка в НИЦ «Курчатовский институт» разрабатываются новые таллиевые термоионные эмиттеры (см. рис. 3а). Фокусировка ионного пучка осуществляется ионно-оптической системой (ИОС) инжектора ЗПТИ, работающей по принципу трёхэлектродной линзы. Расчёт оптимальных параметров ИОС проводился с помощью кода IbSimu [5]. Для отработки параметров ИОС инжектора ЗПТИ, полученных в расчётах с помощью IbSimu и получения таллиевых пучков с $I_{beam} = 1$ МА создан высоковольтный стенд (рис.3б).

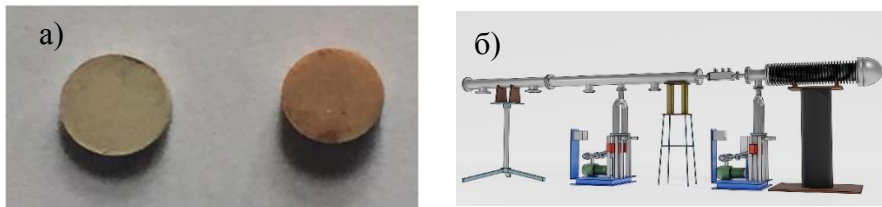


Рис.3 а) Галлиевые термоионные эмиттеры, изготовленные в НИЦ «Курчатовский институт» б) Трёхмерная модель высоковольтного стенда

Литература

- [1]. P. P. Khvostenko et al, Experimental Thermonuclear Installation Tokamak T-15MD, 2020, Physics of Atomic Nuclei,
- [2]. M.A. Drabinskiy et al, Conceptual design of the heavy ion beam probe diagnostic for the T-15MD tokamak, 2019, Journal of Instrumentation
- [3]. L.G. Eliseev et al, 2D distribution of plasma potential and density in the ECRH and NBI plasmas in the TJ-II stellarator, 2020, IAEA FEC
- [4]. A.V. Melnikov et al, Heavy ion beam probing—diagnostics to study potential and turbulence in toroidal plasmas, 2017, Nucl. Fusion 57 072004
- [5]. T. Kalvas et al, IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics, 2010, Review of scientific instruments

РАЗРАБОТКА МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА ДЛЯ D-D НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Кормилицын Т.М., Обудовский С.Ю., Кащук Ю.А., Хафизов Р.Р.,
Родионов Р.Н., Панкратенко А.В., Джурик А.С.

Частное учреждение "ИТЭР-Центр", г. Москва, Россия,
t.kormilitsyn@iterrf.ru

Обширный комплекс нейтронных диагностик токамак-реактора ИТЭР позволяет проводить измерения ключевых параметров горячей плазмы – полного нейтронного выхода, термоядерной мощности, профиля нейтронного источника и ионной температуры. Важным этапом в процессе подготовки нейтронных диагностик к работе в реальных условиях является калибровка нейтронных диагностик *in situ*. Оптимальным решением задачи внутрикамерной калибровки является использование портативного нейтронного генератора с газонаполненной трубкой, размещаемого на специальном манипуляторе в заранее выбранных точках внутри вакуумной камеры ИТЭР [1,2]. Сценарий *in situ* калибровки предполагает использование на первом и втором этапе D-D нейтронного генератора.

Таким образом, возникает актуальная задача исследования особенностей поля излучения D-D нейтронного генератора. Данная работа сфокусирована на разработке эскизного проекта монитора нейтронного выхода для такого генератора. В качестве прототипа генератора рассмотрен нейтронный генератор НГ-24 с дейтериевой трубкой и выходом 10^9 нейтр./с. Используя предложенный в работе [3] метод регистрации D-D нейтронов с помощью сцинтилляционного кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$, разработан проект нейтронно-спектрометрического комплекса из детекторов, размещаемых в нескольких точках вокруг мишени нейтронного

генератора. Метод цифрового разделения частиц по форме импульса позволяет минимизировать влияние сопутствующего гамма-излучения на отклик детекторов и, как следствие, обеспечивает более точные измерения нейтронного выхода D-D нейтронного генератора.

Используя проектные характеристики монитора, НГ и данные о коммерчески доступных размерах чувствительных элементов детекторов, проведено моделирование излучения нейтронного генератора. Модель учитывает особенности нейтронного поля генератора – анизотропию по потоку и энергии. На основании расчетов определены оптимальные размеры и расположение детекторов. Сформулированы предложения об устройстве системы управления и сбора данных предлагаемого нейтронно-спектрометрического комплекса.

Работа выполнена в рамках реализации Рабочего соглашения №1 (ITER ref. IO/21/СТ/4300002349) между Международной организацией ИТЭР, Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и ФГУП «ВНИИА» «Исследование и разработка технического проекта компонентов нейтронных генераторов пригодных для in-situ калибровки нейтронных диагностик ИТЭР».

Литература

- [1]. M. Sasao, L. Bertalot, M. Ishikawa, and S. Popovichev, “Strategy for the absolute neutron emission measurement on ITER,” in Review of Scientific Instruments, Oct. 2010, vol. 81, no. 10, p. 10D329, doi: 10.1063/1.3491049.
- [2]. T. Nishitani et al. «Neutronics Assessment of a Compact D-D Neutron Generator as a Neutron Source for the Neutron Calibration in Magnetic Confinement Fusion Devices», Plasma and Fusion Research, Vol. 15, 2402017 (2020)
- [3]. Т.М. Кормилицын и др., “О регистрации быстрых нейтронов сцинтилляционным детектором $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ ”, Журнал Письма в ЭЧАЯ, 2021, Т.18, №1(233), С 86-97, doi: 10.1134/S154747712101009X.

АНАЛИЗ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА ХЛОРИДА ЛАНТАНА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

^{1,2}Кормилицын Т.М., ^{1,2}Панкратенко А.В., ³Шевелев А.Е.,
³Хилькевич Е.М., ³Ильясова М.В., ¹Джурик А.С.,
^{1,2}Кащук Ю.А.

¹Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, a.pankratenko@iterrf.ru

²Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Московская область, Россия

³Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В работе представлены результаты исследование функции отклика нового сцинтилляционного спектрометра быстрых нейтронов на основе кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$. Предложенный в работе [1] метод регистрации нейтронов в области энергий D-D нейтронов с помощью этого детектора имеет значительный потенциал для современных установок УТС, работающих с дейтериевой плазмой. Регистрация быстрых нейтронов основана использовании продуктов реакции $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}_{g.s.}$.

Функции отклика детектора с кристаллом размера $\text{Ø}25.4 \times 25.4$ мм были исследованы в двух экспериментах: в поле излучения нейтронного генератора ИНГ-07Д, а также в ходе экспериментальной кампании на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе с использованием дискретного энергетического распределения нейтронов, рожденных в результате ядерной реакции $^9\text{Be}(\alpha,n)^{12}\text{C}$ при облучении бериллиевой мишени альфа-частицами. В обоих экспериментах оцифровка сигнала детектора производилась быстрым АЦП частотой дискретизации 500 МГц и разрядностью 12 бит.

В ходе подготовки к работе со сцинтилляционным детектором на основе $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ проведена калибровка энергетической шкалы детектора с использованием эталонных γ -источников ОСГИ и по собственному фону α -излучения. С помощью цифрового метода разделения сигналов по форме импульса выделены сигналы, соответствующие зарегистрированным нейтронам. Исследована возможность использования детектора в качестве монитора потока быстрых нейтронов. Полученные амплитудные спектры, а также результаты моделирования отклика детектора с помощью ПО GEANT4 [2] позволили оценить p/β -отношение для данного кристалла, исследовать зависимость световых выхода кристалла от энергии налетающего нейтрона в диапазоне от 1.5 до 5 МэВ, оценить чувствительность и энергетическое разрешение спектрометра.

Полученные результаты позволяют говорить о перспективности использования детектора $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ в целях спектрометрии быстрых нейтронов в диапазоне энергий D-D нейтронов, в том числе при экспериментах с дейтериевой плазмой на действующих токамаках.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.21.1038 от 11 мая 2021 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

Литература

- [1]. Т.М. Кормилицын и др., “О регистрации быстрых нейтронов сцинтилляционным детектором $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ ”, Журнал Письма в ЭЧАЯ, 2021, Т.18, №1(233), С 86-97, doi: 10.1134/S154747712101009X.
- [2]. J. Allison et al., “Recent developments in GEANT4,” Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 835, pp. 186–225, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.nima.2016.06.125.

КОМПАКТНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Ильясова М.В.¹, Шевелев А.Е.¹, Хилькевич Е.М.¹, Минаев В.Б.¹,
Дойников Д.Н.¹, Полуновский И.А.¹, Найденов В.О.¹, Гусев В.К.¹,
Петров Ю.В.¹, Сахаров Н.В.¹, Бахарев Н.Н.¹, Корнев В.А.¹,
Новохатский А.Н.¹, Щеголев П.Б.¹, Скрекель О.М.¹, Тельнова
А.Ю.¹, Варфоломеев В.И.¹

*¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук, 194021, С.-Петербург, Россия,
m.iliasova@mail.ioffe.ru*

Сферический токамак Глобус-М был модернизирован в 2018 году. Модернизированная установка получила название Глобус-М2 [1]. В результате модернизации были достигнуты следующие параметры плазмы: $I_p = 0.4$ МА, $B_T = 0.8$ Т для дейтериевой плазмы [2]. Кроме того, на токамаке Глобус-М2 был запущен второй инжектор нейтральных атомов, и стала возможна одновременная инжекция двух нейтральных пучков в тангенциальном направлении с максимальной энергией инжектируемых атомов 30 кэВ и 50 кэВ, соответственно, а максимальная инжектируемая мощность достигает 2 МВт [3].

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе в ходе модернизации токамака Глобус-М2 была усовершенствована система нейтронной диагностики: в дополнение к двум газоразрядным счетчикам на основе изотопа ^{10}B были использованы два компактных нейтронных спектрометра на основе жидкого органического сцинтиллятора ВС501-А. Спектрометры предназначены для измерения спектров нейтронного излучения из плазмы токамака Глобус-М2 для оптимизации условий NBI нагрева и оценки эффективности нагрева. ВС501-А спектрометры были откалиброваны на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе с помощью моноэнергетичных нейтронов, рожденных в реакции $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$, с применением метода нейтрон-гамма совпадений. В результате

калибровки были получены функции отклика детектора на моноэнергетическое нейтронное излучение, а также эффективность регистрации нейтронов в зависимости от их энергии. Кроме того, для повышения точности измерения полного потока нейтронов из плазмы была проведена *in situ* калибровка всей системы нейтронной диагностики с использованием Am-Be нейтронного источника.

На токамаке Глобус-М2 изучались разряды дейтериевой плазмы с инжекцией пучка дейтерия, в которых генерируются потоки DD-нейтронов с энергией ~ 2.45 МэВ. С помощью компактных нейтронных спектрометров в данных разрядах были проведены измерения спектров нейтронного излучения, рожденного в плазме, сделаны оценки выхода нейтронов во время разряда плазмы, скорости DD-реакции и времени удержания быстрых ионов дейтерия.

Литература

- [1]. Minaev, VB et al, Nucl. Fusion **57** (2017) 066047
- [2]. Yu.V. Petrov et al, Proceedings of 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2020), 10–15 May 2021, virtual event
- [3]. Minaev, VB et al, 46TH EUROPEAN PHYSICAL SOCIETY CONFERENCE ON PLASMA PHYSICS, EPS 2019, 2019, P4.1084

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЗОНД ДЛЯ КОМПЛЕКСА ИЗМЕРЕНИЙ В ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК С ЦЕЛЬЮ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПЛАЗМА-СТЕНКА

Л.Б. Беграмбеков, А.В. Грунин.

Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ), Москва, Россия, lbbegrambekov@mephi.ru

Взаимодействие плазмы с первой стенкой, диафрагмами, дивертором термоядерных установок порождает целую серию явлений в той или иной степени отрицательно влияющих на параметры плазмы. Их исследование и попытки на этой основе предотвратить развитие указанных явлений или ослабить их негативное воздействие на плазму чрезвычайно актуально. Активизация таких исследований определяется ещё и тем, что с большей интенсивностью разворачиваются работы по исследованию взаимодействия плазмы с кандидатными материалами будущего поколения термоядерных установок.

В термоядерных установках для получения информации о взаимодействии плазмы с материалами плазменной камеры используются различные диагностические устройства. В результате, оказывается сложным, а зачастую невозможным, проведение одновременно и в одной области плазмы комплекса измерений, необходимых для достоверного анализа исследуемых процессов и явлений. В итоге, затрудняется формирование заключений по результатам измерений, затягиваются и удорожаются термоядерные исследования.

Многофункциональный зонд вводимый в периферийную плазму термоядерной установки сможет одновременно

выполнять *in situ* весь объём измерений, требуемый для понимания причин и условий развития исследуемого процесса, явления и т.п.; производить измерения на этапах разряда, указываемых управляющей программой установки, и автоматически обрабатывать результаты измерений. В итоге, облегчится интерпретация полученных данных и формирование однозначных заключений по результатам измерений и, в итоге, ускорятся и удешевятся исследования на термоядерных установках.

Зонд выполняется в виде малоразмерного многофункционального устройства, вводимого в периферийную плазму, не оказывающего заметного влияния на её параметры и способного проводить комплекс исследований периферийной плазмы на различных этапах разряда. Зонд включает материаловедческую и масс-спектрометрическую секции, расположенные в защитном кожухе, а также внешние устройства: зонд Маха, зонды Ленгмюра, экспонируемые в плазме образцы. Кроме того, зонд обеспечивается системой автоматического управления и системой обработки результатов измерений, которые могут быть интегрированы в систему управления токамака.

Материаловедческая секция зонда состоит из двух идентичных устройств, способных выполнять следующие операции с участием частиц, проникающими в полость зонда через отверстия в кожухе на противоположных сторонах зонда. Регистрацию *in situ* потока частиц твердотельной примеси и измерение *in situ* скорости распыления исследуемых материалов ионами плазмы в реальном времени. Экспонирование образцов в плазме для изучения долговременного воздействия плазмы на материалы. Аккумуляцию для последующего анализа атомов твердотельной примеси на поверхности собирающих пластин, а также быстрых частиц плазмы, имплантированных в их объём. Извлечение образцов и собирающих пластин, расположенных внутри и вне кожуха, можно будет производить после вывода зонда через вакуумный шлюз на любом этапе работы токамака без прерывания его работы.

Масс-спектрометрическая секция сможет выполнять следующие функции. Масс-спектрометрический анализ ионов плазмы и примесей в скрещенных $E \times H$ полях (электрическое поле плоского конденсатора и собственное магнитное поле токамака). Измерение полных токов ионов плазмы и примесей. Регистрация потока частиц твердотельной примеси также (как в материаловедческой секции). Измерение полного тока электронов при развороте зонда входным отверстием на электронную сторону.

Диапазоны и параметры измерений, выполняемых многофункциональным зондом

- *In situ* анализ потоков атомов твердотельной примеси. Разрешение: один-два осаждённых на коллектор атомных слоёв ($\approx 10^{15}$ ат \times см $^{-2}$), при общем количестве слоев на коллекторе в диапазоне 20-100, и 2-5 атомных слоев ($\approx 5 \times 10^{15}$ ат \times см $^{-2}$) в диапазоне 100-1000 напыленных слоев на коллекторе.

- *In situ* масс-спектрометрический анализ потока ионов плазмы в диапазоне отношений массы иона к заряду ($m/Z=1 \div 100$). Разрешение регистрации увеличивается с уменьшением параметра m/Z от трех до десяти. Минимально регистрируемая концентрация примеси вольфрама составляет 0.01%.

- *In situ* анализ энергии ионов водорода в диапазоне энергий (1÷500 эВ). Разрешение $E/\Delta E$ составляет ≈ 10 .

- Измерение числа Маха для потоков плазмы;

- Аккумуляцию на коллекторе атомов твердотельной примеси плазмы с захваченными в осаждённом слое атомов газов для последующего анализа.

- Внедрение в коллектор атомов и ионов плазмы и примесей для последующего анализа.

В зависимости от задачи исследования можно будет использовать различные методы анализа осаждённых слоёв и внедрённых газов. В том числе:

▪ Термодесорбционная спектрометрия (TDS) – анализ атомов и молекул газов в диапазоне 1-200 а.е.м. Предел регистрации скорости десорбции $(2 \div 3) \times 10^{12}$ частиц/см 2 сек.

- Растровая электронная микроскопия (РЭМ) с разрешением не хуже, чем 10 нм

- Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДС) в диапазоне от 100 эВ до 30 кэВ с последующей ZAF коррекцией.

- Вторично-ионная масс-спектрометрия (SIMS) – регистрация ионов в диапазоне $m/Z=1\div 300$, чувствительность регистрации 10^{-5} ат.%, разрешение по глубине $0.2\div 0.4$ нм;

- NRA – распределение по глубине элементов С, N, O, В. Разрешение по 0.5-1 ат. %

- Резерфордское обратное рассеяние (RBS) – чувствительность метода $0.01\div 10$ ат. % в зависимости от элемента регистрации, разрешение по толщине слоя 5-20 нм.

Эффективное разделение заряженных частиц в масс-спектрометрической секции возможно при тороидальном магнитном поле токамака более 0.5 Тл, поэтому, зонд может найти применение в токамаках Т-15МД, КТМ, ТРТ.

При магнитном поле токамака в несколько тесла поперечный размер поперечный размер зонда составляет ≈ 30 мм и увеличивается до $\times 60$ мм в условиях токамака КТМ, с магнитным полем примерно 0.5 Тл.

Автоматизированный многокомпонентный зонд с масс-спектрометром в шлюзовой камере и с соответственно модифицированной конструкцией, по-видимому, будет полезен для изучения возможностей и условий использования в токамаке жидкометаллической «первой стенки», для анализа особенностей взаимодействия плазма-стенка в токамаке со значительным радиоактивным фоном и, наконец, в качестве диагностической системы при эксплуатации подобных токамаков. Проведение с использованием многофункционального зонда достаточно полного объема измерений взаимодействия плазмы с кандидатными материалами позволит выявить слабые стороны исследуемых материалов, разработать на этой основе варианты нейтрализации возможных негативных последствий их использования.

ОТКРЫТИЕ ГЕНЕРАЦИИ В ПЛАЗМОФОКУСНОМ РАЗРЯДЕ УЗКОНАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДД- НЕЙТРОНОВ

В.Е. Аблесимов, А.Г. Малькин, О.Ю. Пашарина

*Федеральное Государственное Унитарное Предприятие
«Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной
физики», 607188, г.Саров Нижегородской обл., пр. Мира, 37,
ablesimov@elph.vniief.ru*

Результаты обработки зависимостей от времени сигналов сцинтилляционных детекторов в условиях измерений в помещении ограниченных размеров и моделирование этих временных зависимостей методом Монте-Карло позволяют сделать вывод о наличии в плазмофокусном разряде особого процесса генерации узконаправленного по оси плазмофокусного устройства пучка нейтронов, дополняющего два общеизвестных процесса – термоядерный и ускорительный «луч-мишень».

Моделирование методом Монте-Карло формирования сигнала сцинтилляционного детектора для конкретных условий эксперимента позволило воспроизвести временную картину зависимости сигнала, совпадающую с соответствующими особенностями экспериментальной осциллограммы. При моделировании рассматривалась суперпозиция двух независимых источников нейтронов - генерирующего нейтроны во всех направлениях и узконаправленного (narrowly focused) нейтронного пучка с угловой расходимостью 3° между осью устройства и образующей конуса.

Анализ результатов измерений и моделирования сигнала детектора позволил оценить количественные характеристики

узконаправленного по оси плазмодифокусного устройства пучка нейтронов. Интегральный выход узконаправленного пучка может быть сравним с интегральным выходом за счет других механизмов генерации нейтронов в ПФ и оценивается в рассмотренных измерениях величиной $\sim 10^{10}$ нейтрон/разряд. Длительность генерации узконаправленного пучка нейтронов не превышает нескольких десятков наносекунд. Угловое расхождение пучка оценивается величиной $\pm(3^\circ-5^\circ)$ от оси плазмодифокусного устройства.

Моделирование особенностей экспериментальных осциллограмм не привязано к описанию результатов в конкретном разряде, а демонстрирует и объясняет единственно возможную причину возникновения (формирования) зарегистрированных результатов измерений.

РЕГИСТРАЦИЯ ПРОДУКТОВ D-D РЕАКЦИЙ АЛМАЗНЫМ СПЕКТРОМЕТРОМ НА УСТАНОВКЕ ГЕЛСИС

Артемьев К.К.¹, Амосов В.Н.¹, Родионов Н.Б.¹, Мещанинов С.А.¹,
Обудовский С.Ю.¹, Скопинцев Д.А.¹, Негодаев М.А.²,
Далькаров О.Д.², Русецкий А.С.².

¹Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,

k.artemev@iterrf.ru

²ФГБУ ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия,

negodaevma@lebedev.ru

Установка ГЕЛСИС, созданная в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, позволяет получать непрерывные пучки ионов с током до 50 мА и энергиями до 50 кэВ и предназначена для решения широкого круга-экспериментальных задач, таких как исследование излучения при столкновении легких ядер с энергией в десятки кэВ, изучение элементарных и коллективных процессов в ионно-пучковой плазме, исследование взаимодействий ионного пучка с различными материалами [1].

Алмазный спектрометр, созданный на основе разработанного в ЧУ «ИТЭР-Центр» радиометра быстрых нейтронов (РБН-А1), используется для исследований ядерных реакций при взаимодействии ионов дейтерия с различными мишенями. Состав алмазного спектрометра: алмазный детектор, зарядочувствительный преусилитель, блок усилителя-формирователя, АЦП, персональный компьютер. Алмазный детектор устанавливается внутри вакуумной камеры.

Перед проведением экспериментов выполнялась процедура калибровки энергетической шкалы измерительного тракта алмазного спектрометра. Для калибровки использовались

альфа-источники (Ra^{226} , Am^{241}), набор источников ОСИКЭ (Cs^{137} , Bi^{207}) и прецизионный генератор импульсов.

В данной работе представлены зарегистрированные алмазным спектрометром спектры продуктов взаимодействия пучка ионов дейтерия (D^+) с различными мишенями (Ti , TiD_2 , поликристаллический алмаз) на ускорителе ионов ГЕЛИС (ФИАН). Проведены эксперименты с пучками ионов D^+ с энергией 15-35 кэВ для различных (-15 – +15) углов поворота мишени.

В ходе взаимодействия дейтонов с дейтерием в мишени регистрировались продукты ядерных реакций: p , t , He^3 . Полуширина на полувысоте зарегистрированных пиков p , t и He^3 – 2,5 %, 10%, 21%, соответственно. Схема эксперимента представлена на рисунке 1.

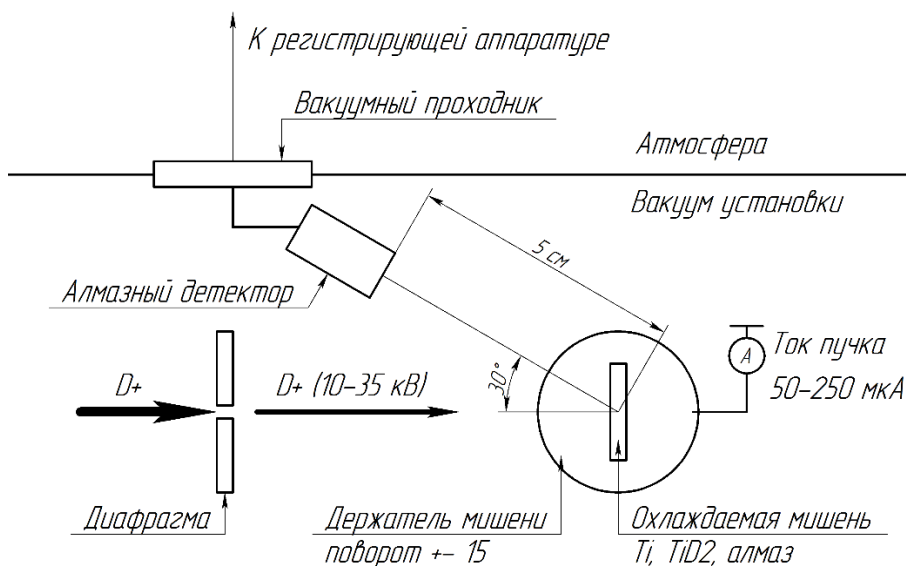


Рисунок 1 - Схема эксперимента

В ходе экспериментов показано, что алмазный спектрометр является эффективным инструментом для измерения характеристик частиц, возникающих в ядерных реакциях при

взаимодействии дейтонов с различными мишенями. Эксперименты показали, высокую чувствительность алмазного спектрометра к регистрируемым частицам, позволяющим обнаруживать 1 событие в секунду.

Работа выполнена в рамках реализации дополнительного соглашения № 313/1672-Д-2 к договору № 313/1672 от 05.09.2019 «Разработка инновационных средств диагностики высокотемпературной плазмы, потоков частиц и излучения»

Литература

- [1]. Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С., Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2017, Т. 48, Выход. 5, С. 589-600.

ИНЖЕКТОР АТОМОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ В С-2W С БЫСТРОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПУЧКА

Н.В.Ступишин, В.П. Белов, А.А. Бруль, Р.В. Вахрушев, В.И. Давыденко, П.П. Дейчули, А.А. Иванов, А.В. Колмогоров, В.В. Колмогоров, В.В. Орешонок

*Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия, Stupishin@inp.nsk.su*

Для диагностики плазмы с обращенной магнитной конфигурацией (FRC) в установке С-2W (ТАЕ, США) [1] был разработан и запущен инжектор быстрых атомов водорода с энергией 40-44 кэВ с модулированным эквивалентным током атомов до 9 А. Длительность импульса 30 мс. Инжектор используется для создания активной мишени в плазме в условиях мощной до 21 МВт инъекции нагревных пучков, чтобы измерять локальные параметры плазмы с помощью активной спектроскопии (CXRS).

С декабря 2019 г. инжектор используется на С-2W в качестве штатной диагностики. В марте-апреле 2021 г. была проведена модернизация инжектора и системы питания, нацеленная на увеличение эквивалентного тока атомов и повышение стабильности характеристик пучка в течении импульса.

На рис. 1 представлен общий вид диагностического инжектора.

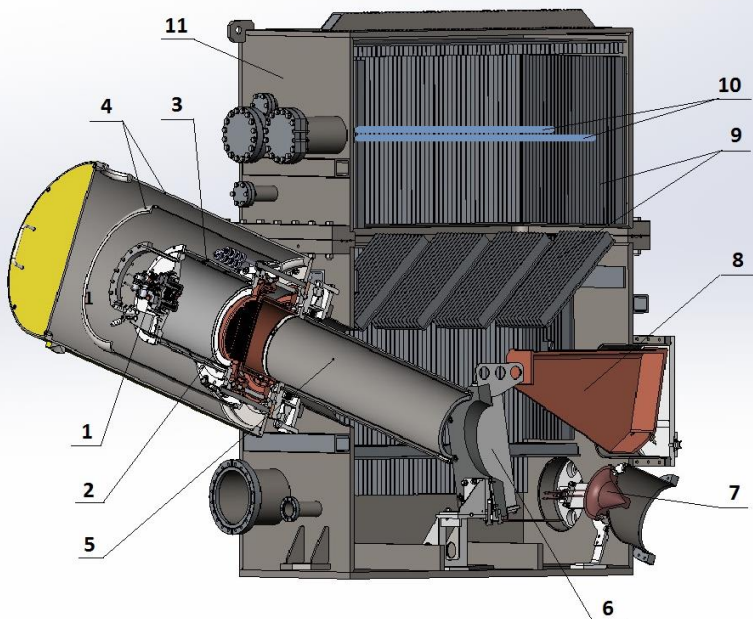


Рис.1 Общий вид диагностического инжектора в разрезе:
 1- генератор плазмы, 2- ИОС, 3- камера с магнитной стенкой, электромагнитные экраны, 5- нейтрализатор, 6- отклоняющий магнит, 7- подвижный приемник пучка, 8- приемник ионов, 9- облицовка камеры с оребрением, 10- титановые испарители, 11- вакуумный бак инжектора.

Плазменная струя из генератора дугового типа с компактным диафрагмированным каналом вытекает в расширительную камеру с периферийным магнитным полем, создавая плазменный эмиттер. Пучок ионов формируется многоапертурной четырехэлектродной ионно-оптической системой (ИОС) с баллистической фокусировкой из 919 круглых апертур диаметром 4 мм. Для фокусировки пучка на расстоянии 3 м на оси плазменного шнура электроды ИОС имеют сферическую форму. После ускорения ионный пучок частично преобразуется в атомы в перезарядной газовой мишени нейтрализатора.

Вакуумный объем инжектора откачивается титановой пленкой, напыляемой на внутренние поверхности камеры. Напыление осуществляется в импульсном режиме раз в 2-3 минуты с помощью титановых дуговых испарителей в виде стержней, расположенных горизонтально в верхней половине вакуумной камеры. Стенки камеры покрыты пластинами с оребрением, которые увеличивают эффективную площадь внутренней поверхности примерно в 3 раза до 10 м^2 . При комнатной температуре для водорода достигается скорость откачки около 200 000 л/с. Рабочее давление в камере между импульсами 10^{-7} - 10^{-8} тор.

Помимо относительно высокого тока пучка в цепи вытягивания ~ 15 А и компактного пучкового тракта, особенностью инжектора является возможность быстрой модуляции пучка с частотой до 10 кГц. Это позволяет проводить диагностику плазмы с высоким временным разрешением.

При разработке пучка было заложено несколько принципиально разных способов модуляции пучка. Относительно низкочастотная модуляция пучка до 1-2 кГц выполняется с помощью модуляции высоковольтного импульса. Система питания обеспечивает быстрое включение и отключение полного ускоряющего напряжения 40 кВ. При таком способе происходит 100% модуляция полной мощностью пучка ионов (0.6 МВт).

Были также реализованы два способа высокочастотной модуляции 5-10 кГц с глубиной модуляции до 50-60%.

Первый способ связан с модуляцией пучка с помощью вытягивающего напряжения в 4-х электродной ИОС. При увеличении напряжения между первым и вторым электродами на величину 30-50%, пучок расфокусируется и плотность тока в области измерения падает примерно в 2,5 раза. Полный ток пучка при этом сохраняется.

Второй способ заключается в быстрой модуляции потока плазмы на эмиттер. Это достигается быстрой перекоммутацией тока разряда между анодным электродом и плазменной камерой. Эффективность генерации плазмы при этом меняется в 2-3 раза. Величина тока разряда остается постоянной.

В зависимости от требований диагностики может быть применен один из приведенных способов модуляции пучка.

Литература

- [1]. Gota, H., et al. Formation of hot, stable, long-lived field-reversed configuration plasmas on the C-2W device. *Nuclear Fusion* 2019, vol. 59, pp. 112009.

СЕКЦИЯ

6

*Микроволновые и
субмиллиметровые методы
диагностики*

**СТАТУС РАБОТ ПО СИСТЕМЕ
РЕФЛЕКТОМЕТРИИ СО СТОРОНЫ СИЛЬНОГО
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИТЭР**

Субботин Г.Ф.^{1,2}, Вершков В.А.^{1,2}, Шелухин Д.А.^{1,2}, Петров В.Г.²,
Лукьянов В.В.^{1,2}, Горбунов А.В.¹, Молчанов Д.С.², Сарычев
Д.В.^{1,2}, Соловьев Н.А.^{1,2}

¹*НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия,
subbotingf@gmail.com*

²*Координационный Центр «Управляемый Термоядерный Синтез
– Международные Проекты», Москва, Россия*

Рефлектометрия – активная диагностика плазмы, основанная на регистрации отражённого СВЧ сигнала. Электромагнитная волна заданной частоты отражается от слоя плазмы, положение которого зависит от локальных значений электронной плотности, температуры и магнитного поля. Рефлектометрия со стороны сильного магнитного поля ИТЭР (HFSR) предоставляет данные о параметрах мелкомасштабных возмущений плазмы, профиле электронной плотности в разряде и среднехордовой электронной плотности [1].

В 2020 году система успешно прошла защиту финального проекта закрытых компонентов волноводного тракта,

расположенных в галерее уровня 2. В ноябре 2021 года должна состояться защита финального проекта по внутрикамерным компонентам передающей линии диагностики, поставка которых запланирована на 2022 год.

Изготовление закрытых компонентов волноводной линии в галерее уровня 2 здания токамака завершено, идёт подготовка к отправке их на площадку ИТЭР. Каждая волноводная секция состоит из пары медных волноводов с общими фланцами на концах. Фланцы закреплены на волноводах с помощью высокотемпературной пайки. Данный процесс прошел квалификацию по стандартам ИТЭР и обеспечивает точность позиционирования фланцев относительно номинального положения волноводов 50 мкм. На фланцах закрепляется корrugированная фольга толщиной 20 мкм, предотвращающая перетекание электромагнитного излучения между волноводами (crosstalk). Каждый компонент в поставке, включая элементы креплений, имеет гравировку или табличку с серийным номером детали, ее идентификатором компонентной базы ИТЭР и функциональный код.

В настоящий момент продолжается оптимизация геометрии волноводной линии и анализ ожидаемых потерь мощности передаваемого сигнала. Для внутрикамерных компонентов была выполнена оценка потерь в случае смещения волноводной линии при приварке креплений к стенке вакуумной камеры. Расчеты показали рост потерь в среднем на 2.2 дБ при тороидальном смещении опор на 1 мм от номинального положения. Для компенсации этого эффекта была доработана конструкция хомутов, удерживающих волноводы.

Критическим для системы является волноводный поворот в области промежуточного пространства (interspace) на выходе из зоны порта. Для этого участка был разработан алгоритм параметрической оптимизации, совмещающий математический анализ потерь мощности в данном участке и расчеты механической прочности поворота оптимизированной формы [2].

Данные о среднехордовой электронной плотности предоставляет канал диагностики, расположенный в 8

экваториальном порту и работающий в режиме рефрактометра. В отличие от системы в верхних портах, проходящей выше большинства конструкций в атмосферной части порта, данный канал проходит в тесном окружении других диагностик в центральной области порта. Для рефрактометрического канала ведется разработка быстроразъемных фланцевых соединений и системы стыковки с вакуумным окном, обеспечивающих возможность беспрепятственного обслуживания систем экваториального порта.

В 2020-2021 годах активно ведется развитие системы управления и сбора данных рефлектометрии. Система совмещает в себе преимущества разрабатываемого узкоспециализированного оборудования с решениями CODAC, предлагаемыми ИТЭР, что позволяет оптимизировать систему с точки зрения стоимости и гибкости архитектуры. Для контроля параметров диагностического оборудования и возможности масштабирования единичных решений было предложено использовать модули управления на базе микроконтроллеров STM. При этом регистрация данных диагностики и технической информации подсистем полностью выполняется с помощью каталожных компонентов CODAC, обеспечивая высокий уровень синхронизации и низкий уровень фазового шума.

Для тестирования волноводной линии и системы сбора данных и управления диагностикой создан испытательный стенд. На стенде включает в себя функциональный макет рефлектометра и системы сбора данных для отработки взаимодействия отдельных модулей и тестирования алгоритмов обработки данных. В 2021 году разработана конструкторская документация для изготовления полномасштабного макета внутрикамерной части передающей линии рефлектометрии.

Литература

- [1]. V. Vershkov, M. Manso, G. Vayakis, A. J. Sanchez, D. Wagner, C. Walker, S. Soldatov, L. Kuznetsova, V. Zhuravlev, B. Sestroretskii, ITER Joint Central Team and Russian and EU Home Teams, "ITER Reflectometry Diagnostics for the Main Plasma" in Diagnostics for

Thermonuclear Fusion Reactors 2, 1998, Plenum Press, New York, pp 107-118

- [2]. A. Novokshenov, A. Nemov, D. Shelukhin, V. Lukyanov, A. Gorbunov, V. Vershkov, Multidisciplinary optimization of the waveguide transmission line for ITER HFS reflectometry, Fusion Engineering and Design, Volume 168, 2021, 10.1016/j.fusengdes.2021.112406

ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА AD8302 ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗЫ В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ТОКАМАКА Т-15МД

Дрозд А.С., Сергеев Д.С., Игонькина Г.Б.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В НИЦ «Курчатовский институт» подготавливается вертикальный канал СВЧ-интерферометра токамака Т-15МД [1, 2] для измерения средней электронной плотности плазмы и для управления развитием хода плотности через обратную связь.

Схема вертикального канала СВЧ-интерферометра токамака Т-15МД представлена на Рис. 1. В синтезаторе генерируются от одного задающего кварцевого резонатора REF сигналы с частотами 7,282 ГГц, 7,280 ГГц, 85 МГц, и выводится задающий сигнал кварца ВС (10,0 МГц). Сигналом 7,282 ГГц после его умножения по частоте в 44 раза в передатчике проводится зондирование плазмы токамака Т-15МД. В приемнике зондирующее излучение поступает в смеситель по второй гармонике, куда приходит умноженный в 22 раза по частоте сигнал 7,280 ГГц. На выходе формируется сигнал ПЧ1 (80 МГц), который в блоке синтезатора поступает на ещё один смеситель, куда также подается сигнал 85 МГц. В результате формируется сигнал ПЧ2 (5,0 МГц), он поступает в систему обработки вместе с сигналом ВС (10,0 МГц), а их частоты отличаются ровно в два раза.

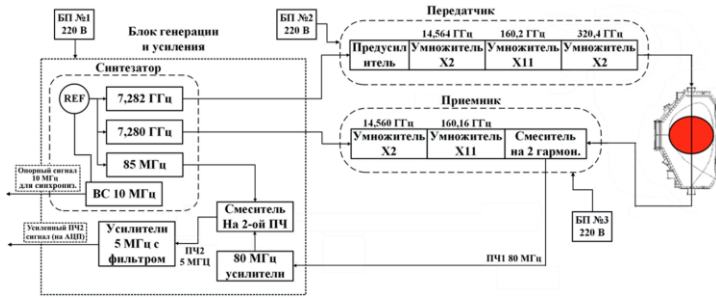


Рис. 1. Схема вертикального канала СВЧ-интерферометра токамака Т-15МД

Для определения разности фаз между сигналами ПЧ2 и ВС разработан прибор на основе детекторов AD8302 и микроконтроллера STM32. На вход AD8302 подаются два сигнала одинаковой частоты (до 2,7 ГГц), на выходе формируется сигнал, который почти во всей области 0- π пропорционален разности фаз между подаваемыми сигналами. Нелинейные области фазовой характеристики усложняют применение детектора, например, для определения разницы фаз, большей π .

Предложена схема (Рис. 2) с использованием двух фазовых детекторов AD8302. Поскольку AD8302 получает на вход два сигнала одинаковой частоты, то сигнал ВС (10,0 МГц) предварительно делится по частоте в 2 раза, а затем поступает с задержкой в 90° на один из детекторов. Таким образом, хотя бы один из детекторов находится в линейной области фазовой характеристики. Выходные сигналы подаются на микроконтроллер STM32, где и фиксируется изменение фаз.

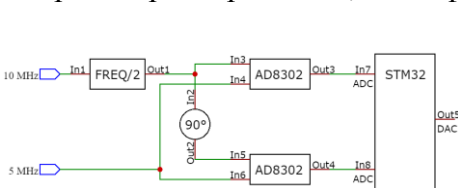


Рис. 2. Упрощенная блок-схема устройства

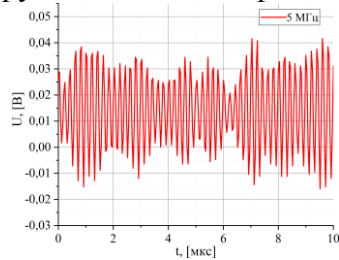


Рис. 3. Сигнал ПЧ2, обрабатываемый прибором

Основываясь на [3], оценена скорость изменения фазы в измерительном сигнале вертикального канала СВЧ-интерферометра токамака Т-15МД. В основных стадиях разряда (кроме моментов инжекции пеллет и срывов), фаза изменяется со скоростью до 6×10^4 рад/с (10 кГц в пересчете на изменение частоты), а общий набег фазы будет достигать 60 полос по 2π .

Тестирование прибора проходило в лабораторных условиях на сигналах с генератора и на сигналах СВЧ-интерферометра. Анализ записанных данных показал надежную работу прибора даже при подаче сильно зашумленного сигнала (Рис. 3) и при расстройке сигналов по частотам до 33 кГц для имитации изменения фазы в сигналах интерферометра. Точность определения фазы сигналов и быстродействие позволяет использовать фазометр в контуре управления плотностью в плазменном разряде токамака Т-15МД через обратную связь по напуску рабочего газа.

Литература

- [1]. Хвостенко П.П. и др. Экспериментальная термоядерная установка токамак Т-15МД. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 15 - 38.
- [2]. Сергеев Д.С., Неруш М.Н. Анализ возможности измерения электронной концентрации плазмы токамака Т-15МД зондированием электромагнитными волнами субмиллиметрового диапазона. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 2, с.49-56.
- [3]. Е.П. Горбунов, Д.С. Сергеев и др. Измерение HCN-лазерным интерферометром на токамаке Т-10 быстрых изменений плотности плазмы // XV Всероссийская конференция "Диагностика высокотемпературной плазмы". 2013. 3-7 июня.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ СОБСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В МЕСТЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ АНТЕННЫ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Минашин П.В.¹, Кукушкин А.Б.^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия,
Minashin_PV[at]nrcki.ru

²НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

Из-за высоких значений электронных температур и сильного магнитного поля в ИТЭР, в отличие от токамаков предыдущего поколения, собственное электронное циклотронное (ЭЦ) излучение плазмы будет играть значительную роль в локальном электронном энергобалансе [1-2], а также будет являться источником тепловых и электромагнитных воздействий на внутрикамерные компоненты и диагностики [3].

В наиболее энергонапряженных разрядах в ИТЭР ЭЦ-излучение из плазмы превосходит рассеянное излучение от систем ЭЦ резонансного нагрева и поддержания тока [3]. Для собственного ЭЦ-излучения плазмы (в отличие от рассеянного внешнего ЭЦ-излучения) необходимо дополнительно исследовать его спектральную зависимость, поскольку поглощение в металлических стенках заметно зависит от частоты излучения. Такой расчет особенно важен для российской поставочной диагностики «Рефлектометрия со стороны сильного магнитного поля», а также для всех других диагностик, использующих миллиметровые волны: рефлектометрии со стороны слабого магнитного поля, рефлектометрии положения плазмы, коллективного томсоновского рассеяния, так как линии передач этих диагностик позволяют транспортировку выходящих

из плазмы ЭЦ-волн и даже проведение дополнительных измерений их спектра [4]. Внутрикамерные волноводы для рефлектометрии со стороны сильного магнитного поля планируется использовать как волноводы для наблюдения излучения необыкновенной ЭЦ-волны диапазона частот 10 – 98 ГГц и для наблюдения излучения обыкновенной ЭЦ-волны в диапазоне частот 15 - 155 ГГц. Несмотря на то, что рабочие диапазоны частот для этой диагностики существенно ниже циклотронной частоты и ее гармоник в ИТЭР (>170 ГГц), антенны и волноводный тракт могут принимать весь спектр излучения на частотах выше 10 ГГц. При этом поглощение и выделение тепла в окнах и остаточная мощность на приемных миксерах определяется как исходной мощностью ЭЦ-излучения из плазмы, так и омическими потерями в волноводе, сильно растущими с ростом частоты.

В работе представлены расчеты спектральной мощности собственного ЭЦ-излучения плазмы в месте расположения антенны рефлектометрии в ИТЭР. Расчеты проведены для спектрального диапазона восприятия антенны (на частотах выше 10 ГГц) с учетом поглощения излучения в плазме и его отражения от стенок вакуумной камеры для различных сценариев работы ИТЭР. В расчетах применяется разработанный ранее метод [5-6] моделирования спектральной мощности собственного электронного циклотронного (ЭЦ) излучения плазмы, основанный на применении кода SYNEQ [7-9] для расчета спектральной интенсивности ЭЦ-излучения в диапазоне частот с немалыми номерами гармоник ЭЦ-частоты (а именно, с $n \geq 3$), и использовании модели сильно запертого чернотельного излучения для гармоник ЭЦ-частоты с номерами $n = 1$ и $n = 2$.

Проведенные расчеты для максимально возможных значений коэффициента отражения ЭЦ-излучения от стенок вакуумной камеры показывают актуальность задачи детального исследования возможного воздействия собственного ЭЦ-излучения плазмы на внутрикамерные элементы различных диагностик в ИТЭР.

Авторы благодарны Д.А. Шелухину и В.А. Вершкову за постановку задачи и обсуждения результатов. Начальный этап настоящей работы выполнен при частичной финансовой поддержке Частного учреждения Госкорпорации «Росатом» «Проектный центр ИТЭР».

Литература

- [1]. Albajar F., Bornatici M., Cortes G., Dies J., et al., Nuclear Fusion, 2005, 45, 642-648.
- [2]. Kukushkin A.B., Minashin P.V., Polevoi A.R., Plasma Physics Reports, 2012, 38, 211-220.
- [3]. Oosterbeek J.W., Udintsev V.S., Gandini F., Hirsch M., et al., Fusion Engineering and Design, 2015, 96-97, 553-556.
- [4]. Udintsev V.S., Vayakis G., Bora D., Direz M.F., et al., EPJ Web of Conferences, 2012, 32, 03013.
- [5]. Minashin P.V., Kukushkin A.B., Proc. 46th EPS Conference on Plasma Physics, Milan, Italy, 2019, ECA, 43C, P2.1010.
- [6]. Минашин П.В., Кукушкин А.Б., Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез, 2019, 42, 14-20.
- [7]. Kukushkin A.B., Proc. 14th IAEA Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Wuerzburg, Germany, 1992, IAEA, 2, 35-45.
- [8]. Kukushkin A.B., JETP Letters, 1992, 56, 487.
- [9]. Kukushkin A.B., Minashin P.V., Proc. 36th EPS Conference on Plasma Physics, Sofia, Bulgaria, 2009, ECA, 33E, P-4.136.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА НА ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В РЕФРАКТОМЕТРИИ ИТЭР

Афонин А.Ю.^{1,2}, Петров В.Г.¹

¹УТС-Центр, Москва, Россия

²МФТИ, Москва, Россия, aleksandr.afonin@phystech.edu

Подсистема рефрактометрии, являющаяся частью системы рефлектотометрии со стороны сильного магнитного поля 55.F9 HFSR, предназначена для измерения интеграла электронной плотности на ИТЭР, используя зондирование микроволновым излучением в окне прозрачности плазмы на необыкновенной волне (40-90 ГГц) [1]. Генератор излучения находится со стороны слабого магнитного поля (LFS), приемник излучения – со стороны сильного магнитного поля (HFS).

Требования к точности измерений плотности определены в Project Requirements (PR) и System Requirement Document (SRD)-55 [1, 2]: в промежутке от 10^{18} до 4×10^{20} м⁻³ требуемая точность для интегральной электронной плотности плазмы составляет 1%.

С другой стороны, точность определения плотности, которую может обеспечить рефрактометрия, представлена в [3], где точность измерения плотности для он-лайн значений находится в пределах от 2% до 10 % в зависимости от временного разрешения (10 мс или 1 мс).

В чите 25 (на CDR) была сформулирована задача исследования влияния различных параметров разряда на определение интеграла плотности в рефрактометрии ИТЭР. Эта работа рассматривает влияние одного из параметров плазмы, а именно – вертикального смещения плазменного шнура, которое на ИТЭР ожидается в пределах от -0,7 до 0,2 м.

Для определения влияния вертикального смещения плазмы, в качестве примера был использован сценарий разряда с током 15 МА с Н-mode. В этом сценарии плазма зондировалась горизонтально, в экваториальной плоскости.

В данной работе использовался метод восстановления профиля плотности, приближенный к методу, планируемому на ИТЭР – восстановление профиля плотности проводилось путем минимизации невязки, предполагая зондирование на четырех разных частотах. Профиль электронной плотности плазмы $n_e(\psi)$ в этом сценарии описывался в виде функции.

$$3 \times 10^{20} \times \alpha_1 \times \exp\left(-\left(\frac{\psi}{\alpha_2}\right)^2\right) \times \exp\left(-\left(\frac{\psi}{\alpha_3}\right)^{\alpha_4}\right),$$

где α_{1-4} – оптимизируемые параметры функции, ψ – нормализованный тороидальный поток.

Пример исходного и восстановленного значения интегральной электронной плотности приведен в таблице 1. Пример восстановленного профиля плотности из четырех измерений (на частотах 50, 60, 75, 90 ГГц) времени задержки сигнала в плазме для того же сценария и времени приведены на рисунке 1. В качестве моментов времени роста тока и квазистационара для основного сценария ИТЭР использовались моменты времени $t_1 = 34.5921$ с and $t_2 = 300$ с. Также было оценено влияние ошибок измерения электронной температуры (в случае учета релятивистских эффектов) и тороидального поля, а так же был рассмотрен сценарий с половинным полем.

Результаты оценок подтверждают необходимость получения информации с других диагностик: поскольку точность выходит за допустимые пределы при перемещении плазмы по вертикали, для получения требуемой точности необходимы данные о вертикальном положении плазменного шнура. Также подсистеме рефрактометрии необходима информация о тороидальном магнитном поле и, в случае учета релятивистских эффектов, об электронной температуре плазмы.

Таблица 1. Значения исходной и восстановленной интегральной электронной плотности ($\langle nl \rangle$ и $\langle nl \rangle^{est}$ соответственно) в основном сценарии ИТЭР (15 МА, Н-mode, 300 с) без учета погрешностей измерений

$\langle nl \rangle$	$\langle nl \rangle^{est}$
$3.66 \times 10^{20} \text{ м}^{-2}$	$3.68 \times 10^{20} \text{ м}^{-2}$

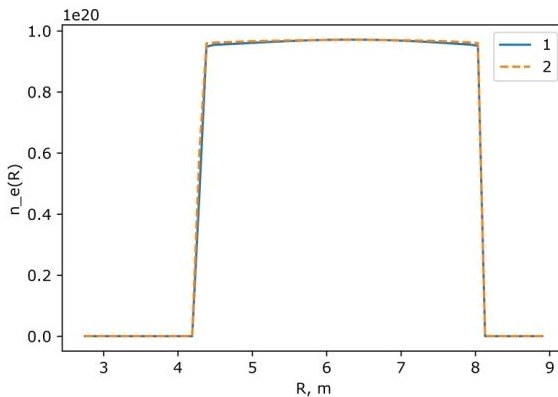


Рисунок 1. Сравнение исходного и восстановленного профиля электронной плотности $n_e(R)$ в основном сценарии ИТЭР (15 МА, Н-mode, 300 с) без учета погрешностей измерений. 1 – исходный профиль плотности, 2 – профиль плотности, восстановленный минимизацией невязки.

Литература

- [1]. System Design Description (DDD) 55.F9 Reflectometry High Field Side (3WD9DT v3.0) (current)
- [2]. Project Requirements (PR) (27ZRW8 v6.3)
- [3]. Sub-System Requirement Document sSRD-55.F9: Reflectometer (Main Plasma, HFS) (WYWRVL v1.0).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ПРИ НЕМОНОТОННОМ ПРОФИЛЕ ПЛОТНОСТИ МЕТОДАМИ РЕФРАКТОМЕТРИИ И РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В ИТЭР

Афонин К.Ю.^{1,2}

¹УТС-Центр, Москва, Россия

²МФТИ, Москва, Россия, kirill.afonin@phystech.edu

Обычно профиль электронной плотности плазмы в координатах потока поля монотонен; при рассмотрении пространственного распределения электронной плотности, например, вдоль хорды зондирования рефрактометра, эта монотонность выражается в виде наличия у профиля плотности одного максимума, разделяющего профиль на две монотонные части. Однако в некоторых случаях эта монотонность может нарушаться: например, при инжекции топливных пеллетов в плазму появляется характерный пик плотности вблизи края плазмы; время испарения пеллета при этом может составлять десятки секунд [1]. Пример такого профиля показан на рисунке 1 синей линией. Подобная конфигурация профиля плотности сильно затрудняет диагностику плазмы методами рефлектотметрии — пик плотности на краю создает барьер для микроволнового пучка, который в отсутствие пика отразился бы близко к центру плазмы, а значит, рефлектотметром можно будет измерить только порядка 10% профиля плотности, исходя из рисунка 1. Однако, все еще возможны измерения с использованием рефрактометрии: можно как использовать данные только рефрактометра для восстановления интеграла электронной плотности плазмы $\langle n_l \rangle$, так и использовать рефрактометр и рефлектотметр совместно для восстановления формы профиля плотности в «затенённой» области, используя рефлектотметр для оценки формы пика плотности, вызванного

распылением пеллета (рисунок 1, оранжевая линия). В рамках исследования особенностей рефрактометрии ИТЭР методами синтетической диагностики были моделированы измерения $\langle n_l \rangle$ с использованием обоих методов. Моделирование измерений рефрактометра было проведено с использованием разработанной синтетической диагностики рефрактометрии ИТЭР, учитывающей шумы, вносимые в сигнал электронными компонентами диагностики. Для моделирования применения данных рефлектотрии была использована предполагаемая пространственная погрешность этой диагностики, а также погрешность измерения потока магнитного поля вдоль хорды зондирования при восстановлении измеренной части профиля плотности из параметров плазмы. Результатом этого исследования является создание методики улучшения измерений $\langle n_l \rangle$ рефрактометрии при немонотонности профиля плотности плазмы, а также приблизительной оценки формы профиля плотности плазмы в области, недоступной рефлектотрии.

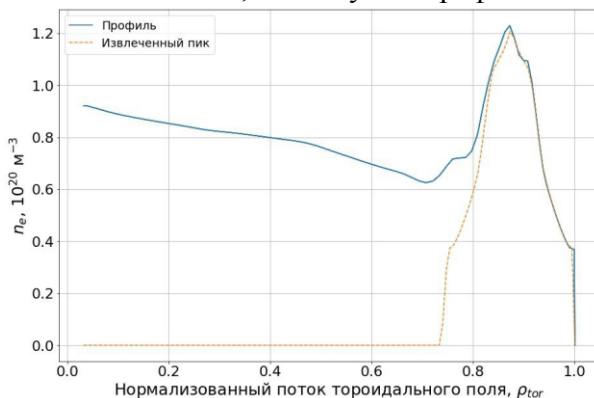


Рисунок 1. Профиль плотности плазмы при пеллет-инжекции (синий), и пример оценки формы пика, вызванного распылением пеллета, с использованием данных рефлектотрии (без учёта погрешности)

Литература

- [1]. Polevoi *et al.* “Integrated modelling of ITER scenarios with D-T Mix control” 45th EPS Conference on Plasma Physics, 2018, Prague

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ДИСПЕРСИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЛОТНОСТЬЮ ПЛАЗМЫ В ТОКОМАКЕ ГЛОБУС-М2

С.В. Иваненко¹, К.А. Гринемайер¹, А.Л. Соломахин¹, А.Д. Хильченко¹, Е.А. Пурыга¹, А.Н. Квашнин¹, П. В. Зубарев^{1,2}, Д. В. Моисеев¹, П.А. Багрянский¹

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр-т. Акад. Лаврентьева, 11, e-mail: s.v.ivanenko@inp.nsk.su*

² *Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630092, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20*

Первая плазма на сферическом токамаке Глобус-М2 (Санкт-Петербург, Россия) была получена в 2018 г., а полномасштабные исследования начались в 2019 г. Реализуемые в установке параметры плазмы позволяют моделировать режимы, предполагаемые к использованию в термоядерном источнике нейтронов на основе токамака. Электромагнитная система установки по своим инженерным характеристикам позволяет поддерживать разряд длительностью до 0.7 с [1]. Но для этого необходимо решить ряд задач, связанных с контролем параметров плазменного разряда. Одним из таких параметров является плотность плазмы. Однако здесь приходится столкнуться с двумя проблемами. Первая связана с увеличением плотности плазмы в модернизированной установке выше 10^{20} м^{-3} . В таких условиях имеющийся СВЧ-интерферометр не работает из-за большой рефракции, а уменьшить длину волны меньше 0.8 мм невозможно из-за отсутствия подходящих генераторных ламп обратной волны. Вторая проблема связана с неопределенностью мощности источника рабочего газа. Кроме

газового клапана, позволяющего регулировать напуск с помощью внешнего воздействия, есть еще стенка, от качества подготовки которой и нагрузки на которую также зависит поступление газа в разряд. Вторым источником очень сложно управлять. Возможно только снизить величину его воздействия на разряд с помощью определенных технологических процедур: прогрев, чистка в разряде, боронизация. Кроме этого плотность плазмы сильно влияет на эффективность методов дополнительного нагрева и безындукционного поддержания тока в плазме [2,3,4]. Важной задачей в таких условиях является исследование возможности управления в реальном времени плотностью плазмы в разряде (омическом, с нейтральной инжекцией, при LHCD). Ключевым элементом для ее выполнения является дисперсионный интерферометр на основе CO₂ лазера с искусственной фазовой модуляцией зондирующего излучения. Важнейшими качествами этого интерферометра являются его компактность и слабая чувствительность к вибрациям оптических элементов. Благодаря выбору оптимальной для современных плазменных установок длины волны зондирующего излучения, на работу данного интерферометра практически не оказывают влияния явления рефракции и вращения плоскости поляризации в магнитном поле. Подобные интерферометры используются на установках ГДЛ (г. Новосибирск, Россия) [5], W-7X (г. Грейфсвальд, Германия) [6], LHD (г. Токи, Япония) [7], а также ранее использовался на установке TEXTOR (Юлих, Германия) [8].

Для регистрации сигнала интерферометра и вычисления плотности плазмы в режиме реального времени был разработан специальный измерительный модуль на основе аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и программируемой пользователем вентильной матрицы (FPGA). Данный прибор обеспечивает вычисление интегральной плотности плазмы с разрешением $4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ при временной дискретности 4 мкс. Важной частью данной работы был выбор и реализация на элементах FPGA оптимальной методики вычисления плотности плазмы. Ранее на токамаке TEXTOR уже были попытки управлять плотностью плазмы и вертикальным положением

плазменного тороида с помощью измерительного комплекса дисперсионного интерферометра созданного в ИЯФ СО РАН (Новосибирск, Россия) [9,10]. Описанная в [10] методика основывалась на несложных математических операциях над оцифрованными сигналами интерферометра. Однако она была неустойчивой в присутствии наложенного на сигнал шума и при изменении глубины модуляции, что заставляло проводить громоздкие калибровочные процедуры перед вычислением каждого нового значения плотности плазмы (т.е. каждые 4 мкс). Для создания измерительного модуля дисперсионного интерферометра на установке Глобус-М2 использовался новый подход вычисления плотности плазмы, основанный на гармоническом анализе зарегистрированного сигнала, который является устойчивым к воздействию шумов и изменениям глубины модуляции.

Измерительный модуль в составе дисперсионного интерферометра на основе СО₂ лазера был протестирован на испытательных стендах и на установках ГДЛ (Новосибирск, Россия) и Глобус-М2.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-79-20201.

Литература

- [1]. V.V. Minaev et al. 2017 Nucl. Fusion 57 066047
- [2]. Щёголев, П. Б. и др., 2019 Физ. плазмы 45 213
- [3]. Gusev V.K. et al. 2015 Nucl. Fusion 55 104016
- [4]. Dyachenko V.V. et al. 2015 Nucl. Fusion 55 113001
- [5]. А.Л.Соломахин и др. 2005 Приборы и техника эксперимента 5 96
- [6]. J. Knauer et al. 43rd EPS Conference on Plasma Physics P4.017
- [7]. T. Akiyama et al. 2015 JINST 10 P09022
- [8]. H. Dreier et al. 2011 Rev. Sci. Instrum. 82 063509
- [9]. A.A. Lizunov et al. 2008 Rev. Sci. Instrum. 79 10E708
- [10]. Хильченко А.Д. и др. 2009 Приборы и техника эксперимента 3 78

*Диагностика плазмы на
действующих термоядерных
установках*

**КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИК ТОКАМАКА
МИФИСТ-0**

Крат С.А.¹, Пришвицын А.С.¹, Алиева А.И.¹, Ефимов Н.Е.¹,
Изарова А.Д.¹, Умеренкова А.С.¹, Гришаев М.В.¹, Грунин А.В.¹,
Беграмбеков Л.Б.¹, Синельников Д.Н.¹, Булгадарян Д.Г.¹,
Казиев А.В.¹, Колодко Д.В.¹, Тумаркин А.В.¹, Савелов А.С.¹,
Кирко Д.Л.¹, Сидоров П.П.¹, Белов А.С.¹, Губский К.Л.¹,
Гаспарян Ю.М.¹, Нургалиев М.Р.^{1,2}, Кудашев И.С.^{1,2}

¹*Национальный исследовательский ядерный университет
МИФИ, Москва, Россия, sakrat@mephi.ru*

²*Национальный исследовательский центр Курчатовский
Институт, Москва, Россия*

В настоящее время на базе НИЯУ МИФИ создается учебно-исследовательский токамак МИФИСТ-0 [1]. Токамак МИФИСТ-0 представляет собой сферический токамак, с большим радиусом 25 см, малым радиусом 13 см, аспектным соотношением 1.9, вертикальной вытянутостью вакуумной камеры ~2. Пиковое тороидальное магнитное поле составляет ~0.8 Тл, характерное время разряда ~10 мс. Основной задачей создаваемого токамака является подготовка кадров в области управляемого термоядерного синтеза для дальнейшей работы на таких установках как Т-15МД, ТРТ, ИТЭР. Кроме того, на установке запланировано проведение исследований в области

взаимодействия плазмы с поверхностью и испытание различных методов диагностики плазмы и поверхности внутрикамерных элементов. В связи с этим токамак МИФИСТ-0 должен быть оснащён репрезентативной выборкой диагностик, являющихся характерными для токамаков в целом, и обеспечивающими выполнение научной повестки токамака МИФИСТ-0.

Конструкция разрядной камеры токамака выбрана максимально простой и имеет на сегодняшний момент 6 радиальных портов проходным диаметром 155 мм в центральной плоскости разрядной камеры. Откачка разрядной камеры, ввод СВЧ и ВЧ мощностей в разрядную камеру осуществляются через данные порты, что существенно ограничивает возможности по размещению диагностик. В будущем будет установлена новая вакуумная камера, имеющая аналогичные размеры, но с 12 радиальными прямоугольными портами $\sim 100 \times 400$ мм и 24 вспомогательными портами с проходным диаметром 50 мм., что позволит разместить большее количество диагностических систем.

На текущий момент на токамаке МИФИСТ-0 реализованы следующие диагностические системы:

- 1) Базовые электромагнитные диагностики: петли измерения напряжения на обходе, пояса Роговского вне и внутри разрядной камеры, катушки Мирнова внутри разрядной камеры.
- 2) Оптические диагностики: фотодиод для регистрации плазмы, быстрая оптическая камера, обзорный оптический спектрометр.
- 3) Зондовые диагностики.
- 4) Болометрические системы: Многоканальный болометр, ИК микроболометр (ИК камера)
- 5) Диагностики основных элементов камеры и электромагнитной системы: тензодатчики, термодатчики температуры, пояса Роговского на основных линиях питания электромагнитной системы

Ведётся разработка и создание таких диагностик как система измерения линии Н-альфа вблизи поверхности, гетеродинный интерферометр, система измерения спектров потоков нейтралов, летящих из плазмы, рентгеновский

спектрометр, собирающий материаловедческий зонд. Проводятся испытания отдельных узлов разрабатываемых систем на лабораторных ионно-пучковых, плазменных и вакуумных стендах.

Для анализа состава поверхности обращенных к плазме элементов и концентрации захваченного рабочего газа ведется разработка дистанционной диагностики на основе лазерного излучения. Проведены лабораторные измерения выхода захваченного дейтерия из модельных образцов при воздействии лазерного излучения (Nd:YAG, длина волны - 1064 нм, длительность импульса - 20 нс) с помощью квадрупольного масс-спектрометра в режиме нагрева поверхности и в режиме абляции. Показана высокая чувствительность метода, позволяющая реализовать данную методику в условиях токамака.

Представлены результаты первых измерений параметров плазмы на токамаке.

Литература

- [1]. Kurnaev V.A. et al. The Project of MPhIST Tokamak // Phys. At. Nucl. 2019. Vol. 82, № 10. P. 1329–1331.

Работа выполнена при поддержке договора НИОКР 313/1755-Д между НИЯУ МИФИ и АО «Наука и Инновации», комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в РФ на период до 2024 года» (РТГН) реестровый номер работы 730000Ф.99.1.БВ10АА00006, Министерства науки и высшего образования РФ (проект №0723-2020-0043)

ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ПЛМ-М ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ВНУТРИКАМЕРНЫХ КОМПОНЕНТ И ДИАГНОСТИКИ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА-ТОКАМАКА

Будаев В.П.^{1,2}, Федорович С.Д.¹, Дедов А.В.¹, Карпов А.В.^{1,2},
Мартыненко Ю.В.^{1,2}, Комов А.Т.¹, Лукашевский М.В.¹,
Кавыршин Д.И.¹, Захаренков А.В.¹, Губкин М.В.¹, Лазукин А.В.¹,
Рогозин К.А.¹, Коньков А.А.¹, Чан Куанг В.¹, Васильев Г.Б.¹,
Белоусов С.В.¹, Квасков В.С.¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва,
Россия, budaev@mail.ru

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Плазменная установка ПЛМ-М (рис. 1а)- мультикасповая линейная ловушка со стационарным плазменным разрядом для плазменных испытаний материалов термоядерного реактора. Установка ПЛМ-М (ПЛМ-2) сооружена на базе имеющейся установки ПЛМ (НИУ «МЭИ») [1]. Магнитная система ПЛМ-М состоит из катушки соленоида, создающей продольное магнитное поле, и восьмиполусной системы (октуполь) из постоянных магнитов, создающих мультикасповую конфигурацию (аналог известной схемы с продольными “палками Иоффе”), окружающих соленоид. Высоковакуумная охлаждаемая разрядная камера ПЛМ-М оснащена безмасляными вакуумными насосами для достижения давления менее $1 \text{ J } 10^{-6}$ Торр. Для моделирования нагрузок уровня ЭЛМов в крупном токамаке реакторного размера сооружен стенд на основе мощного лазерного комплекса с импульсным лазером Nd:YAG модель LQ529A с длиной волны излучения 1064 нм и энергией импульса 500 мД. Такой стенд используется для генерации дуг и исследования дуговой эрозии в плазменных экспериментах на ПЛМ-М, рис. 1б, 2.

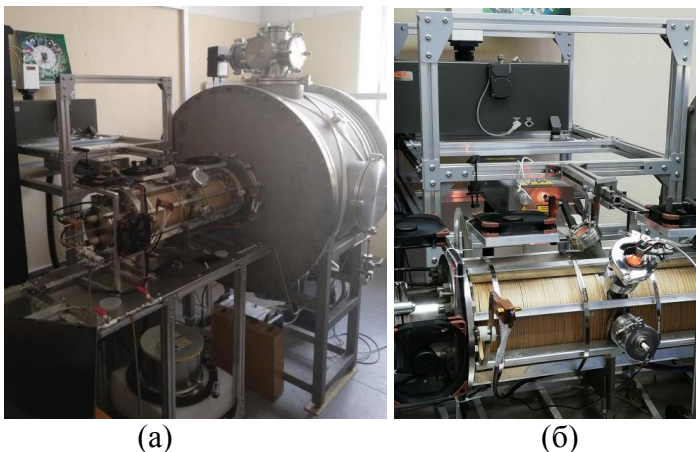


Рисунок 1 — Плазменная установка ПЛМ усовершенствованная (ПЛМ-М), (б) стенд на основе мощного лазера для генерации дуг на поверхности вольфрамового модуля при плазменном облучении и оптическая диагностика приповерхностной плазмы

Таблица 1 - Параметры, достигнутые в усовершенствованной установке ПЛМ-М

Параметр	
Диаметр камеры/плазменного пучка, см	16/3,5
Магнитное поле на оси ,Тл	0,02
Магнитное поле в каспах ,Тл	до 0,2
Концентрация электронов плазмы, м ⁻³	5 · 10 ¹⁸
Температура электронов плазмы , эВ	1-10
Ионный поток на испытуемый макет, м ⁻² с ⁻¹	10 ²³ -10 ²⁵
Нагрузка плазменно-тепловая на испытуемый макет МВт/м ²	4,5
Стационарный плазменный разряд более 300 мин	
Рабочий газ – гелий	

Сооружается секция для ИЦР нагрева плазмы на частоте 27 МГц с использованием геликоновой антенны. Проводятся испытания охлаждаемых вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки дивертора термоядерного реактора по технологии, разработанной для ИТЭР. Разрабатываются методы интенсивного

охлаждения (двухфазным парогазовым, жидкометаллическим охлаждением) модулей теплозащитной облицовки дивертора и первой стенки термоядерного реактора при стационарной эксплуатации. Планируются эксперименты с достижением режима «detached», аналог закрытого дивертора реактора-токамака, испытание жидкометаллических компонентов стенки/лимитеры из лития, олова и других, технологии управления и турбулентного нагрева плазмы электродами под напряжением.

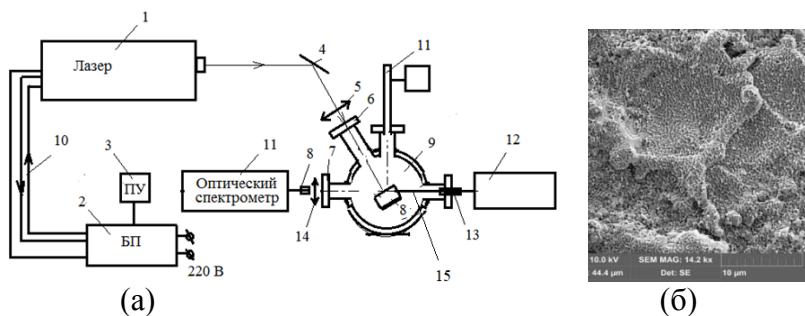


Рисунок 2— (а) Схема эксперимента на ПЛМ-М с мощным лазером.

(б) Кратеры на диверторном вольфрамовом модуле в плазменных экспериментах с генерацией дуг лазером

Установка ПЛМ-М (ПЛМ-2) не имеет аналогов в России, планируется довести параметры до проектных, аналогичных самой мощной установке в мире MAGNUM-PSI (Евросоюз).

Работа выполнена при поддержке проекта № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д ГК «Росатом» ЧУ «Наука и инновации», анализ структуры стохастической поверхности-при поддержке гранта РФФ 17-19-01469, АСНИ на установке выполнена при поддержке Мегагранта РФ № 14.Z50.31.0042.

Литература

- [1]. Будаев В.П. и др. ВАНТ сер. Термоядерный синтез. –2017. – Т.40,№3. С.35

СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ СМОЛА

Устюжанин В.О.^{1,2}, Иванов И.А.², Инжеваткина А.А.², Ларичкин М.В.¹, Ломов К.А.¹, Поступаев В.В.², Скляров В.Ф.², Судников А.В.², Толкачев М.С.¹

¹*Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, НГУ, 630090, ул. Пирогова, д. 1, Новосибирск, Россия,*

²*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, ИЯФ СО РАН, 630090, проспект Академика Лаврентьева, д. 11, Новосибирск, Россия*

vik9614@mail.ru

Установка СМОЛА (Спиральная Магнитная Открытая Ловушка) – экспериментальный стенд для проверки концепции удержания вращающейся плазмы в магнитном поле с геликоидальной симметрией [1]. Данная концепция является частью дорожной карты развития линейных ловушек для магнитного удержания термоядерной плазмы, предложенная в ИЯФ СО РАН и предусматривающая создание стационарной установки газодинамического типа и формирование научного задела по методам улучшенного продольного удержания (проект ГДМЛ). Теоретически в концепции винтового удержания плазмы предсказана экспоненциальная зависимость эффективности подавления потерь от длины магнитной системы с винтовым полем, приводящая к существенному повышению эффективного пробочного отношения в открытой ловушке [2]. В 2017 – 2021 гг. на установке СМОЛА экспериментально была продемонстрирована возможность подавления потока плазмы винтовой магнитной системой и соответствие экспериментальных скейлингов теоретическим оценкам при

магнитном поле в транспортной секции $B_{\max} \approx 0.7$ Т в области среднего по сечению пробочного отношения $R_{\text{mean}} > 1.5$ и скорости вращения плазмы на периферии, близкой к ионно-звуковой [3].

Экспериментальный стенд СМОЛА состоит из 3 частей: источника плазмы с входным расширителем, транспортной секции с винтовой пробкой (12 периодов винтового поля) и выходного расширителя. Реализуемые параметры плазмы на установке: плотность до $n_i \leq 10^{19}$ м⁻³, ведущее магнитное поле в винтовой секции $B_{\max} = 0.1 - 0.3$ Т, радиальное электрическое поле до $E_r \sim 100$ В/см, радиус плазмы $r \sim 5$ см, период винтового поля 18 см, среднее по сечению пробочное отношение в транспортной секции $R_{\text{mean}} \leq 2$. Длительность одного плазменного импульса $\tau \sim 0,1 \div 1,6$ с.

Диагностический комплекс установки СМОЛА состоит из нескольких подсистем: система зондов (ленгмюровские зонды, зонд Маха, магнитные зонды), обзорные спектрометры, система оптических спектрометров с высоким спектральным и пространственным разрешением, СВЧ – интерферометр, а также диагностики контроля инженерных систем установки, таких как токи в электромагнитах, параметры электрической дуги разряда, газо-вакуумной системы и т.п.

Электрические зонды (на установке используются двойные, тройные и эмиссионные зонды) дают информацию об ионной плотности, электронной температуре, распределении электрического потенциала и электрического поля плазмы, а также о положении плазменного столба в области винтовой пробки. Магнитные зонды позволяют получить радиальное распределение магнитного поля и отследить его эволюцию, из чего можно восстановить распределение тока в плазменном шнуре. Зонд Маха используется для определения продольной компоненты скорости плазменного потока в режиме удержания плазмы в винтовом магнитном поле. Газовые измерения, осуществляющиеся с помощью высоковакуумных вакууметров, в купе с зондовыми данными дают информацию о балансе частиц.

Оптические спектрометры с высоким пространственным разрешением применяются для исследования вращения плазмы в заданной конфигурации магнитного поля [4]. Скорость вращения плазмы, вычисленная за счёт измерения смещения исследуемой спектральной линии излучения, пропорциональна радиальному электрическому полю в плазме, что позволяет согласовывать спектрометрические измерения с данными, получаемыми с электрических зондов. Спектроскопия плазмы также позволяет получить радиальный профиль ионной температуры. Обзорные спектрометры предоставляют информацию о наличии примесей во время генерации плазменного потока. СВЧ – интерферометр используется для измерения линейной плотности плазмы в винтовой секции установки.

В данном докладе будет представлена информация по основным диагностическим подсистемам установки СМОЛА и этапам их развития. Также будут даны результаты измерений параметров плазмы, полученные в различных экспериментальных режимах соответствующими диагностиками.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-72-10080).

Литература

- [1]. A.D. Beklemishev. Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps // Fusion Science and Technology, V.63, N.1T, May 2013. P.355
- [2]. A.D. Beklemishev. Radial and axial transport in trap sections with helical corrugation // AIP Conf. Proc. 1771 (2016) 040006, doi: 10.1063/1.4964191.
- [3]. A.V. Sudnikov, et al. Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness// J. of Plasma Physics, 86(5), 2020, 905860515
- [4]. A.A.Inzhevatkina et al. Doppler spectroscopy system for the plasma velocity measurement in SMOLA Helical Mirror // Plasma and Fusion Research, 14(Specialissue1) (2019). doi: 10.1585/pfr.14.2402020.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС УСТАНОВКИ Т-15МД

Сушков А.В. и коллектив Т-15МД

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ,
Sushkov_AV@nrcki.ru

Токамак Т-15МД является единственной установкой в Российской Федерации, на которой в ближайшие 10 лет будет возможно проведение физических экспериментов с ИТЭРоподобной конфигурацией плазмы. Основные научные задачи Т-15МД: исследование переноса частиц и энергии в режимах с диверторной конфигурацией плазмы; исследования турбулентности плазмы; физика пристеночной плазмы; исследование материалов первой стенки при реакторной тепловой нагрузке на диверторные пластины; квазистационарный режим работы; управление в реальном времени профилем плотности тока плазмы с целью подавления МГД активности и получения режимов улучшенного удержания; разработка методов предотвращения срывов и подавления пучка убегающих электронов.

Для решения этих задач токамак должен быть оснащен современной диагностикой, системой управления плазмой в реальном времени, системами дополнительного нагрева и генерации тока. В докладе представлены параметры основных диагностических систем токамака, а также особенности системы сбора данных и управления плазмой в реальном времени.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ В КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТЕКТОРОВ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Барыков И.А.¹, Вичев И.Ю.², Зайцев В.И.¹, Каневский В.М.³,
Тараканов И.А.², Федоров В.А.³

¹ АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", Москва, г. Троицк, vzaitsev@triniti.ru

² "ИПМ РАН им. Келдыша", Москва

³ "ИК и Ф" РАН, Москва

Развитие новых технологий, как, например, рентгеновая литография, управляемый термоядерный синтез, стимулировали интерес к процессам, возникающим под действием жесткого ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучений, в частности, к изменению электрических свойств материалов. В работах [1,2] исследовалось влияние достаточно жесткого рентгеновского излучения (100÷300 кэВ) на электрические свойства таких типичных диэлектриков как сапфир и оптическое стекло, которые часто используются в качестве изолирующих, конструкционных и оптических материалов. Показано, что в процессе воздействия радиации в данных материалах возникает электропроводимость, которая может быть объяснена на основе зонной теории. Получены значения энергетических затрат для возникновения пары носителей заряда в зоне проводимости, которые составили ~ 75 эВ в Al_2O_3 и около 150 эВ в образце аморфного SiO_2 . Спектральный состав и интенсивность потока в данных работах не приводятся. Исследования влияния излучения в «мягкой» области спектра РИ на электрические свойства изоляторов нам неизвестны.

В настоящей работе приводятся результаты, полученные на установке Ангара 5-1, где под действием мега амперных токов нагрузка превращается в интенсивно излучающую плазму.

Параметры излучения плазмы расположены в мягкой области энергий квантов (рис.1.1), которое поглощается на сравнительно малой глубине вещества (рис.1.2), что вместе с большой мощностью излучения приводит к высокой концентрации носителей заряда вблизи поверхности облучаемого образца, толщина которого составляла 0,5 мм.

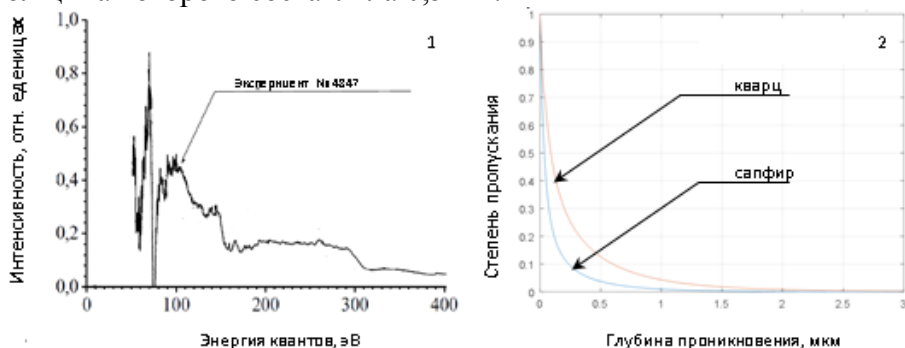


Рис. 1. Параметры излучения.

1. Типичный спектральный состав излучения установки АНГАРА-5-1
2. Расчетная глубина проникновения излучения в кварце и сапфире для данного спектрального распределения интенсивности излучения.

В работе [3] показано, что при данных параметрах облучения между контактным покрытием и диэлектриком возникает ЭДС, величина которой определяется плотностью и температурой возникающих носителей заряда, обсуждается механизм и приводятся качественные оценки возникающего эффекта. Временная зависимость отклик различных детекторов на воздействие мягкого рентгеновского излучения показана на рис. 2. Сравниваются сигналы с вакуумного эмиссионного детектора (ВД) и диэлектрических датчиков (на основе кварца и сапфира).

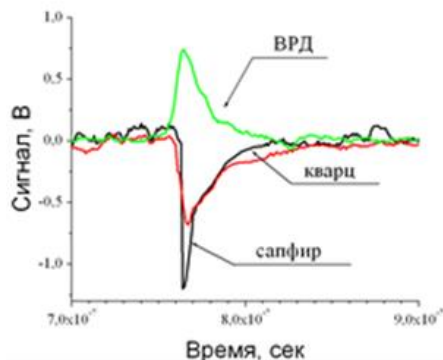


Рис. 2. Сигналы различных детекторов излучения (мощность $\sim 2\text{МВт}/\text{см}^2$).

Настоящая работа посвящена дальнейшему исследованию процессов взаимодействия мягкого рентгеновского излучения с диэлектрическими структурами и включает наряду с экспериментальными результатами математическую модель, основанную на кинетических уравнениях для вторичных заряженных частиц и самосогласованных уравнений Максвелла. В работе проведено вычисление токового отклика в образце диэлектрика для данных параметрах излучения. Сравнение результатов расчета с экспериментальным полученным сигналом (рис.3) показывает достаточное согласие.

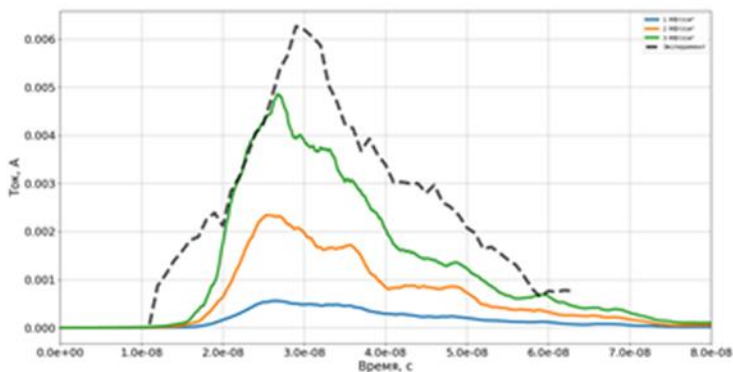


Рис. 3. Зависимость рассчитанного тока от времени при различных значениях потока излучения в сравнении с экспериментом

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 20-21-00068 и № 20-01-00419.

Литература

- [1]. Hughes R.C. // Phys. Rev. Lett. 1973. V. 30. № 26. P. 1333.
- [2]. Hughes R.C. // Phys. Rev. Lett. 1979. V. 19. № 10. P. 5318.
- [3]. Зайцев В.И., Барыков И.А., Карташов А.В., Терентьев О.В., Родионов Н.Б., Радиационноиндуцированный гальванический эффект, наблюдаемый в интерфейсе металл - диэлектрик, Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 22, С. 72-78

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 С ПОМОЩЬЮ ЛЕНГМЮРОВСКИХ ЗОНДОВ

Хромов Н.А.¹, Токарев В.А.¹, Векшина Е.О.², Гусев В.К.¹,
Жильцов Н.С.¹, Киселев Е.О.¹, Курские Г.С.¹, Минаев В.Б.¹,
Петров Ю.В.¹, Сахаров Н.В.¹, Тельнова А.Ю.¹, Щеголев П.Б.¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия,
Nikolay.Khromov@mail.ioffe.ru

² ФГАОУ ВО "СПбПУ", г. Санкт-Петербург, Россия

Для термоядерных установок с магнитным удержанием серьезной проблемой является высокая тепловая нагрузка на компоненты, обращенные к плазме. В особенности это касается сферических токамаков, так как в них потоки тепла из плазмы попадают на сравнительно небольшую площадь [1]. Поэтому для подобных установок измерение параметров пристеночной плазмы и исследование протекающих в ней процессов представляется весьма актуальной задачей.

Глобус-М2 является компактным сферическим токамаком с открытым дивертором, плазма в котором может быть ограничена как диафрагмой, так и магнитной сепаратрисой [2]. Система полоидальных обмоток позволяет создавать конфигурацию как с нижним, так и с верхним положением X-точки а также с двумя X-точками.

Для измерения параметров плазмы вблизи дивертора на токамаке Глобус-М2 используются десять плоских ленгмюровских зондов, которые встроены в нижние диверторные пластины [3]. Диаметр зондов 8 мм, большая их часть установлена около выхода внешней ветви сепаратрисы на дивертор, так как в токамаках именно в эту область попадают основные потоки тепла и частиц. Система регистрация

разработана на основе блоков АЦП с батарейным питанием и передачей данных по оптоволокну между разрядами токамака.

Измерения были проведены в разрядах с активной нижней X-точкой при тороидальном магнитном поле 0.7 Т, ток плазмы был в диапазоне 200-300 кА. Для определения профилей параметров плазмы проводилось снятие зондовых вольт-амперных характеристик (ВАХ). Полученные экспериментальные данные аппроксимировались модельной ВАХ [4] и таким образом находились три неизвестных параметра – температура электронов, ионный ток насыщения и плавающий потенциал. В ряде случаев движение внешней ветви сепаратрисы во время разряда позволяло улучшить пространственное разрешение данной диагностики. Определив температуру электронов вблизи дивертора и ионный ток насыщения можно найти такой важный для токамака параметр как плотность потока тепла на диверторные пластины. Каждая ион-электронная пара, проходящая через слой объемного заряда на стенку токамака, переносит энергию из плазмы, которую характеризует суммарный коэффициент передачи тепла в слое γ , который в большинстве случаев считают приближенно равным 7. Плотность потока тепла пропорциональна этому коэффициенту, плотности ионного тока насыщения и температуре электронов. В докладе приводятся полученные таким образом профили температуры электронов, плотности ионного тока насыщения, плавающего потенциала и плотности теплового потока. Проведена оценка характерного масштаба спада плотности теплового потока и сравнение полученного значения с имеющимися скейлингами.

Следует отметить, что в случае подачи нулевого потенциала относительно камеры на диверторные зонды, они могут быть использованы как мониторы тока, текущего через обдирочный слой плазмы на диверторные пластины. Как отмечено в [5], такие токи определяют распределение потенциала плазмы вдоль дивертора и таким образом оказывают существенное влияние на величину γ и, следовательно, на плотность потока тепла. Неучет таких токов, как правило, приводит к занижению вычисленного теплового потока. В

докладе приводятся профили токов на диверторные пластины и оценка поправки к γ для условий токамака Глобус-М2.

Также были измерены параметры пристеночной плазмы в экваториальной плоскости токамака. Для этого использовался многоштырьковый подвижный ленгмюровский зонд [6]. С его помощью были получены профили электронной температуры и плотности, плавающего потенциала и числа Маха.

Литература

- [1]. G.F. Counsell et al, Plasma Phys. Control. Fusion, **44**, 827, (2002).
- [2]. V.B. Minaev et al, Nucl. Fusion, **57**, 066047, (2017).
- [3]. N.A. Khromov et al, Technical Physics, **66**, 409, (2021).
- [4]. P.C. Stangeby et al, Nucl. Fusion, **30**, 1225, (1990).
- [5]. V. Rozhansky et al, Nucl. Fusion, **63**, 015012, (2021).
- [6]. V.A. Tokarev et al, Journal of Physics: Conf. Series, **1094**, 012003, (2018).

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЫ И ПРОБЛЕМА ЭРОЗИИ СТЕНКИ В ТОКАМАКЕ-РЕАКТОРЕ

Будаев В.П.^{1,2}

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия, budaev@mail.ru

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В обзоре представлен современный статус исследований взаимодействия плазма-стенка в термоядерных установках и эрозии материалов под действием мощных потоков плазмы, рассмотрены подходы к оценке эрозии материалов дивертора и первой стенки в токамаке-реакторе. Периферийная (пристеночная) плазма в термоядерных установках с магнитным удержанием находится в сильном турбулентном состоянии [1,2]. Дрейфово-волновые неустойчивости приводят к флуктуациям плотности и электрических полей в краевой плазме, рис. 1а,б. Обсуждается универсальность свойств турбулентности на границе замагниченной плазмы [1,2]: свойства турбулентности на границе, такие как перемежаемость, негауссовская статистика, многомасштабность и мультифрактальность, аномальный перенос и супердиффузия наблюдаются в термоядерных установках. Перемежаемость и свойства самоподобия ответственны за эффекты памяти и дальние корреляции в пространстве и времени, приводящие к существенному переносу частиц, рис. 1а, тепла и импульса из плазмы на поверхность, вызывая высокую тепловую нагрузку на материал.

Взаимодействие плазмы с поверхностью в термоядерных установках приводит к эрозии, плавлению и движению расплава по поверхности, переосаждению эродированных материалов, стохастической кластеризации поверхности [3,4]. Это приводит к

изменению морфологии поверхности. Уникальные, не наблюдавшиеся ранее структуры в виде формы цветной капусты [3,5], и слои в виде “пуха”, рис. 1в,г, недавно наблюдались на материалах (вольфраме, графите, бериллии, титане и др), облученных плазмой в термоядерных установках. Они образуются при высокой тепловой плазменной нагрузке в условиях действия особых свойств пристеночной плазмы, включая турбулентность. Были оценены статистические характеристики иерархической грануляции и масштабной инвариантности таких новых материалов, выявившие связь со статистикой турбулентности пристеночной плазмы, влияющей на изменение морфологии поверхности.

Известные подходы фрактального роста интерфейсных слоев и агломерации используются для анализа взаимодействия плазмы с поверхностью в термоядерных устройствах [3]. Электроны, ионы и примеси двигаются в пристеночной плазме и по поверхности материала в турбулентных электрических полях, создаваемых пристеночной плазмой. Из-за сильной турбулентности плазмы частицы плазмы над поверхностью могут быть вовлечены в стохастическую крупномасштабную динамику, известную как процесс супердиффузии или динамика типа Леви. В результате динамика ионов и кластеров на поверхности и на поверхности отклоняется от нормальной диффузии (обычного броуновского движения), что влияет на процесс агломерации на поверхности и приводит к неоднородной стохастической кластеризации поверхности со свойствами самоподобия структуры зернистости-гранулярности от нано- до макромасштабного размера [3,5]. Стохастическая кластеризация материала под действием плазмы наблюдалась в токамаках и линейных плазменных установках, таких как ПЛМ [5].

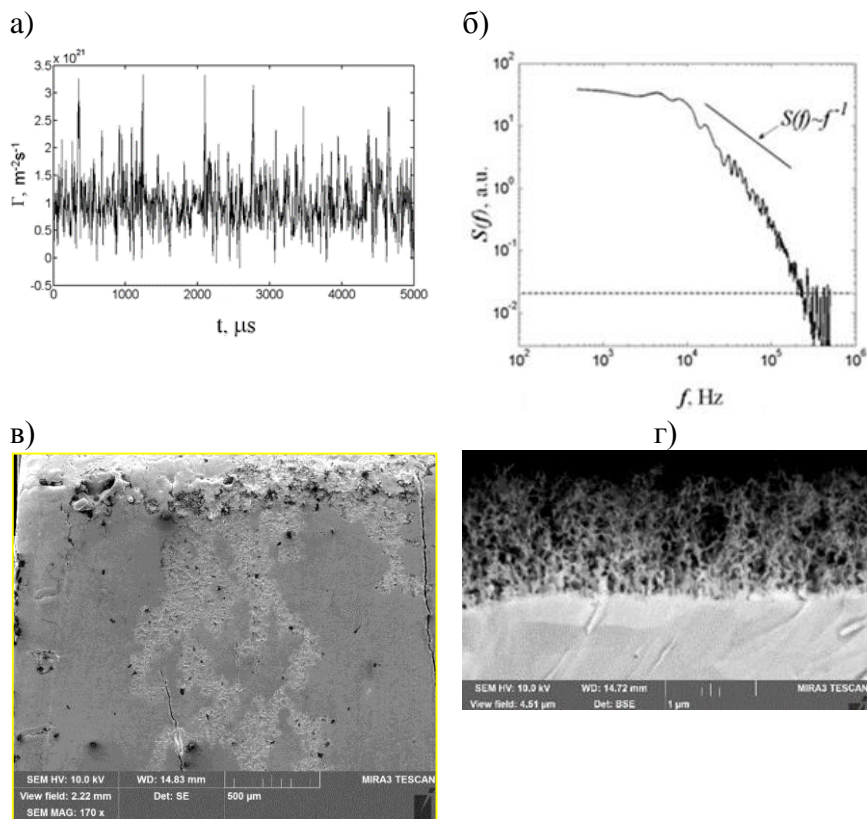


Рисунок 1 - (а) Турбулентный поток частиц на стенку (а) и спектр турбулентности (б) в пристеночной плазме токамака Т-10.

Эрозия вольфрамового лимитера в токамаке Т-10 (в); наноструктурные слои типа «пух» на вольфраме после плазменного облучения в ПЛМ (г)

Работа выполнена при поддержке проекта № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д ГК «Росатом» ЧУ «Наука и инновации», анализ структуры стохастической поверхности - при поддержке гранта РФФ 17-19-01469, оценка радиационных эффектов – при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020, анализ данных – при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023)

Литература

- [1]. V. P. Budaev, S. P. Savin, and L. M. Zelenyi, Phys. Usp. (2011) 54, 875
- [2]. V. P. Budaev, L.M. Zelenyi , S.P. Savin, Journal of Plasma Physics (2015) 81 6 10.
- [3]. V.P. Budaev, Physics Letters A. (2017) 381 43 3706-3713.
- [4]. V.P. Budaev, Physics of Atomic Nuclei (2016) 79(7) 1137-1162.
- [5]. V.P. Budaev, Symmetry (2021) 13 796.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УДАЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

Грашин С.А.¹, Архипов И.И.^{1,2}

*¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский
Институт», пл. Академика Курчатова, д. 1, 123182 Москва, РФ,
Grashin_SA@nrcki.ru*

*²Институт Физической Химии и Электрохимии им. А.Н.
Фрумкина РАН, Ленинский пр. 31-4, 119071 Москва, РФ,
igor_arkhipov_54@mail.ru*

Эффективное удержание высокотемпературной плазмы невозможно без учета взаимодействия плазмы с поверхностью стенок и внутрикамерных элементов конструкции токамака. Кондиционирование стенок токамаков с помощью низкотемпературного плазменного разряда на постоянном токе - самый распространенный метод контроля состояния поверхности внутрикамерных элементов, зажигания плазмы и рециклинга примесей и топлива перед включением рабочего разряда. Однако, экспериментальных данных о распределении плотности ионного тока по поверхности стенок больших токамаков с использованием нескольких анодов (необходимы прогнозы для ИТЭР) явно недостаточно.

В работе представлены предварительные результаты очистки внутренней поверхности камеры токамака Т-15МД от примесей с помощью тлеющего разряда в Ar, Ne и H₂. Для зажигания тлеющего разряда в камере токамака использовалось 4 титановых штыря - анода. Катодом служила стенка камеры. Параметры разряда: P = 0.2-0.7 Па, U_{A-K} = 1-2 кВ, I_K = 1-3 А, j_K = 0.04-0.1 А/м². Контроль и измерение состава газовой атмосферы в

камере до, во время, и после разряда осуществлялось с помощью масс-спектрометра Extorr XT 200(M) в диапазоне масс $m/z = 1-200$.

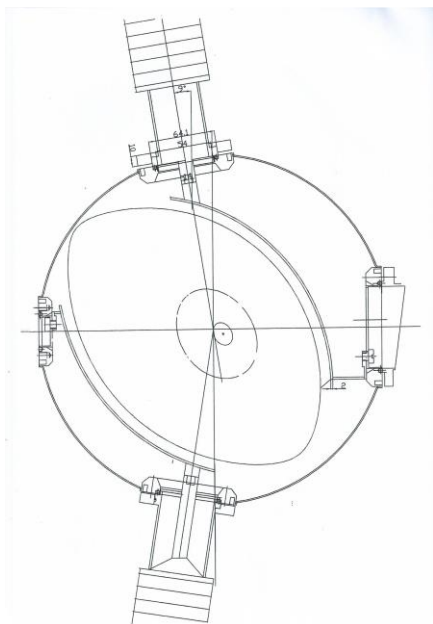
Показано, что использование тлеющего разряда в камере с графитовым лимитером, помимо очистки внутренней поверхности от воды и кислорода, приводит к осаждению т.н. «мягких» углеводородных пленок, а так же металлов, входящих в состав нержавеющей стали. Установлены возможные источники и механизмы появления и транспорта примесей. Наиболее вероятным механизмом попадания углерода, железа и хрома в плазму тлеющего разряда является эрозия материалов внутрикамерных элементов конструкции под воздействием дуговых разрядов. По данным масс-спектрометрии трудно отдать предпочтение разряду в аргоне или гелии. В обоих случаях в спектрах после выключения разряда значительно уменьшается сигнал воды и практически полностью исчезает сигнал кислорода. Дана оценка натекания в камеру токамака до и после процедуры очистки. Показано, что для гелиевого разряда натекание уменьшается на, примерно, 30%, что подтверждает очистку стенок камеры от примесей во время горения тлеющего разряда. Тлеющий разряд в водороде эффективно удаляет кислород, но не убирает воду. Учитывая опыт подобных процедур на токамаке T-10, чтобы очистить камеру от паров воды и избежать осаждения углеводородных пленок, тлеющие разряды необходимо дополнять нагревом стенок камеры до температуры 150-220°C.

КВАДРУПОЛЬНАЯ АНТЕННА И ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ИОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ГЕНЕРАЦИИ ТОКОВ УВЛЕЧЕНИЯ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

Мещеряков А.И.¹, Гришина И.А.¹, Вафин И.Ю.¹

¹ *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской Академии наук, Москва, Россия, meshch@fpl.gpi.ru*

Одним из наиболее распространенных методов дополнительного нагрева плазмы в тороидальных магнитных ловушках является метод ВЧ нагрева в диапазоне ионных циклотронных частот с помощью быстрых магнитозвуковых волн (БМЗВ). В настоящее время для возбуждения волн в этом диапазоне частот используют петлевые антенны, состоящие из одной или нескольких токовых полос, создающих азимутальные токи внутри вакуумной камеры тороидальной магнитной ловушки. Наилучшие результаты с точки зрения эффективности возбуждения БМЗВ и нагрева получены с использованием квадрупольных антенн [1]. Это связано с тем, что такие антенны позволяют возбуждать БМЗВ с нужными тороидальными и полоидальными волновыми числами при низкой амплитуде паразитных поверхностных волн и цилиндрических мод с низкими продольными волновыми числами. При этом значительно уменьшается нагрев задиафрагменной области (scrape-off layer) и периферийных слоев плазмы и, соответственно, уменьшается поступление примесей в плазму.



Квадрупольная антенна для ИЦР нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М состоит из 4-х токовых витков, расположенных в двух соседних сечениях вакуумной камеры стелларатора. На рисунке представлены два токовых витка в одном сечении. Соседнее сечение, в котором расположены два идентичных токовых витка, отстоит от данного сечения на расстояние 22,5 см по оси плазменного шнура. Ширина каждого токового витка составляет 7,5 см, а площадь поверхности – 2,5 кв. дм. Поверхность каждого витка,

обращенная к плазме, повторяет форму поверхности сепаратрисы и отстоит от нее на 1 см. Токовые витки не защищены электростатическим экраном. Каждый виток питается от генератора отдельным ВЧ фидером. Поэтому в зависимости от сдвига фаз напряжения, поданного на отдельные витки антенны, имеется возможность возбуждать БМЗВ с различными тороидальными и азимутальными модами. Например, для квадрупольного питания витков антенны, когда соседние витки запитаны в противофазе, максимум амплитуды тороидальных мод приходится на $k_{\parallel} = 14 \text{ м}^{-1}$, а максимум азимутальных мод - на моду с $m = 1$. В докладе рассмотрены все возможные варианты питания антенной системы, приведены тороидальные и азимутальные спектры для этих случаев и выбран оптимальный вариант для нагрева плазмы и генерации токов увлечения в стеллараторе Л-2М. Вакуумные вводы собраны на основе высоковольтных керамических изоляторов и позволяют подавать на антенну ВЧ напряжение до 16 кВ [2]. При подаче такого напряжения на квадрупольную антенну (с учетом общей площади

антенной системы около $S_{\text{ан}} = 0.1 \text{ м}^2$), на основании опыта предыдущих экспериментов [2] можно ожидать, что излучаемая мощность квадрупольной антенны в экспериментах по ИЦР нагреву D+H плазмы составит около $P = 200 \text{ кВт}$.

Диагностический комплекс системы ионного циклотронного нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М состоит из измерителя падающей и отраженной волн в ВЧ фидере и системы магнитных зондов. Измеритель падающей и отраженной волн смонтирован на участке ВЧ фидера длиной около 1 м. Измеряя амплитуды падающей и отраженной волн, можно вычислить ВЧ мощность, поглощаемую в плазме, амплитуду ВЧ напряжения на антенне и сопротивление излучения антенны. Сопротивление излучения антенны характеризует не только конструкцию антенны, но, в большей степени, применяемую схему нагрева (нагрев D+H плазмы, нагрев D плазмы на частоте $2\omega_{\text{ci}}$, нагрев H плазмы на частоте ω_{ci} , ВЧ нагрев в диапазоне геликонных волн, и т.д.) и параметры плазмы. Зависимости величины сопротивления излучения от плазменных параметров позволяют найти условия для максимального поглощения ВЧ мощности [3].

Магнитные зонды представляют собой небольшие катушки, расположенные внутри вакуумной камеры стелларатора. Ориентация плоскости катушек такова, что позволяет измерять B_z и B_ϕ компоненты магнитного поля возбуждаемой волны (БМЗВ имеют преимущественно B_z компоненту). Магнитные зонды расположены в четырех поперечных сечениях стелларатора. Анализируя фазовые соотношения сигналов двух магнитных зондов, расположенных в двух различных сечениях камеры тороидальной установки, можно определить фазовую скорость и спектр по k_{\parallel} возбуждаемых волн в обоих направлениях по обходу тора от квадрупольной антенны. Кроме того, анализируя амплитудные соотношения сигналов магнитных зондов, можно определить длину затухания БМЗВ. Длина затухания позволяет определить оптимальные для данного метода нагрева параметры плазмы [3].

Таким образом, представленный диагностический комплекс позволит измерять фазовые скорости и спектральный

состав возбуждаемых БМЗВ, а так же определять условия, в которых эффекты нагрева и генерации токов увлечения будут максимальными.

Литература

- [1]. Bobkov V., Aguiam D., Baruzzoetet M. et al. Nucl. Mater. and Energy, 2017, vol. 12, p. 1194—1198
- [2]. В. А. Батюк, Г. С. Воронов, Е. Ф. Гиппиус, и др., Физика плазмы **13**, 259 (1987).
- [3]. А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, А. Е. Морозов, А. А. Голиков, Ю. И. Нечаев, Физика плазмы **34**, 231 (2008).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В АЛЬФВЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Балаченков И. М.¹, Бахарев Н. Н.¹, Буланин В. В.², Гусев В. К.¹,
Жильцов Н. С.¹, Киселёв Е. О.¹, Курские Г. С.¹, Минаев В.Б.¹,
Мирошников И. В.¹, Патров М. И.¹, Петров А.В.², Петров Ю. В.¹,
Пономаренко А. М.², Сахаров Н.В.¹, Тельнова А. Ю.¹, Щеголев П.
Б.¹, Яшин А. Ю.²

e-mail: balachenkov@mail.ioffe.ru

*1 ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Российская
Федерация*

*2 ФГАОУ ВО "СПбПУ", г. Санкт-Петербург, Российская
Федерация*

В настоящей работе приводятся примеры успешного применения сигналов магнитных зондов, связанных с распространением альфвеновских волн для диагностики параметров плазмы в компактном сферическом токамаке Глобус-М2 (большой радиус $R = 36$ см, малый радиус $r = 24$ см, аспектное отношение $A = 1.5$) [1,2].

Так, для разрядов с нейтральной инжекцией ($E_{NBI} = 28$ keV, $P_{beam} = 0.85$ MW) на стадии роста тока при величине магнитного поля 0.7 Т и тока по плазме порядка 300 кА были обнаружены [3] моды на обращенном шире магнитного поля (RSAE) или иначе, альфвеновские каскады (AC). Эта альфвеновская мода существует в области обращения профиля запаса устойчивости, где достигается минимальная величина q_{min} , а ее частота растет с уменьшением q_{min} . Это позволяет получить величину q_{min} из изменения частоты альфвеновского каскада пользуясь лишь дисперсионным соотношением, данными о профилях концентрации температуры электронов, полученными при

помощи диагностики томсоновского рассеяния, а также ионной температуры на магнитной оси, полученной по данным анализатора атомов перезарядки (МГД-спектроскопия [4]). Результаты, полученные из анализа частоты альфвеновского каскада с хорошей точностью совпадают с результатами расчета магнитного равновесия, полученными при помощи транспортного кода ASTRA. При помощи рефлектометра доплеровского обратного рассеяния был построен [3, 5] радиальный профиль амплитуды альфвеновской моды, максимум которого находится в области обращения профиля q , рассчитанного при помощи ASTRA.

Также, в разрядах с магнитным полем 0.7 Т и током по плазме 300 кА на стадии плато тока были обнаружены тороидальные альфвеновские моды (ТАЕ) большей продолжительности, чем ТАЕ, регистрировавшиеся ранее на токамаке Глобус-М [6]. Отличительной особенностью этих сигналов является то, что в спектре присутствуют кратные гармоники вплоть до $n = 3$, а частота первой гармоники сдвинута от нуля на постоянную величину превышающую расстояние между гармониками. Такая форма сигналов объясняется наличием доплеровского сдвига, связанного с вращением плазмы в тороидальном направлении [7]. Тороидальная мода возникает в частотном промежутке, появление которого связано с перезамыканием дисперсионных кривых, соответствующих полоидальным номерам m и $m + 1$ и одинаковыми n . При этом частота моды не зависит от n в явном виде. При наличии вращения плазмы в тороидальном направлении, появляется доплеровский сдвиг, различный для мод, соответствующих разным номерам n . Частоты гармоник определяются как $f_n = f_{TAE} + n f_{rot}$, где f_{TAE} – частота тороидальной альфвеновской моды, а f_{rot} – частота вращения. Таким образом, при появлении хотя бы двух гармоник можно определить скорость вращения в области пространственной локализации ТАЕ. Полученные результаты сравниваются с данными о вращении плазмы, полученными при помощи диагностики CXRS [8] и расчетной скоростью вращения, вычисленной на основании функции

распределения быстрых ионов, рассчитанной кодом NUBEAM [9,10].

Исследование выполнено при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 17-12-01177-П).

Литература

- [1]. V. B. Minaev et al, Nucl. Fusion **57** 066047 (2017)
- [2]. V. K. Gusev et al, Nucl. Fusion **55** 104016 (2015)
- [3]. I. M. Balachenkov et al, Tech. Phys. Letters **46** 1157–1161 (2020)
- [4]. E. D. Fredrickson et al, Phys. Plasmas **14** 102510 (2008)
- [5]. V. V. Bulanin et al, Tech. Phys. Letters **47** 197–200 (2021)
- [6]. Yu. V. Petrov et al, Plasma Phys. Rep. **25** 723 (2019)
- [7]. M. Podestà et al, Nucl. Fusion **52** 094001 (2012)
- [8]. А.Ю. Тельнова, И.В. Мирошников, М.М. Митранкова, Н.Н. Бахарев, В.К. Гусев, Н.С. Жильцов, Е.О. Киселев, Г.С. Курскиев, В.Б. Минаев, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, П.Б. Щёголев, Е.А. Тюхменева // Письма в ЖТФ **47** В. 9 С. 25 – 28 (2021)
- [9]. A. Pankin et al. Comp. Phys. Communications **159** 157 (2004)
- [10]. E. O. Kiselev et al, J. Phys.: Conf. Ser. **1383** 012002 (2019)

МГД-ДИАГНОСТИКА ТОКАМАКОВ Т-11М И Т-15МД

Балашов А.Ю.¹, Белов А.М.^{1,2}, Степин А.В.¹, Сушков А.В.¹,
Семенов П.С.^{1,3}

e-mail: sasha-balashov-2012@mail.ru

¹НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия, 123098

²АО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”, Москва, Троицк, Россия, 142092

³ФГБОУ ВО “НИУ “МЭИ”, Москва, Россия, 111250

Система МГД-диагностики токамака регистрирует флуктуации магнитного поля тока плазменного шнура. Для регистрации развития МГД-неустойчивостей используются наборы локальных магнитных зондов индукционного типа (МГД зонды). С целью определения полоидального значения моды m винтовой неустойчивости достаточно набора магнитных зондов, размещённых в полоидальном сечении вакуумной камеры (ВК) токамака. Чтобы определить тороидальное значение моды n , необходимо два набора магнитных зондов, размещённых в двух полоидальных сечениях ВК, либо один набор, размещённый в тороидальном сечении.

На токамаке Т-15МД регистрация развития МГД неустойчивостей плазмы будет осуществляться двумя типами зондов – низкочастотными и высокочастотными зондами [1].

Низкочастотные МГД зонды, равномерно размещаются в вакууме в 2-х полоидальных сечениях ВК по 39 шт. в каждом (всего 78 шт.), а также в одном тороидальном сечении камеры (всего 39 шт.). Основные характеристики зонда: двухслойная катушки индуктивности (в пером слое 13 витков, во втором – 12); кирс-кабель КНМСС 1x0,07 d1,5 мм; R=34 Ом; L=18,7 мкГн; NS_{РАСЧ} ≈ 120 см².

Высокочастотные МГД зонды размещаются в 4-х полоидальных сечениях ВК по 48 шт. в каждом (всего 192 шт.). Данные зонды помещаются внутрь ВК в специальные тонкостенные металлические защитные трубки $10 \times 0,3$ мм (диаметр \times толщина). Параметры прототипа высокочастотного зонда для токамака Т-15МД: двухслойная катушка индуктивности по 75 витков в каждом слое; микропровод ПНЭТ-имид $d0,2$ мм; защитная лента из фторопласт-4 (не менее 8 слоёв) для обеспечения механической и электрической защиты; $R=2,0$ Ом, $L=35$ мкГн, $NS_{расч} \approx 87$ см².

Низкочастотные МГД зонды Т-15МД изготовлены на заводе компании ООО “НПО ГКМП” (г. Брянск). В НИЦ “Курчатовский институт” проведена их калибровка с относительной погрешностью не более 0,1%. Высокочастотные зонды для токамака Т-15МД будут изготовлены после физического пуска установки.

Магнитные зонды МГД-диагностики токамака Т-11М, которые эксплуатировались с 2000 года [2], требовали замены. В связи с чем, летом 2021 г. были заменены все зонды предыдущей версии на новые. Модернизированная система МГД-диагностики токамака Т-11М содержит две линейки из 28 и 32 шт. локальных магнитных зондов (всего 60 шт.), расположенных в двух полоидальных сечениях ВК токамака, угол между которыми в тороидальном направлении составляет 8°. Данные высокочастотные магнитные зонды, равномерно размещаются внутри ВК в тонкостенных металлических защитных трубках $10 \times 0,3$ мм. Основные параметры зонда: двухслойная катушка индуктивности по 45 витков в каждом слое, микропровод ПНЭТ-имид $d0,2$ мм; защитная лента из фторопласт-4 (не менее 8 слоёв); $R=1,2$ Ом; $L=18,3$ мкГн. Каждый зонд откалиброван с погрешностью не более 0,5%, усреднённое значение действующей площади сечения по всем зондам $\langle NS \rangle = 21,7$ см².

Регистрация сигналов изготовленных для Т-11М магнитных зондов будет осуществляться системой сбора данных на оборудовании компании National Instruments, работающей в стандарте PXI / PXI Express. Магнитные зонды имеют хорошую

электроизоляцию (18 кВ) от элементов ВК, что наряду с опытом эксплуатации магнитных зондов на токамаке Т-11М, позволяет оцифровывать сигналы зондов без использования гальванических развязок. В качестве источника э/питания системы сбора данных используется источник бесперебойного питания (ИБП), который автоматически на время рабочего импульса токамака переходит в автономный режим работы – происходит разрыв по всем полюсам э/питания ИБП от внешней э/сети. При исследовании динамики неустойчивости срыва с целью предотвращения выхода сигнала магнитных зондов за динамический диапазон АЦП на выходе зондов могут устанавливаться RC-цепочки. Для передачи сигналов магнитных зондов к регистрирующей аппаратуре используется витая пара в оплетке, длина трассы примерно ~10 м. В дальнейшем предполагается перейти на Ethernet-кабель 5 или 6 категории.

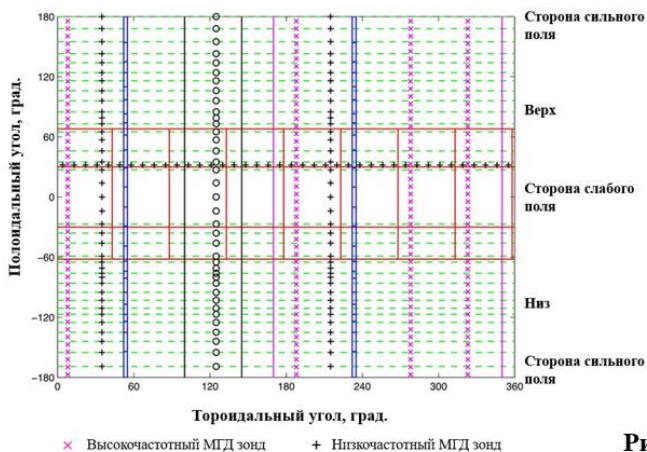


Рис. 1. Развёртка поверхности ВК Т-15МД с указанием расположения МГД зондов.

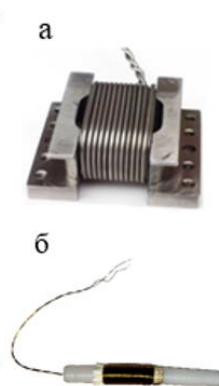


Рис. 2. МГД зонды:
а – низкочастотный МГД зонд токамака Т-15МД;
б – высокочастотный МГД зонд токамаков Т-15МД и Т-11М.

Литература

- [1]. A. V. Sushkov, A.M. Belov, G.B. Igonkina et al. Design of inductive sensors and data acquisition system for diagnostics of magnetohydrodynamic instabilities on the T-15MD tokamak. Fusion Engineering and Design, 2019, **146**, p.383-387.
- [2]. А.М. Белов, И.Н. Макашин. МГД-диагностика на токамаке Т-11М.
// Физика плазмы, 2004, **30**, вып.2, с.195-199.

КАЛИБРОВКА ЛОКАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ЗОНДОВ ТОКАМАКА Т-15МД

Степин А.В.¹, Балашов А.Ю.¹, Белов А.М.¹, Игонькина Г.Б.¹,
Семенов П.С.^{1,2}, Соколов М.М.¹, Сушков А.В.¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия,
nrcki@nrcki.ru

² Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»,
Москва, Россия, universe@mpei.ac.ru

В НИЦ “Курчатовский институт” осуществляется подготовка к физическому пуску установки токамак Т-15МД ($R=1.48$ м, $a=0.67$ м, $k=0.3\div 0.4$, $I_p=2$ МА, $V_T=2$ Тл, $t_{разр.}=30$ с) [1]. Система электромагнитной диагностики Т-15МД будет состоять из более чем 400 магнитных датчиков индукционного типа, которые являются элементами вакуумной камеры (ВК) токамака. Датчики имеют различные геометрические параметры, чувствительность (действующая площадь сечения катушки индуктивности NS), и обеспечивают измерения как локальных, так усреднённых (по размерам всей установки или какой-то её части) значений магнитных полей. Часть этих датчиков задействована в системе управления положением и формой плазменного шнура, работающей в режиме реального времени.

На Рис.1 представлены основные типы магнитных датчиков токамака Т-15МД: датчики напряжения на обходе плазменного шнура (ДНО); петли секторные, расположены вдоль тороидального обхода ВК (ПСТ), петли седловые, расположены вдоль полоидального обхода (ПСП), пояса Роговского снаружи/внутри ВК (ПРН/ПРВ); датчики формы (ДФ); МГД-зонды вдоль полоидального/тороидального обходов (МГДП/МГДТ); и МГД-зонды, размещённые вдоль полоидального обхода в тонкостенных металлических трубках, открытых на атмосферу (МГДА). По своим геометрическим размерам магнитные датчики разделяются на три группы: датчики сравнимые с размерами установки Т-15МД – ДНО и

ПСТ, значения NS для них рассчитывается по чертежам; распределенные датчики – ПСП, NS рассчитывается путём непосредственных измерений их геометрических размеров (ПСП – это прямоугольные катушки с длинами от 297 до 400 мм, шириной 13.7 мм и высотой 58 мм); и локальные датчики – ДФ, МГДП, МГДТ и МГДА, которые имеют габариты порядка нескольких сантиметров, для них уже возможно создать стенд проведения калибровки значения NS катушки.



Рис.1. Схема э/м диагностики Т-15МД.



Рис.2. Фото локальных магнитных зондов (кирскабель) Т-15МД.

Локальные магнитные зонды представлены катушками трех типов: первые два типа это зонды, намотанные кирскабелем $\varnothing 1.5$ мм на прямоугольное основание из нержавеющей стали (МГДП, МГДТ – однокомпонентные и ДФ – двухкомпонентные, их габаритные размеры $49 \times 23 \times 42$ мм³) [2], Рис.2; и зонды на фторопластовой трубке (МГДА) с намоткой микропроводом ПНЭТ-имид $\varnothing 0.2$ мм, длиной катушки $\sim 15 \dots 10$ мм и $\varnothing 8$ мм.

Для калибровки локальных магнитных зондов был разработан стенд на основе катушек Гельмгольца, сами катушки Гельмгольца рассчитывались из условия, что они должны создавать область с однородным магнитным полем несколько большим, чем геометрические размеры эталонной катушки, относительно которой осуществляется калибровка, и локальных магнитных зондов, которые подлежат калибровке. Методика калибровки магнитных зондов основана на измерении отношения сигналов, одновременно регистрируемых как в калибруемой катушке, так и в эталонной. Поэтому, отклонения амплитуды

магнитного поля внутри катушек Гельмгольца от измерения к измерению, не влияют на результаты калибровки. Принимая, что разброс полученных значений отношения сигналов калибруемой катушки к эталонной распределён по нормальному закону, тогда это позволяет определить значение NS и относительную погрешность этого значения для каждой калибруемой катушки. Значения NS магнитных зондов, изготовленных из кирскабеля, получены с относительной погрешностью не хуже 0,1%.

Регистрация и первичная обработка сигналов калибруемой и эталонной катушек осуществлялась с помощью автоматизированного аппаратного-программного комплекса [3], всего было проведено более 1500 измерений для 197 катушек, хранение результатов измерений и финальная обработка данных осуществлялись в реляционной СУБД.

Литература

- [1]. П.П. Хвостенко, И.О. Анашкин, Э.Н. Бондарчук, Н.В. Инютин, В.А. Крылов, И.В. Левин, А.Б. Минеев, М.М. Соколов. Экспериментальная термоядерная установка токамак Т-15МД. //ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 15-38.
- [2]. A.V. Sushkov, A.M. Belov, G.B. Igonkina et al. Design of inductive sensors and data acquisition system for diagnostics of magnetohydrodynamic instabilities of the T-15MD tokamak. //Fusion Engineering and Design, 2019, vol. 146, p. 383-387.
- [3]. Г.Б. Игонькина, М.М. Соколов, А.М. Белов, А.В. Сушков. Программа для калибровки и определения полосы частот индуктивных датчиков электромагнитной диагностики токамака Т-15МД "EMDTEST". Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020615357, 21.05.2020. Заявка №2020614200 от 17.04.2020.

*Системы сбора и обработка
экспериментальных данных,
диагностические средства и
метрологическое обеспечение
измерений*

**ЭЛЕМЕНТЫ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ
УДАЛЕННОГО УЧАСТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ
ИТЭР**

Степанов Д.¹, Лобес Л.², Семенов О.³

¹*Организация ИТЭР, г. Сен-Поль-ле-Дюранс, Франция*

²*Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, пр.
Ленина, д. 30*

³*«Проектный центр ИТЭР», Россия, г. Москва, пл. Академика
Курчатова, д. 1, стр. 3, Denis.Stepanov@iter.org*

Международный проект токамака ИТЭР создается при участии семи равноправных партнеров и более тридцати стран-участниц. Соглашение ИТЭР с самого начала предусматривало полный и беспрепятственный доступ к проектной документации и результатам экспериментов для всех участников. В связи с этим, в систему сбора данных установки изначально закладывается возможность удаленного доступа и обработки данных, как вне, так и в процессе эксперимента. Недавние ограничения на передвижение специалистов только подчеркнули эту необходимость, а также ускорили внедрение удаленного доступа для помощи при проведении пуско-наладочных работ подсистем ИТЭР.

В данной работе дается схематичное описание архитектуры систем управления и сбора данных с точки зрения

удаленного участия. В зависимости от требуемых задач, удаленные пользователи могут подключаться к веб-приложениям системы сбора данных, к вычислительному кластеру ИТЭР, к рабочим станциям внешнего контура системы управления в режиме «только чтение». Для специализированных центров удаленного участия создается инфраструктура в виде выделенных высокопроизводительных (от сотен мбит/с до десятков гбит/с) трансконтинентальных каналов связи VPN. Это позволяет организовывать быстрый доступ к архивам в центре хранения и обработки данных (ЦОД) ИТЭР, а также, при необходимости, синхронизировать копии архивов для последующей обработки данных на местах. Более того, было показано, что достигнутая производительность позволяет передавать посредством однонаправленных шлюзов некоторый сетевой трафик из внутреннего контура системы управления, что дает возможность создавать удаленные рабочие станции, практически идентичные станциям находящимся в зале управления ИТЭР. На данный момент ИТЭР работает над созданием специализированных ЦОД непосредственно в организации ИТЭР, а также на внешней площадке в г. Марсель, Франция. Ведутся переговоры с ведущими поставщиками сетевых услуг стран-участниц (GEANT, RENATER, NTT, SINET, ESNET, и т.д.) для обеспечения высокоскоростного доступа уже в рамках технологического пуска ИТЭР, планируемого в 2025 г. По состоянию на 2021 г., три участника проекта – Россия, США и Япония – подключены в тестовом режиме на постоянной основе; рассматривается подключение других участников. Из них российский центр удаленного участия в г. Троицк является наиболее продвинутым в плане доступной функциональности; на его основе отрабатываются технологии для других участников проекта.

В работе также кратко освещаются элементы удаленного участия за пределами сбора и обработки данных. В частности, рассматриваются условия удаленного взаимодействия с операторами установки в условиях эксплуатации ИТЭР по правилам, сходным с правилами эксплуатации атомных

электростанций. Уделено внимание интерфейсам «человек-человек» и «человек-машина», средствам интеграции систем управления и сбора данных с платформами для планирования эксперимента, бизнес-приложениями организации ИТЭР, портативными устройствами, облачными платформами для коммуникации, офисными средствами.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПЫТА МОДЕЛИ РОССИЙСКОГО ЦЕНТРА УДАЛЕННОГО УЧАСТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОГРАММЕ ИТЭР

Семенов О.И.¹, Звонарева А.А.¹, Ларионов А.С.¹, Лобес Л.А.³,
Миронов А.Ю., Миронова Е.Ю.¹, Нагорный Н.В.¹,
Портоне С.С.¹, Степанов Д.Н.², Семенов И.Б.¹

¹*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,*

O.Semenov@iterrf.ru

²*Организация ИТЭР, Сен-Поль-ле-Дюранс, Седекс, Франция*

³*Томский политехнический университет, Томск, Россия*

Модель Российского центра удаленного участия (RPC) была создана в рамках контракта между Российским Домашним Агентством ИТЭР и Госкорпорацией «Росатом» как прототип полномасштабного центра дистанционного участия для экспериментов ИТЭР. В рамках модели проведены исследования следующих технических и научных задач:

1. Исследование протоколов, методов и каналов передачи данных через существующие общедоступные сети с целью выработки стратегии подключения к системе сбора данных ИТЭР и тестирование различных интерфейсов удаленного доступа к данным ИТЭР.

2. Исследование вопросов безопасности доступа к ИТ-инфраструктуре ИТЭР. Исследования вопросов зонирования ИТ сетей в соответствии с требованиями кибербезопасности и стандарта ИЕС 62645.

3. Тестирование различных интерфейсов удаленного взаимодействия между участниками экспериментальной программы, включая инструмент визуализации и анализа данных, удаленное копирование центральных экранов и интерфейсов

диагностик, методы голосового и визуального взаимодействия между участниками.

4. Дистанционный мониторинг российских диагностик плазмы и технических систем. Доступ к экспериментальным данным.

5. Локальная обработка данных с интеграцией существующего программного обеспечения для обработки данных (визуализация, анализ и т. д.) и дистанционный анализ данных через интерфейсы дистанционного участия.

В работе были исследованы процессы передачи данных (задержка, скорость, стабильность, одиночный и многопоточный поток данных и т. д.), а также вопросы безопасности рамках 2 независимых L3-подключений к Международной Организации ИТЭР через публичную сеть интернет и сеть GEANT. Кроме того, протестированы различные инструменты ИТЭР для удаленного участия, такие как совместное использование экрана, просмотр данных и т. д., из Российского центра удаленного участия в Международной Организации ИТЭР (расстояние около 3000 километров).

Эксперименты показали, что наиболее стабильным и гибким вариантом для демонстрации данных в реальном времени и создания эффекта присутствия является шлюз EPICS. Совместно с инструментом ИТЭР dashboard применение этих решений позволяет имитировать практически любую функциональную часть Главной Контрольной Комнаты ИТЭР на стороне удаленного участника. Такой подход позволяет создавать собственные экраны операторов и настраивать существующие под собственные нужды. Используя эти инструменты, обеспечена возможность удаленно вводить в эксплуатацию различные системы без каких-либо серьезных ограничений. Для задач зеркалирования данных предполагается репликация серверов ИТЭР UDA на российскую сторону. Это позволит улучшить производительность при использовании инструментов просмотра данных и некоторых других задач, связанных с архивированием и обработкой данных. Стратегия подключения к сетям ИТЭР все

еще находится в стадии разработки совместно с Международной Организацией ИТЭР.

Благодаря этой работе Российская Федерация стала одной из первых стран участниц проекта ИТЭР, обеспечивших прямое подключение к данным установки. Результаты работы представляют дорожную карту для участия в экспериментальной программе всех партнеров проекта в будущем. Кроме того, в рамках исследований возможностей Модели Центра проведены удаленные испытания нейтронной диагностики на реакторе ИБР-2 (ОИЯИ г. Дубна), а также различные эксперименты на нейтронном генераторе в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ». Результаты этой работы также легли в основу технологий и методов, необходимых для реализации государственным контрактом от 26.04.2021 №Н.4Q.241.09.21.1092 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в РФ. Этап 2021 года».

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 11.05.2021 № Н.4а.241.19.21.1038 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году» с Госкорпорацией «Росатом» и рабочему соглашению С45TD15FR с Международной Организацией ИТЭР.

КОНЦЕПЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ ЗНАНИЯМИ В ПРОЕКТЕ ИТЭР

Семенов Е.В., Миронова Е.Ю., Семенов О.И., Портоне С.С.,
Семёнов И.Б.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
E.Semenov@iterrf.ru*

За прошедшие полвека исследований в области УТС был накоплен огромный пласт знаний наукоемкого направления исследований, информацию о котором необходимо сохранить и использовать для реализации национальной программы УТС. С учетом того, что в настоящий момент информация по установкам УТС сильно фрагментирована и не всегда доступна в цифровом виде, или зачастую является неформализованным экспертным знанием, существует реальная потребность в создании базы данных термоядерных исследований и технологий в России, которая включила бы в себя существующую информацию о российских и зарубежных установках УТС, в частности проекте ИТЭР, включая данные об экспертном сообществе, экспериментальную, техническую и другую общедоступную информацию.

С целью формирования структуры российской базы данных в области УТС были проанализированы технологическое разбиение установки ИТЭР на подсистемы, а также содержание и структура различных баз данных ИТЭР и опыт Международной организации ИТЭР в области управления знаниями. В процессе работы был исследован передовой опыт в области управления знаниями для предприятий атомной отрасли и научно-исследовательских организаций в области УТС.

В работе представлена классификация систем термоядерных установок, структура типов данных в области УТС и проекция разработанных структур на технологические и диагностические подсистемы установки ИТЭР, поставляемые РФ. Сформулированы предварительные технические требования, предъявляемые к базе данных термоядерных исследований и технологий с учетом реализации федеральной программы по направлениям разработки и создания аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в РФ и проекта Токамака с Реакторными Технологиейми (ТРТ).

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 11.05.2021 № Н.4а.241.19.21.1038 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ АППАРАТНО-ИНФРАСТРУКТУРНОЙ ПЛАТФОРМЫ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА В ОБЛАСТИ УТС

Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Семенов О.И., Ежова З.В.,
Миронов А.Ю., Семенов Е.В., Ларионов А.С., Нагорный Н.В.,
Звонарева А.А., Григорян Л.А.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
S.Portone@iterrf.ru*

Для развития науки, подготовки и повышения квалификации научно-технических кадров в РФ важно обеспечить возможность дистанционного участия в совместных научных исследованиях в области УТС для территориально-распределенных научно-исследовательских центров, лабораторий и ВУЗов. В 2021 начаты работы по разработке и созданию аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства (ИКП) в области термоядерных исследований. К концу 2024 года планируется создать аппаратно-инфраструктурную платформу и начать полнофункциональную эксплуатацию ИКП.

Подключение к платформе участников из научных и образовательных организаций, осуществляющих подготовку специалистов в области УТС, и объединение их в единое ИКП позволит повысить эффективность научных исследований за счет консолидации научно-технических знаний и компетенций всего сообщества исследователей УТС. Платформа ИКП станет технологическим базисом для модернизации модели проведения научно-исследовательской деятельности и формирования единого информационного пространства научно-технических данных, нормативно-справочной информации, метаданных и пр.

В докладе описаны основные этапы создания единой платформы ИКП, рассмотрены основные функциональные и технические требования к аппаратно-инфраструктурной платформе, представлена архитектура платформы ИКП, а также обозначены участники информационно коммуникационного пространства.

Доклад ставит своей целью продемонстрировать участникам УТС сообщества подходы к построению аппаратно-инфраструктурной платформы, ее планируемый функционал для расширения числа участников ИКП, а также возможного применения платформы в смежных с УТС областях науки.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.04.2021 №Н.4Q.241.09.21.1092 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в РФ. Этап 2021 года».

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К АППАРАТНО-ИНФРАСТРУКТУРНОЙ ПЛАТФОРМЕ ИНФОРМАЦИОННО- КОММУНИКАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА В ОБЛАСТИ УТС

Ежова З.В., Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Миронов А.Ю.,
Звонарева А.А., Семенов О.И.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
Z.Ezhova@iterrf.ru*

Аппаратно-инфраструктурная платформа информационно-коммуникационного пространства (ИКП) является технологическим базисом для осуществления удалённой экспериментальной деятельности в области исследований термоядерного синтеза в Российской Федерации. Ключевой задачей платформы ИКП является предоставление совместного доступа к научным данным установок и стендов, получаемым в результате экспериментальной деятельности.

В докладе рассмотрены основные функциональные требования, предъявляемые к аппаратно-инфраструктурной платформе ИКП. На их основе определены сервисы и подсистемы аппаратно-инфраструктурной платформы.

Целью доклада является информирование участников УТС сообщества об основном функционале аппаратно-инфраструктурной платформы ИКП, формулирование и уточнение функциональных требований к сервисам и подсистемам платформы. Результаты представленной работы возможны к применению при разработке цифровых платформ, объединяющих научные сообщества.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.04.2021 №Н.4Q.241.09.21.1092 «Разработка и

создание аппаратно-инфраструктурной платформы
информационно-коммуникационного пространства в области
термоядерных исследований в РФ. Этап 2021 года».

АППАРАТНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ТЕСТОВОЙ ПЛОЩАДКИ ПЛАТФОРМЫ ИКП

Ларионов А.С., Портоне С.С., Семенов О.И., Миронов А.Ю.,
Миронова Е.Ю.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
A.Larionov@iterrf.ru*

Аппаратно-инфраструктурная платформа информационно-коммуникационного пространства (ИКП) является централизованной информационной системой. Основной функционал платформы представлен уровнями консолидации, обработки и хранения данных и планируется к реализации на центральном узле ИКП. Для апробирования программно-аппаратных средств платформы ИКП и, в частности, центрального узла на этапе проектирования создается тестовая площадка. Обмен информацией между участниками ИКП идет через центральный узел, на который таким образом ложится большая нагрузка, что, соответственно, накладывает требования на производительность. Предусматривается резервирование основных серверных компонентов центрального узла для быстрого восстановления в случае выхода их из строя.

Аппаратная инфраструктура тестовой площадки платформы ИКП включает в себя комплекс, состоящий из множества устройств: устройства защиты информации, коммутаторы, серверы, рабочие станции, устройства видеоконференцсвязи и т.д.

При создании аппаратной инфраструктуры тестовой площадки особое внимание было уделено производительности, масштабируемости и отказоустойчивости.

В докладе рассматриваются схемы и основные аспекты аппаратной инфраструктуры тестовой площадки платформы ИКП.

В данной работе преследуется цель познакомить архитекторов и инженеров информационных систем с современными решениями в области создания инфраструктуры цифровых платформ, такими как: современные решения построения защищенных каналов связи, высокодоступные сетевые и серверные решения, высокоскоростные решения хранения данных.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.04.2021 №Н.4Q.241.09.21.1092 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в РФ. Этап 2021 года».

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ АППАРАТНО-ИНФРАСТРУКТУРНОЙ ПЛАТФОРМЫ ИНФОРМАЦИОННО- КОММУНИКАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА В ОБЛАСТИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РФ

Григорян Л.А., Портоне С.С., Семёнов О.И., Миронова Е.Ю.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия
L.Grigorian@iterrf.ru*

Для проведения экспериментальных исследований в области УТС существует множество различных установок и стендов в РФ. Данные установки уникальны и находятся достаточно удаленно друг от друга, что вызывает сложность в проведении совместных экспериментов. С целью обеспечения возможности удаленного участия в экспериментах учеными из разных уголков страны разрабатывается аппаратно-инфраструктурная платформа информационно-коммуникационного пространства (АИП ИКП) в области УТС в РФ.

АИП ИКП относится к информационным системам общего пользования, ввиду этого, возникает ряд требований к разработке средств обеспечения информационной безопасности и защиты информации, необходимых для сохранности и конфиденциальности персональных данных пользователей, а также информации ограниченного распространения.

В докладе рассматриваются основные требования к открытым информационным системам, регламентированные нормативными актами Правительства РФ, Государственными стандартами (ГОСТ), указами и рекомендациями Федеральной

службы безопасности (ФСБ) и Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК), применимые к проектируемой АИП ИКП. Описываются принципы защиты хранимой информации, обосновывается выбор того или иного решения. В ходе проектирования определяются классы: защищенности АИП ИКП, защищенности ПДн, информационной системы общего пользования, требований к межсетевым экранам, средствам антивирусной защиты и программному обеспечению (ПО). Рассматривается маршрутная карта информации, передаваемой как от конечного пользователя в АИП ИКП, так и наоборот, с точки зрения средств защиты информации.

Целью данной работы является знакомство разработчиков информационных систем с аспектами и методами обеспечения защиты информации. В работе приводятся примеры использования классификаций в зависимости от поставленных перед разработчиком задач и особенностей разрабатываемой им информационной системы.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.04.2021 №Н.4Q.241.09.21.1092 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в РФ. Этап 2021 года».

ПОДГОТОВКА ПРОЕКТОВ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ В ENTERPRISE ARCHITECT

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

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
N.Nagorni@iterrf.ru*

Проектирование подсистем сбора, обработки данных и управления диагностических систем установки ИТЭР включает многие важные этапы, независимо от принципов работы, масштабов и сложности измерительной системы. Основными этапами являются: анализ и оптимизация требований проекта и будущих пользователей, анализ особенностей планируемых измерений и построения измерительной системы, определение архитектуры и выбор технических средств, разработку подходов к будущей системе (синхронизированной и интегрированной в процессы работы установки как комплекса), выполнение процедурного и функционального анализа, а также последующее создание проектной документации согласно этапу жизненного цикла проекта. Большая часть диагностических систем ответственности Российской Федерации в рамках проекта ИТЭР успешно прошли защиты предварительного проекта (PDR) и находятся на этапе подготовки к защите финального проекта (FDR). Достаточный уровень детализации при проектировании достигается с использованием предметно-ориентированных языков моделирования систем UML и SysML в Enterprise Architect, а также разработанных специально для ИТЭР надстроек и шаблонов.

В докладе рассматриваются основные аспекты создания проекта системы сбора данных и управления в Enterprise Architect

в соответствии с требованиями проекта ИТЭР к финальной стадии проектирования. Проработка проекта включает в себя: описание автоматов состояний и их взаимодействия, определение глубины процедурного описания, функциональный анализ многоканальных систем, представление аппаратных и программных архитектур. Этот процесс требует от разработчиков полного понимания устройства измерительной системы и принципов ее работы, а также предложенных ИТЭР методологии и инструментария.

В данной работе преследуется цель познакомить разработчиков с рядом аспектов системной инженерии, подробно рассказать о проектировании в Enterprise Architect с целью оптимизации (путем минимизации ошибок и недопониманий) и ускорения выполнения работ над проектами систем сбора, обработки данных и управления. В работе приводятся примеры проектов диагностических систем ИТЭР в Enterprise Architect с акцентами на важные особенности и уточнения, полученные в результате совместной работы со специалистами ИТЭР.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 11.05.2021 № Н.4а.241.19.21.1038 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

ТРЕБОВАНИЯ К РАЗРАБОТКЕ ЭКРАНОВ ОПЕРАТОРОВ ДЛЯ УСТАНОВКИ ИТЭР И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРОГРАММНОГО ИНСТРУМЕНТА CONTROL SYSTEM STUDIO

Звонарева А.А., Нагорный Н.В., Миронова Е.Ю., Мионов А.Ю.,
Портоне С.С.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
A.Zvonareva@iterrf.ru*

В состав ИТЭР входит множество технологических и диагностических подсистем, которые должны иметь возможность управления и отображения данных на экранах операторов в центральной пультовой. Поскольку в создании систем управления принимает участие большое количество разработчиков со всего мира необходимы общие подходы и требования, предъявляемые к человеко-машинным интерфейсам (ЧМИ).

Инструментом для создания ЧМИ в ИТЭР является Control System Studio (CS-Studio). Данное программное обеспечение поставляется в составе пакета CODAC Core System и является неотъемлемой частью среды проектирования и разработки систем управления в проекте ИТЭР. На всех этапах жизненного цикла установки требуется работа большого количества функциональных групп людей (ученые, инженеры, операторы и т.д.), для которых необходимо обеспечить представление данных и панелей управления. Исходя из этого, важной задачей является создание удобного и продуманного ЧМИ для облегчения их работы.

В докладе рассказывается о возможностях программной среды CS-Studio, требованиях к разработке человеко-машинных интерфейсов для систем управления диагностическими и

технологическими системами ИТЭР, приводятся образцы экранов операторов, а также структурированы предложения по доработке подходов с точки зрения отображения информации высоконагруженных систем регистрации и обработки сигналов диагностических систем. В докладе также представлен краткий обзор системы архивации инженерных данных BEAUTY и системы аварийных предупреждений BEAST.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 11.05.2021 № Н.4а.241.19.21.1038 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

ПОДГОТОВКА К ПРОИЗВОДСТВУ И ПРОВЕДЕНИЕ ЗАВОДСКИХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИТЭР

Миронов А.Ю., Нагорный Н.В., Миронова Е.Ю., Портоне С.С.,
Звонарева А.А.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
A.Mironov@iterrf.ru*

Этап проектирования систем сбора данных и управления для технологических систем в рамках обязательств Российской Федерации перед ИТЭР подошел к концу. В настоящее время завершается этап подготовки к производству (MRR), производства и начинается этап заводских испытаний системы (FAT) перед поставкой всей системы на площадку ИТЭР.

На примере систем сбора данных и управления для технологических подсистем ИТЭР Port Plug Test Facility (PPTF) и ЕС RF Gyrotrons в докладе рассматриваются основные моменты, нюансы и трудности, которые были выявлены в рамках разработки программного и аппаратного обеспечения, а также проведения заводских испытаний. Показаны примеры глубоко детализированной документации для разработки ПО, САД документации, по которой осуществляется монтаж стоек управления и другого необходимого оборудования, а также представлены примеры инженерных экранов оператора, которые использовались для детального тестирования на этапе заводских испытаний.

Ввиду того, что сроки проектирования, производства и поставки систем сбора данных и управления для диагностических подсистем ИТЭР более поздний (по сравнению с технологическими системами), данный доклад поможет

разработчикам систем сбора данных и управления более детально подготовиться к этапам MRR и FAT и еще находясь на стадии дизайна получить представление о вышеупомянутых этапах с целью правильного распределения ресурсов на создание глубоко детализированной документации к производству.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 11.05.2021 № Н.4а.241.19.21.1038 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ МОДУЛЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА

Журавлёв М. К., Немцев Г. Е., Нагорный Н. В., Мещанинов С. А.
Родионов Р. Н., Миронов А. Ю., Звонарева А. А., Миронова Е.
Ю., Портоне С.С., Гужев Д. И., Семёнов И.Б.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
M.Zhuravlev@iterrf.ru*

В проекте ИТЭР планируется применение нескольких диагностических систем, предназначенных для анализа плазмы как источника нейтронов. Среди них – Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК), состоящая из 12 детекторных модулей, 6 из которых установлены в верхнем диагностическом порту вакуумной камеры №18, 6 – в нижнем, №14. Детекторные модули направлены обращены к плазме через нейтронные коллиматоры. Все они установлены в полоидальном сечении вакуумной камеры под разными углами. С помощью системы сбора и обработки данных предполагается определять профиль плазмы как источника нейтронов, а также измерять термоядерную мощность, интенсивность и полный поток нейтронов. Система в совокупности имеет 48 детекторов: 24 ионизационных камеры деления (ИКД) и 24 алмазных детектора (АД). Детекторы скомпонованы в детекторные модули по принципу 2 ИКД + 2 АД.

На текущем этапе разработки ВНК возникла необходимость в создании вычислительного модуля, который мог бы в режиме реального времени обрабатывать сигнал алмазного детектора. Его назначение - сбор статистики по амплитудам импульсов и определение средней частоты их следования (амплитудный спектр и скорость счёта импульсов,

соответственно). Конечное устройство в перспективе должно стать составной частью измерительных каналов ВНК.

Длительность одиночного импульса от алмазного детектора после предварительного усиления составляет около 50 нс, поэтому для точного определения амплитуды требуется частота оцифровки не менее 500 МГц. На данный момент используется 12-битный АЦП с частотой оцифровки 800 МГц.

В данном докладе представлены результаты проектирования, разработки и тестирования модуля цифровой обработки сигнала алмазного детектора. Рассматривается процесс разработки алгоритма обработки сигнала, приводится обзор используемого оборудования, описываются методики тестирования и результаты проведения испытаний.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 11.05.2021 № Н.4а.241.19.21.1038 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

ИНТЕГРАЦИЯ МОДУЛЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА В CODAC CORE SYSTEM

Гужев Д.И., Журавлёв М.К., Нагорный Н.В., Миронова Е.Ю.,
Звонарева А.А., Портоне С.С., Миронов А.Ю., Семёнов И.Б.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
D.Guzhev@iterrf.ru*

В большинстве диагностических систем установки ИТЭР создаются высокоскоростные системы сбора данных с устройствами National Instruments FlexRIO и cRIO на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС/FPGA).

Устройства с FPGA позволяют решать широкий спектр задач, связанных с обработкой сигналов и быстродействием. Они позволяют разработчикам создавать собственные аппаратные решения с высокопроизводительным вводом/выводом и неограниченной гибкостью в настройках синхронизации, триггеров и параллелизма.

Одной из ключевых задач при разработке системы сбора и обработки данных является программная интеграция оборудования NI FlexRIO, для обеспечения работы под управлением операционной системы Red Hat Enterprise Linux и платформы CODAC Core System, созданной на базе Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) специально для ИТЭР.

Создание такой системы сбора и обработки данных предполагает наличие двух стадий. Первая стадия состоит из реализации программы для ПЛИС с использованием графических элементов разработки – LabVIEW FPGA. Вторая стадия разработки включает в себя реализацию программы ИОС (input-output controller) EPICS, которая связывается с аппаратным

обеспечением с помощью программного интерфейса Device Support.

В докладе представлено последовательное описание шагов необходимых для осуществления интеграции оборудования NI FlexRIO 7976R с адаптером высокоскоростного АЦП NI5772, процесс переноса прошивок FPGA, реализующих модуль цифровой обработки сигнала алмазного детектора, в ОС Linux. Описано использование библиотеки Nominal Device Support v3 для создания интерфейса Device Support, а также последующая интеграция в среду EPICS всех функций модуля цифровой обработки сигналов.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 11.05.2021 № Н.4а.241.19.21.1038 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

МАКЕТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СВЕТОВОДА ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ»

Кудрявцев А.В., Груздев С.Н., Парышкин Ю.А., Рахматулин А.Б.

НИЯУ МИФИ, Москва, Россия, info@mephi.ru

В диагностике «Активная спектроскопия» измеряется оптическое излучение, которое возникает при взаимодействии ядер легких примесей в плазме с инжектированным в плазму диагностическим пучком атомов водорода. Свет, порождаемый при таком взаимодействии, собирается оптическим коллектором (системой зеркал, оптики, световодов) и регистрируется специальными спектрометрами с высокой разрешающей способностью. По полученным спектрам излучения, рассчитываются параметры необходимые для контроля и исследования физики плазмы.

Наблюдение производится за той областью плазмы, через которую проходит диагностический пучок. Световой поток из указанной области при помощи первого зеркала и перископической системы линз и зеркал проецируется на вход оптоволоконного световода.

Входной конец световода установлен на специальном приспособлении для позиционирования его относительно светового изображения, получающегося на выходе оптической системы сбора света. Настройка на световое изображение (световое пятно) осуществляется перемещением входного конца световода вдоль трех пространственных осей X , Y , Z и поворотом вокруг оси Z .

Позиционирование конца световода относительно изображения плазменного шнура должно осуществляться таким

образом, чтобы обеспечить максимальную интенсивность «активного» (связанного с диагностическим пучком) светового сигнала в области щелей («идеальное» состояние).

Исходной информацией для оценки световой интенсивности являются 26 спектров излучения, зарегистрированных в одном спектральном диапазоне. В качестве информационного признака о величине световой интенсивности используется либо значение интегральной интенсивности спектра, либо значение заранее выбранного пика в спектре.

В работе по системе управления была рассмотрена задача разработки алгоритма автоматического перемещения конца световода из произвольного состояния в «идеальное» при имеющихся ограничениях блока позиционирования.

Было показано, что данная задача представляет собой математическую задачу оптимизации и сводится к нахождению экстремума целевой функции. Было показано, что в нашем случае величина экстремального параметра является функцией четырех независимых друг от друга параметров (x , y , z , α), и следует использовать многомерные методы оптимизации. Так как использование производной целевой функции в нашем случае является довольно затруднительным, было предложено использовать прямой метод решения задачи оптимизации, в котором не требуется дифференцируемости целевой функции, и она не должна обязательно быть задана аналитически, а именно метод многомерной оптимизации Гаусса – Зейделя. В этом методе для поиска экстремума по одному параметру при поочередном изменении всех параметров было предложено использовать метод сканирования, как наиболее простой.

Проверка разработанных алгоритмов автоматического позиционирования была проведена на модели системы позиционирования. В качестве модели источника света (светового пятна на входе волоконно-оптического световода) использовалось световое пятно, сформированное на экране графического цветного RGB-индикатора.

В качестве модели спектрометрических каналов использовались точечные датчики освещенности типа ВН1750.

В качестве устройства позиционирования датчиков освещенности относительно светового пятна использовалось лабораторное устройство перемещения на базе шаговых двигателей (прототип 3D принтера).

По результатам проведенного тестирования на модели был сделан вывод о том, что все разработанные алгоритмы являются работоспособными и могут быть использованы при проведении дальнейших этапах работ по разработке устройства позиционирования входного торца световода.

На следующем этапе работ разработанные алгоритмы были протестированы на макете системы управления с использованием реального оборудования и программного обеспечения, которое заложено в проекте ССДУ ДАС.

В докладе подробно рассматриваются результаты разработки и испытаний макета системы управления вневакуумными юстируемыми компонентами диагностики.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КАЛИБРОВКИ ФЛУКТУАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ПРИ МАЛОЙ ЗАГРУЗКЕ

Воробьев В.А., Николаев А.И., Кашук Ю.А., Обудовский С.Ю.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
V.Vorobiov@iterrf.ru*

Флуктуационный метод измерения скорости счета является составной частью измерительной системы диагностики диверторный монитор нейтронного потока (ДМНП) ИТЭР. Метод широко применяется и базируется на измерении дисперсии сигнала, формируемого на выходе усилителей ионизационных камер деления (далее – ИКД) диагностики. Теоретической основой метода является т.н. вторая теорема Кэмпбелла. В применении к ИКД – значение дисперсии сигнала ИКД пропорционально интенсивности (скорости счета) импульсов ИКД. Другое название метода - MSV, от английского mean square value. Общее количество флуктуационных каналов измерения в диагностике ДМНП равно 18.

Калибровка флуктуационного канала представляет собой процесс определения коэффициента пропорциональности, который связывают фактически измеряемое значение дисперсии сигнала ИКД и искомое значения скорости счета (загрузки). Таким образом, требуется определение 18 калибровочных коэффициентов.

Необходимо отметить, что коэффициент пропорциональности определяется как параметрами ИКД (амплитудное распределение импульсов тока, время сбора, электрическая емкость), так и техническими характеристиками

измерительной системы (полоса пропускания и коэф-т передачи кабельных линий, усилители, фильтры и пр.).

Согласно известной авторам литературе, второй теореме Кэмпбелла соответствует соотношение вида (r есть средняя интенсивность импульсов):

$$D^2(\eta) = r \langle x^2 \rangle \int_0^{\infty} f^2(t) dt$$

Исходя из этого представления, в реальных приложениях для проведения калибровки требуется аналитическое или экспериментальное исследование двух составляющих: распределения квадратов амплитуд импульсов для определения среднего квадрата амплитуды $\langle x^2 \rangle$ и вида функции $f(t)$, описывающей форму импульсов. При этом проверка правильности расчетов и оценок производится по референсному измерительному каналу (обычно, счетному), что требует достаточно мощного источника нейтронного излучения.

В докладе авторы показывают, что возможно другое представление для второй теоремы Кэмпбелла, а именно:

$$D^2(S) = r \left\langle \int_0^{\infty} f_g^2(t) dt \right\rangle$$

Согласно представленному выражению дисперсия сигнала пропорциональна скорости счета r и среднему значению (угловые скобки) интегралов от квадрата импульсов. Среднее значение и есть искомый коэффициент пропорциональности.

Такое представление позволяет предположить возможность определения коэффициента пропорциональности путем обработки серии импульсов ИКД, полученных от слабого источника нейтронного излучения.

В представленной авторами методике обработка импульсов производится с привлечением сегментированной записи. При этом искомый калибровочный коэффициент определяется непосредственно по формуле

$$C = \left\langle A_j^2 \right\rangle \frac{T}{K}$$

где A_j есть отсчеты сигнала в сегментированной записи, T есть длительность записи, K есть количество сегментов

(соответствует количеству зарегистрированных импульсов) в записи.

Если предположения авторов верны, то предлагаемый метод может найти применение при In-situ калибровке диагностики ДМНП ИТЭР непосредственно на месте ее развертывания.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.21.1038 от 11 мая 2021 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДУЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ ССД ДМНП

Е.С.Мартазов¹, Н.А.Селяев¹, В.А.Воробьёв²

¹ НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация,
ESMartazov@mephi.ru

² Частное учреждение «ИТЭР-Центр», г. Москва, Российская
Федерация

Система сбора и обработки данных (ССД) [1] входит в состав нейтронной диагностики «Диверторный монитор нейтронного потока» (ДМНП) международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР. ССД обрабатывает сигналы шести ионизационных камер деления (ИКД), расположенных снаружи вакуумной камеры токамака под дивертором. ССД имеет распределенную архитектуру и состоит из предварительных усилителей, блока предварительной обработки сигналов камер (БОС) и аппаратуры управления и контроля системы сбора данных.

Для уменьшения длины линий связи и влияния электромагнитных помех предварительные усилители будут устанавливаться в ячейках нижнего порта как можно ближе к модулю детектирования, что предъявляет к ним определенные требования. Предварительные усилители должны работать на длинную линию связи. Коэффициент усиления сигнала ИКД должен быть максимальным для уменьшения влияния помех и не ограничивать динамический диапазон работы ССД. Полоса пропускания и собственные шумы входного каскада должны обеспечивать наилучшее отношение сигнал-шум. В докладе представлены различные варианты построения входных каскадов преобразователя импульсов тока ИКД в импульсы напряжения. Показаны результаты моделирования и макетирования

схемотехники входного каскада, построенного на базе инвертирующего и неинвертирующего включения операционных усилителей. Проводится сравнительный анализ подавления синфазного сигнала и собственных шумов вариантов предусилителей. Приведены обоснование выбранных схемотехнических решений и результаты испытаний модулей МПУ.

Для минимизации объема экранирования и уменьшения влияния радиационного и магнитного излучения схемотехника предварительных усилителей была максимально упрощена. Для быстрой замены и удобства обслуживания преобразователь импульсов тока ИКД в импульсы напряжения каждого канала измерения выделен в отдельный модуль предварительного усилителя (МПУ). Шесть модулей МПУ объединяются в блок предварительных усилителей, который имеет малые размеры и тепловыделение не более 6 Вт. Модули МПУ соединяются с блоком БОС экранированной линией связи длиной не менее 30 метров, что позволяет расположить данный блок в более мягких условиях эксплуатации в галерее здания токамака. В докладе представлена разработанная конструкция модуля предварительного усилителя и блока предварительных усилителей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» в рамках Государственного контракта № Н.4а.241.19.21.1038 от 11 мая 2021 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

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.

ИМИТАТОР СИГНАЛОВ ДЕТЕКТОРНОГО МОДУЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДМНП ИТЭР

Николаев А.И., Воробьев В.А., Джурик А.С., Нагорный Н.В.,
Кашук Ю.А., Обудовский С.Ю.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия,
A.Nikolaev@iterrf.ru*

Диагностика Диверторный монитор нейтронного потока (ДМНП) входит в состав нейтронных диагностик ИТЭР и предназначена для измерения нейтронного потока и термоядерной мощности токамака-реактора ИТЭР. Детекторами нейтронов ДМНП являются ионизационные камеры деления (ИКД). ИКД различной чувствительности объединены в три идентичных детекторных модуля, каждый из которых содержит по 6 камер.

Сбор и обработка данных для каждого модуля ДМНП происходит соответственно по шести измерительным каналам. В каждом канале сигналы ИКД обрабатываются несколькими измерительными алгоритмами, анализирующими скорость счета импульсов, флуктуации сигнала и ионизационный ток.

Одним из возможных, и наиболее эффективных способов комплексной наладки и тестирования системы сбора данных диагностики ДМНП является применение имитатора сигналов ИКД.

В докладе представлен проект 6-ти канального имитатора сигналов детекторного модуля. Имитатор представляет собой аппаратно-программный комплекс, позволяющий генерировать сигналы ИКД с заданными характеристиками (амплитудный спектр, форма импульса, загрузка). Каналы имитатора построены на базе AWG m4i-6621. Три двухканальных AWG установлены в три отдельных системных блока. Управление платами

осуществляется базовым ПО SBench6 и специальным ПО, которые должны обеспечить:

- формирование мастер-файлов испытательных сигналов с заданными параметрами;
- формирование загрузочных файлов испытательных сигналов;
- режим генерации испытательных сигналов – разовый или непрерывный;
- синхронную или независимую работу каналов имитатора.

Для хранения и обработки файлов испытательных сигналов в каждом системном блоке будет установлен RAID-массив на базе SSD дисков объемом 1 ТБ каждый.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.21.1038 от 11 мая 2021 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Джурик А.С., Воробьёв В.А., Кащук Ю.А., Кормилицын Т.М.,
Обудовский С.Ю.,
Панкратенко А.В.

Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «РОСАТОМ» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия, adzhurik@triniti.ru

В работе представлено описание программного обеспечения и используемых алгоритмов обработки сигналов детекторов ионизирующего излучения на основе сцинтилляторов. Сцинтилляционные детекторы ионизирующего излучения широко используются в термоядерных исследованиях для регистрации нейтронного потока. Их применение основано на различии в форме импульса при детектировании нейтронов и гамма-излучения [1]. Для этого используют быстрые АЦП с частотой дискретизации до 500 МГц и разрядностью до 14 бит. Обработка результатов измерений как правило осуществляется «офф-лайн» из-за большого объёма экспериментальных данных. Для обработки сигналов разработано программное обеспечение (ПО) Pulse Shape Visual. Программа позволяет разделять сигналы нейтронного и гамма излучения по форме импульса.

В ПО Pulse Shape Visual реализованы функции:

- Просмотр исходных данных (зарегистрированных сигналов) – режим осциллографа;
- Сохранения исходных данные в текстовом формате;
- Обработка исходных данных в соответствии с алгоритмом разделения;
- Построение амплитудных и площадных спектров сигналов (разделенные спектры для разных частиц

- (нейтроны, γ -кванты, α -частицы, протоны) и суммарные спектры);
- Просмотр исходных данные из выделенной на спектрограмме области (рис.1);
 - Сохранения обработанных данные в текстовом формате;

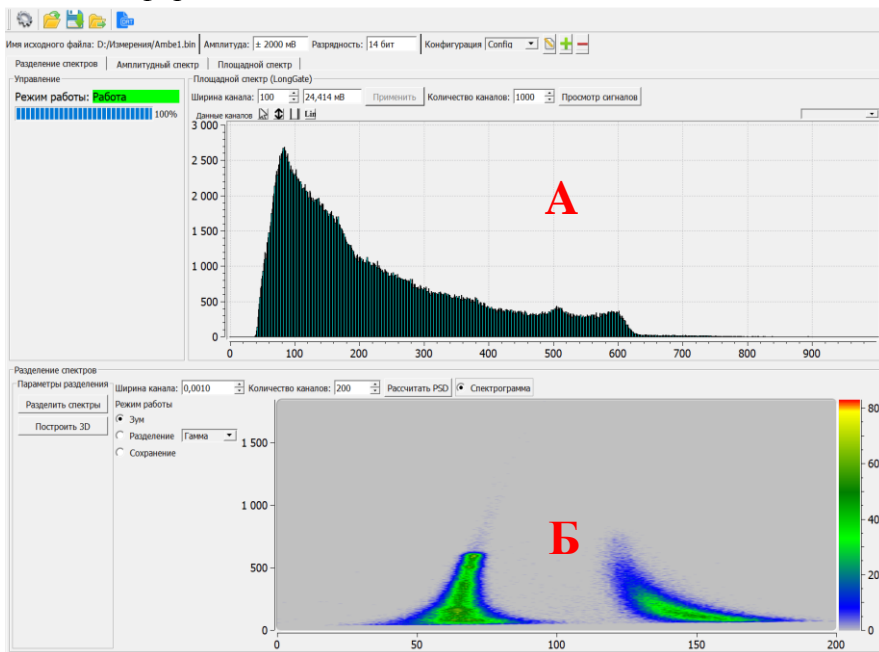


Рис. 2 Интерфейс программы разделения сигналов а-площадной спектр, б – спектрограмма (AmBe)

Программа адаптирована к работе с сцинтилляционными кристаллами NaI(Tl), LaCl₃(Ce) [2], стильбена [3], паратерфенила, граната Gd₃Al₂Ga₃O₁₂ (GAGG) и др.. С помощью ПО Pulse Shape Visual были исследованы возможности регистрации термоядерных нейтронов указанными сцинтилляционными детекторами.

Работа была выполнена при поддержке госкорпорации РОСАТОМ в рамках государственного контракта № Н.4а.241.19.21.1038 от 11 мая 2021.

Литература

- [1]. Glenn G. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (4th Edition). 2010.
- [2]. W. Wolszczak and P. Dorenbos, “Shape of intrinsic alpha pulse height spectra in lanthanide halide scintillators,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 857, pp. 66–74, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.nima.2017.02.041.
- [3]. B. Esposito, Y. Kaschuck, A. Rizzo, L. Bertalot, and A. Pensa, “Digital pulse shape discrimination in organic scintillators for fusion applications,” in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Feb. 2004, vol. 518, no. 1–2, pp. 626–628, doi: 10.1016/j.nima.2003.11.103.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНЖЕКЦИИ КАПЕЛЬ ЛИТИЯ С ПОМОЩЬЮ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ НА ТОКАМАКЕ T-11M

Джурик А.С., Васина Я.А., Лазарев В.Б., Лешов Н.В.,
Мирнов С.В., Пришвицын А.С.

*Акционерное общество "Государственный научный центр
Российской федерации Троицкий институт инновационных и
термоядерных исследований"*

Разработка защиты первой стенки токамака-реактора от разрушительного воздействия высокотемпературной плазмы - важнейшая задача. Одним из перспективных подходов к решению этой сложной проблемы является создание возобновляемого защитного покрытия для внутрикамерных элементов токамака на основе жидкого металла (лития).

В работе представлены первые результаты, полученные в результате инъекции капель лития с помощью ультразвукового инжектора. В процессе испытания инжектора выяснились некоторые особенности в его работе (необходимость пуска инжектора перед торроидальным полем и необходимость в его очистке).

Исследования процесса инъекции проводились с помощью скоростной видеокамеры Vaumer HXG 20C. Съемка проводилась как без светового фильтра, так и с использованием фильтров: LiI (671 нм) и LiII (549 нм).

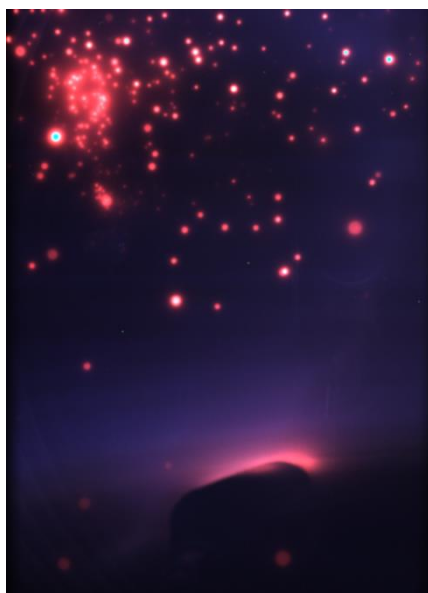
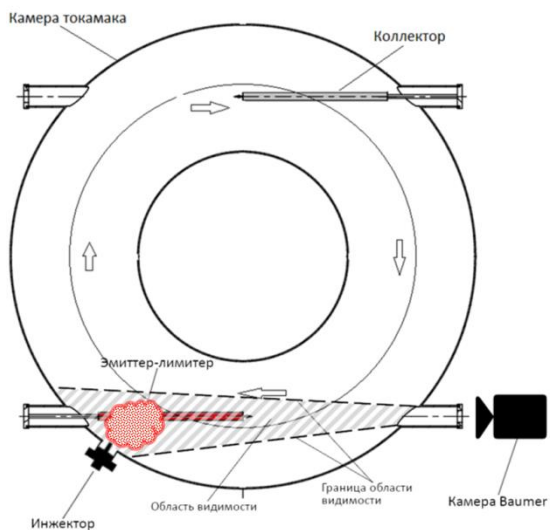


Рис 1. Схема расположения инжектора лития, видеокамеры и внутрикамерных элементов на токамаке Т-11М и изображение инжекции лития в начальной стадии разряда

УСИЛИТЕЛЬНЫЕ ТРАКТЫ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ В ПЛАЗМЕННЫХ ДИАГНОСТИКАХ

Е.А. Пурьга¹, А.Д. Хильченко¹, С.В. Иваненко¹, А.Н. Квашнин¹,
П. В. Зубарев^{1,2}, Д. В. Моисеев¹

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр-т. Акад. Лаврентьева, 11, e-mail: e.a.puryga@inp.nsk.su*

² *Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630092, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20*

Полупроводниковые детекторы излучения формируют токовый выходной сигнал малой интенсивности. Как правило, для его регистрации используются трансимпедансные усилители. Однако их использование сопряжено с рядом трудностей, возникающих при построении усилительных трактов на их основе. На основные характеристики усилительного тракта (соотношение сигнал/шум, полоса пропускания) существенное влияние оказывают такие параметры трансимпедансного усилителя, как: входные токи усилителя, входное напряжение, его полоса пропускания, а также входная емкость детектора, дифференциальная емкость и входная емкость на неинвертирующем входе усилителя. Решение этой задачи не является простым и требует индивидуального подхода в зависимости от требований диагностики, для которой разрабатывается детектор в тандеме с усилительным трактом.

Данный доклад является обзорным, в нем подробно рассматриваются основные источники влияния на итоговые

шумовые и частотные характеристики усилительного тракта, а также приводятся различные решения, используемые авторами для их подавления в некоторых плазменных диагностиках, в том числе в диагностических комплексах экспериментального термоядерного реактора ITER (Кадараш, Франция).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-79-20201.

АРХИТЕКТУРА И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КОТ

Багрянский П.А., Зубарев П.В., Иваненко С.В.,
Киселёв А.И., Квашнин А.Н., Лизунов А.А., Моисеев Д.В.,
Мурахтин С.В., Пурьга Е.А.

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, проспект
академика Лаврентьева 11, 630090, г. Новосибирск, Российская
Федерация, zubarev@inp.nsk.su*

В настоящее время в ИЯФ СО РАН готовится к введению в эксплуатацию новая магнитная ловушка Компактный Осесимметричный Тороид (КОТ) с мощной атомарной инжекцией для экспериментов по созданию анизотропной плазмы высокого давления. Инженерный запуск установки предполагается завершить в октябре 2021 г.

Архитектура системы управления и контроля установки КОТ распределенная. Система управления построена на базе 5 крейтов, каждый из которых управляет следующими элементами установки: вакуумной системой, магнитной системой, двумя нагревными инжекторами и генератором плазмы. В каждом крейте располагается определённый набор базовых модулей управления и сбора данных, а также основной контроллер, обеспечивающий взаимодействие со всеми базовыми модулями, расположенными в крейте.

Механизм синхронной работы крейтов реализован в основном контроллере. Основной контроллер – это процессорный модуль, построенный на базе программируемой пользователем вентильной матрицы (ППВМ) Cyclone V со встроенным процессорным ядром на базе двухъядерного процессора ARM Cortex-A9. Такое решение позволяет иметь полноценную операционную систему Linux внутри каждого крейта. Основной контроллер может работать в режиме ведущего и ведомого. Основной контроллер вакуумного крейта работает в

режиме ведущего и обеспечивает генерацию импульсов синхронизации всем остальным крейтам. Во всех остальных крейтах основной контроллер работает в режиме ведомого.

Для решения всех задач управления и сбора данных был реализован следующий набор базовых модулей: ГВИ (генератор временных интервалов) с возможностью генерации последовательности импульсов – 15 каналов, АЦП – 4 канала, ЦАП – 8 каналов, СДС – 15 каналов, УР – 15 каналов и модуль RS-485 – 2 канала. Каждый периферийный модуль построен на базе ППВМ Altera MAX V или Altera MAX X, что позволяет реализовывать дополнительный функционал для системы управления. В каждом крейте может быть размещено до 12 базовых модулей. Модуль АЦП может работать как в режиме однократных измерений, так и в режиме записи осциллограмм.

Для унификации и удешевления электроники, а также уменьшения количества и суммарной длины кабельных линий был разработан отдельный выносной модуль управления и сбора, работающий по интерфейсу RS-485 и имеющий следующий набор каналов ввода/вывода: 2 канала АЦП, 2 канала ЦАП, а также 8 цифровых входов и 8 цифровых выходов. Ядром этого модуля является микроконтроллер фирмы Silicon Laboratories C8051F060.

Программные средства системы управления можно разделить на 3 уровня: (1) – Linux драйвер, (2) – EPICS драйвер и (3) – интерфейс оператора, разработанный в среде LabVIEW с использованием библиотеки CA Lab.

Linux драйвер реализует обмен по шине с периферийными модулями, а также занимается обработкой прерываний. EPICS драйвер обеспечивает доступ по сети Ethernet к виртуальным переменным, которые имеют названия физических параметров, а также инициирует выполнение внутренних алгоритмов управления. Управляющая программа верхнего уровня позволяет общаться с основными контроллерами крейтов через виртуальные переменные. Она формирует и записывает все необходимые параметры для запуска установки, инициирует рабочий цикл установки и после его окончания вычитывает и

сохраняет результаты измерений физических параметров в базу данных PostgreSQL.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСТАНОВКЕ КСПУ

Малютин А.Ю., Ярошевская А.Д., Подковыров В.Л.,
Гуторов К.М., Коваленко Д. В., Годов А. В. Чернышев В. С.

*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Российская Федерация,
maliuitn@triniti.ru*

Квазистационарный сильноточный плазменный ускоритель (КСПУ) – экспериментальный стенд для исследований в областях обработки материалов и изделий для промышленности, моделирования импульсных плазменных воздействий на обращенные к плазме материалы облицовки вакуумной камеры токамаков, создания сверхзвуковых плазменных потоков для электрореактивных ракетных двигателей [2].

Столь обширное применение КСПУ обуславливает широкий ряд параметров и физических величин, измерение и контроль которых требуется во время проведения экспериментов. Для исследований в области плазменных двигателей наиболее важными являются механические параметры, такие как скорость потока плазмы и сила тяги, а в исследованиях по воздействию потока плазмы на материалы на первый план выходят такие величины, как плотность поглощенной материалом энергии и температура поверхности. В связи с этим, набор и конфигурация применяемого измерительного оборудования меняются от эксперимента к эксперименту, а само измерительное оборудование, как правило, представляет собой самостоятельные устройства, работающие независимо со своим специализированным программным обеспечением. Это затрудняет возможность создания полноценной SCADA системы для интеграции всех измерительных приборов в единый комплекс, обеспечивающий полностью автоматизированное управление установкой и сбор экспериментальных данных.

На настоящий момент архитектура системы управления и сбора данных КСПУ построена на основе двух обособленных сетей, взаимодействующих друг с другом: сеть экспериментального оборудования стенда и сеть пультовой. За работу измерительного оборудования отвечает промышленный ПК сбора данных, находящийся в сети экспериментального оборудования, а управление стендом осуществляется из пультовой через промышленный ПК, оснащенный платами синхронизации и генерации импульсов. Управляющие импульсы через многоканальный модуль опторазвязки и оптические линии поступают на аппаратуру КСПУ (разрядники и клапаны) и триггерные входы измерительного оборудования (беспроводные осциллографы, спектрометры высокоскоростные камеры и др.). При этом сбор экспериментальных данных ведется независимо в отдельных пользовательских интерфейсах, не интегрированных друг с другом, что усложняет задачи последующей обработки и архивации результатов исследований. Настоящая работа посвящена решению этой проблемы.

Для оптимизации процесса выполнения экспериментов на КСПУ и сокращения трудозатрат инженерного и научного персонала ведется разработка автоматизированной системы ведения экспериментов. Исходя из специфики работы и задач установки можно сформулировать предварительные требования к такой системе:

1. должна обеспечивать опрос датчиков и измерительных устройств с гальванической развязкой между пультовой и установкой для обеспечения безопасности оперативного персонала;
2. должна обеспечивать удаленный доступ из пультовой к измерительному оборудованию, расположенному на установке, для настройки и максимально быстрого получения результатов;
3. должна обеспечивать сохранение результатов эксперимента в единой электронной базе данных (за исключением случаев, когда измерительное оборудование не имеет функции программного доступа к результатам);

4. должна иметь встроенные алгоритмы по предварительной обработке результатов (например, сглаживание шумов или масштабирование сигналов) и возможность интеграции алгоритмов постобработки результатов (например, вычисление энергетических характеристик разряда или построение ВАХ).

Большинство производителей измерительного оборудования, применяемого на КСПУ, поставляют свои устройства вместе с библиотеками SDK для самостоятельной разработки ПО и решения задач интеграции. При этом SDK доступны не только для языков программирования (C/C++, Python), но и для сред инженерных и научных расчетов таких как MATLAB или LabVIEW [2], [3], [4], которые позволяют в короткие сроки создавать собственные приложения, объединяющие процессы управления устройствами и обработки результатов измерения в автоматизированном виде. Применение программных сред инженерных и научных расчетов рассматривается как базовый вариант по созданию прототипа автоматизированной системы ведения экспериментов.

Литература

- [1]. Морозов А.И. Принципы коаксиальных (квази) стационарных плазменных ускорителей (КСПУ) – Физика плазмы, 1990, т. 16, вып. 2, с. 144
- [2]. Third Party Software [Электронный ресурс] // pco.de [Сайт]. URL: <https://www.pco.de/software/third-party-software> (дата обращения 05.07.2021).
- [3]. LibTiePie Software Development Kit [Электронный ресурс] // tiepie.com [Сайт]. URL: <https://www.tiepie.com/en/libtiepie-sdk> (дата обращения 05.07.2021).
- [4]. Phantom SDK, MATLAB, LABVIEW Access [Электронный ресурс] // phantomhighspeed-service.force.com [Сайт]. URL: <https://phantomhighspeed-service.force.com/PhantomCommunity/s/article/Phantom-SDK-MATLAB-LABVIEW-Access> (дата обращения 05.07.2021).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-21007_мк

ВАКУУММЕТРИЯ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ УСТАНОВКИ ТОКАМАК Т-15МД

Образцов И.С., Анашкин И.О., Кочин В.А.

*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия,
yuganinn@yandex.ru*

В НИЦ "Курчатовский институт" в 2021 году запущена экспериментальная термоядерная установка токамак Т-15МД [1], которая предназначена для проведения исследований в области управляемого термоядерного синтеза. В установках данного типа для получения высокотемпературной плазмы в разрядной камере, а также для технологических задач по подготовке камеры к эксперименту необходимо поддерживать требуемый уровень вакуума. В токамаке Т-15МД эту функцию выполняет система вакуумной откачки (СВО).

Получение вакуумных рабочих давлений в разрядной камере установки Т-15МД (характеристики камеры Т-15МД: $V \approx 50 \text{ м}^3$, $t_{\text{камеры}} \leq 220^\circ \text{C}$, материал AISI 321) при работе с высокотемпературной плазмой включает в себя следующие этапы: предварительная откачка до давления $< 2 \text{ Па}$; турбомолекулярная и криосорбционная откачка для получения предельного остаточного давления по водороду $< 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$.

Для каждого этапа вакуумной откачки имеется свой тип вакуумного модуля с вакуумными насосами: предварительная откачка производится модулем с форвакуумным агрегатом, включающим в себя винтовой насос и насос Рутса, турбомолекулярная откачка производится модулем с винтовым и турбомолекулярным насосом, а криосорбционная – с винтовым и криогенным насосом.

Управление работой вакуумных модулей на каждом этапе вакуумной откачки производится в удаленном режиме при

помощи автоматизированной системы управления (АСУ СВО). Поддержание устойчивого вакуума в заданном диапазоне давлений осуществляется по обратной связи от датчиков давления. Поэтому критически важным звеном в системе управления АСУ СВО является вакуумметрия.

Для регистрации вакуумного давления в разрядной камере и в вакуумных ячейках используются датчики с различными диапазонами измерений:

- низковакуумные с диапазоном $1,33 \cdot 10^{-2} \div 10^5$ Па;
- широкодиапазонные с диапазоном $6,65 \cdot 10^{-7} \div 10^5$ Па.

В качестве низковакуумных датчиков используются датчики Пирани VSP62MV компании Thyracont в количестве 9 штук (РТ). Широкодиапазонные датчики представлены устройствами Thyracont VSM72 в количестве 10 штук (1РМ), где каждое устройство состоит из двух сенсоров: датчика Пирани и датчика давления с холодным катодом с инверсным магнетроном. Задержка измерения для датчика VSP62MV составляет менее 200 мс, а для VSM72 менее 120 мс. Данные значения отклика датчиков достаточны для решения технологических задач, но слишком велики для быстрых процессов управления газонапуском перед плазменным разрядом. Поэтому для данных задач принято решение использовать магниторазрядный инверсно-магнетронный датчик с холодным катодом Pfeiffer IKR251 (2РМ) с рабочим диапазоном $2 \cdot 10^{-7} \div 2$ Па и временем измерения менее 10 мс. Размещение вакуумметрического оборудования установки Т-15МД показано на рисунке 1.

Датчики Thyracont VSP62MV и VSM72 подключатся по аналоговым линиям связи к 16-битным аналого-цифровым преобразователям сигналов 140AVI03000 Schneider Electric, установленным в шкафах распределенного ввода-вывода (ШРВВ) АСУ СВО. Все ШРВВ связаны со шкафом программируемого логического контроллера (ПЛК) с помощью процессоров сети Ethernet RIO 140CRP31200 Schneider Electric. Данные от модулей 140AVI03000 поступают на процессорный модуль Modicon

Quantum 140CPU67160, в котором выполняется программа управления процессом вакуумной откачки [2].

Аналоговый сигнал датчика Pfeiffer IKR251 поступает на многофункциональный модуль ввода-вывода NI PXI-6358 с 16-битным скоростным АЦП, далее обрабатывается процессорным модулем NI PXIe-8135 RT шасси NI PXIe-1085 18-Slot 3U PXI Express Chassis установленного в шкафу автоматики АСУ ГНСУ.

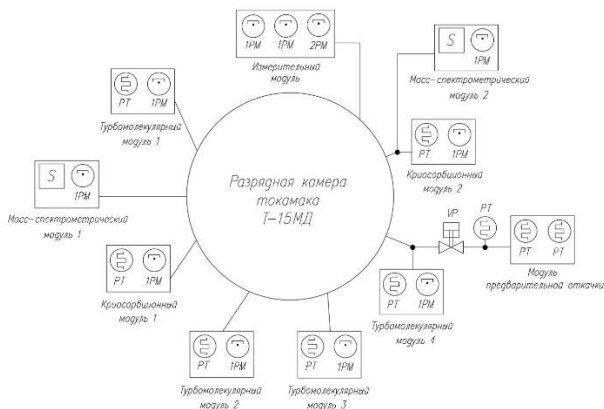


Рис.1. Размещение вакуумметрического оборудования установки Т-15МД.

Для регистрации спектра остаточных газов, контроля чистоты рабочих газов в камере используется современный квадрупольный масс-спектрометр Extorr XT200M с программным обеспечением VacuumPlus v34. Основные характеристики устройства:

- диапазон анализируемых масс: $1 \div 200$ а.е.м.;
- тип фильтра: квадрупольный;
- разрешающая способность: менее 1 а.е.м. при высоте пика 10%, настраиваемая;
- диапазон рабочих давлений: от 0,133 Па, до сверхглубокого вакуума.

Оцифрованные данные от датчиков давления по сети Ethernet поступают в центр обработки данных (ЦОД) ИУС Т-15МД, в шкафу дискового массива 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 оператора технологических систем.

В экранных формах технологических систем значения вакуумных давлений представлены в цифровом и графическом форматах. В окне с графиками можно вывести значения сразу с нескольких датчиков давления для любого временного интервала. Вызов программы управления масс-спектрометром VacuumPlus v34 осуществляется через экранные формы АСУ СВО. В данном программном обеспечении сохранены калибровочные настройки для каждого масс-спектрометра. Архивация данных с масс-спектрометров на сегодняшний момент организована штатными средствами программного обеспечения VacuumPlus v34, на дисковом пространстве автоматизированного рабочего места оператора СВО.

Необходимо также отметить, что данные вакуумметрического оборудования используются при организации блокировок и противоаварийных защит. Кроме того эти данные используются в качестве дополнительного экспериментального материала при обработке результатов измерений в технологических и плазменных экспериментах.

Литература

- [1]. Khvostenko P.P., Anashkin I.O., Belyakov V.A. and others. Status of Tokamak T-15MD // 26th IAEA Fusion Energy Conference (CN-234), FIP/P7-40.
- [2]. И.С. Образцов, М.М. Соколов. АСУ системы вакуумной откачки токамака Т-15МД // Атомный проект, 2017, вып. №27. С. 32-33.

ДИАГНОСТИКА И ИНДИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАМЫКАНИЙ МЕЖДУ КОНСТРУКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ТОКАМАКА Т-15МД

Хайрутдинов Э.Н., Игонькина Г.Б., Соколов М.М.,
Сушков А.В.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Диагностика электрических замыканий между элементами конструкции токамака необходима для безопасного функционирования установки токамак.

Перед проведением плазменного эксперимента требуется проверить целостность электрической изоляции между элементами конструкции установки с целью предотвращения возникновения по этим элементам замкнутых электрических контуров. При плазменных разрядах появление таких контуров будет приводить к возникновению вихревых токов, что может, в свою очередь, приводить к нарушениям в работе установки, провоцируя срывы плазменного разряда с возникновением токов гало, и даже последующему к разрушению элементов её конструкции.

Диагностическая система индикации замыканий (ДСИЗ) токамака предназначена для контроля состояния межэлементной изоляции в перерывах между экспериментами и архивирования полученных данных. Система электрически отключается на уровне высоковольтных реле от установки на время плазменного разряда. Установка Т-15МД [1] включает 42 конструктивных элемента, для которых необходимо производить контроль замыканий. Анализ электрической схемы возможных замыканий между конструктивными элементами позволил сократить количество необходимых измерений с 42х42 до 163. ДСИЗ строится на платформе PXI National Instruments (Рис. 1) и прикладного ПО, разработанного в среде LabVIEW.

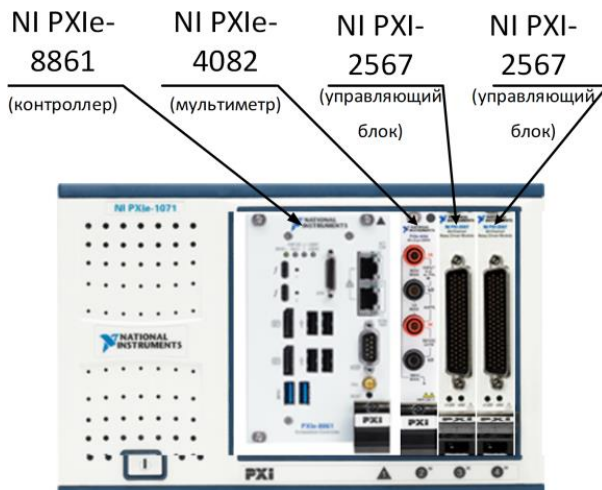


Рис.1 –Крейт ДСИЗ.

Для удобства работы с диагностикой индикации замыканий, контролируемые конструктивные элементы токамака отображаются на экранной форме приложения ДСИЗ в виде концентрической диаграммы (Рис. 2).

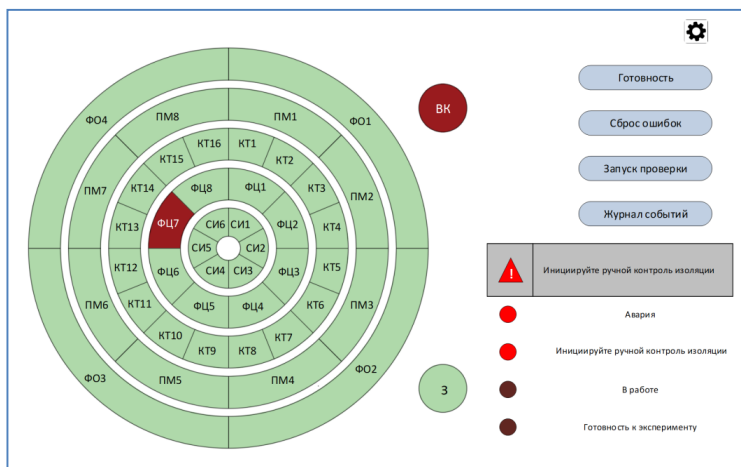


Рис.2 –Экранная форма ДСИЗ

Процесс работы системы является собой последовательное переключение узлов матрицы высоковольтных реле для подключения выбранной пары элементов конструкции к цифровому высокоточному мультиметру для определения сопротивления между ними. На Рис. 3 показан пример, в котором между элементами 1.1 и 1.4 имеется некий условный проводник, обеспечивающий короткое замыкание. При замыкании узлов n1.1 и n2.4 регистрирующее устройство, подключенное к этим реле, фиксирует наличие сигнала, ДСИЗ передаст сигнал в систему противоаварийных защит (ПАЗ), запишет событие в архив и выведет индикацию аварии на экран оператора.

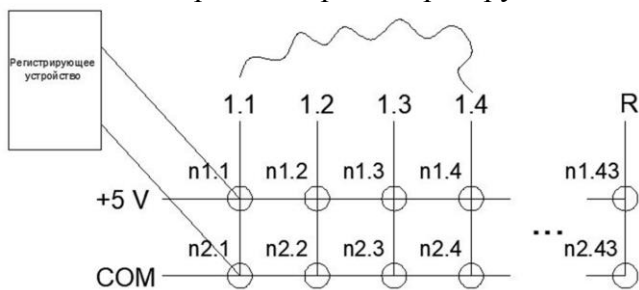


Рис.3 Измерение сопротивления ДСИЗ

Данная система уменьшает влияние человеческого фактора на этапе проверки готовности установки к разряду и позволяет собирать диагностические данные о состоянии изоляции в ходе работы установки.

Литература

- [1]. Khvostenko P.P., Anashkin I.O., Bondarchuk E.N. Injutin N.V., Krylov V.A., Levin I.V., Mineev A.B., Sokolov M.M. Experimental Thermonuclear Installation Tokamak T-15MD. Phys. Atom. Nuclei 83, 1037–1057 (2020).

Всероссийская конференция
«Диагностика высокотемпературной плазмы»
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

ISBN 978-5-89513-499-3

Подписано в печать 15.09.2021
Формат 60x84/16 Гарнитура Times New Roman
Уч. изд. листов 18.6. Тираж 100 экз. Заказ 13403

Подготовлено к изданию в Частном учреждении «ИТЭР-Центр»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова 1 стр. 3

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии издательства «Тривант» (ООО «ТРОВАНТ»)
108841, г. Москва, г. Троицк, мкр «В», д.52