

XVIII Всероссийская конференция

**«ДИАГНОСТИКА
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ»**

ДВП-18



**ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

**11-13 сентября 2019г.
г. Москва, пос. Краснопахорское, с. Красное**

**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

**11-13 сентября 2019г.
Курорт «Красная Пахра»
г. Москва, пос. Краснопахорское, с. Красное**

**Регистрация участников
10 сентября 2019 с 15:00**

ОРГКОМИТЕТ

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

Е.П. Велихов (НИЦ КИ) - академик

С.Г. Гаранин (РФЯЦ ВНИИЭФ)- академик

А.А. Иванов (ИЯФ СО РАН) - д.ф.-м.н.

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

В.А. Курнаев (МИФИ) - д.ф.-м.н.

П.В. Романов (Росатом) – к.ф.-м.н.

О.Г. Филатов (НИИЭФА) - д.ф.-м.н.

В.Е. Черковец (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) - д.ф.-м.н.

С.В. Лебедев (ФТИ РАН) - д.ф.-м.н.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

В.И. Зайцев (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) - д.т.н.

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

Л.М. Коврижных (ИОФ РАН) - д.ф.-м.н.

М.И. Пергамент (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) - д.ф.-м.н.

М.П. Петров (ФТИ РАН) - д.ф.-м.н., председатель

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

В.М. Сафронов (Частное учреждение «ИТЭР-Центр») - д.ф.-м.н., зам. председателя

Б.В. Люблин (НИИЭФА) - к.ф.-м.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.

ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ

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

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

А.А. Шувалова (Частное учреждение «ИТЭР-Центр»)

Д.А. Скопинцев (Частное учреждение «ИТЭР-Центр»)

А.О. Ковалев (Частное учреждение «ИТЭР-Центр»)

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

День	11.09 Среда				
Начало	ЗАЛ 1		Начало	ЗАЛ 2	
10:00	Открытие конференции				
10:30	С1	Красильников В.А.			
10:50		Кашук Ю.А.			
11:10		Немцев Г.Е.			
11:30		Тугаринов С.Н.			
12:00	Кофе брейк				
12:30	С1	Мухин Е.Е.	12:30	С2	Mickaël Portalès
12:50		Курскиев Г.С.	12:50		Родионов Р.Н.
13:10		Субботин Г.Ф.	13:10		Андреевко Е.Н.
13:30		Петров В.Г.	13:30		Шошин А.А.
13:45		Наволоцкий А.С.	13:50		Родионов Н.Б.
14:00		Семенов И.Б.			
14:15		Семенов О.И.	14:10		Листопад А.А.
14:30	Перерыв на обед				
15:30	С1	Семенов Е.В.	15:30	С2	Суляев Ю.С.
15:50	С6	Курнаев В.А., Николаева В.Е.	15:50		Капустин Ю.В.
16:10		Мунтян А.Н.	16:10		Козлов А.М.
16:30	Кофе брейк				
17:00	С6	Мунтян А.Н.	17:00	С2	Гавриленко Д.Е.
17:20		Немец А.Р.	17:20		Мещанинов С.А.
17:40		Писарев А.А.	17:40		Беграмбеков Л.Б.

День	12.09 Четверг				
Начало	ЗАЛ 1		Начало	ЗАЛ 2	
10:00	С7	Портоне С.С.	10:00	С3	Вуколов К.Ю.
10:15		Миронова Е.Ю.			
10:30		Миронов А.Ю.	10:40		Горбунов А.В.
10:45		Пишулина П.А. Звонарева А.А. Вервелакис Г.М.	11:00		Ключников Л.А.
11:00		Сорокин А.С.	11:20		Зимин А.М.
11:15		Драпико Е.А.			
11:30		Вервелакис Г.М.	11:40		Миронов А.Ю.
11:45		Кудрявцев А.В.			
12:00	Кофе брейк				
12:30	С7	Наволоцкий А.С.	12:30	С3	Пурыга Е.А.
12:45		Хилькевич Е.М.	12:50		Бабинов Н.А.
13:00		Зубарев П.В.	13:10		Дмитриев А.М.
13:15		Джурик А.С.	13:30		Самсонов Д.С.
13:30		Воробьев В.А.	13:50		Орловский И.И.
13:45		Федоров В.А.	14:10		Мухин Е.Е.
14:00		Аляев И.В.			
14:15		Парышкин Ю.А.			
14:30	Перерыв на обед				
15:30	СТЕНДОВАЯ СЕССИЯ				
16:30	Кофе брейк				
17:00	С7	Обудовский С.Ю.	17:00	С3	Корниенко Д.С.
17:15		Душина Л.А.			

День	13.09 Пятница			
Начало	ЗАЛ 1		ЗАЛ 2	
10:00	С4	Корнев В.А.	С5	Петров В.Г.
10:20		Артемьев К.К.		Афонин А.Ю.
10:40		Портнов Д.В.		Афонин К.Ю.
11:00		Родионов Р.Н.		Соловьёв Н.А.
11:20		Кормилицын Т.М.		Гринемайер К.А.
11:40		Ильясова М.В.		Неруш М.Н.
12:00	Кофе брейк			
12:30	С4	Амосов В.Н.	С5	Летунов А.А.
12:50		Пинженин Е.И.		
13:10		Родионов Н.Б.		
13:30		Мещанинов С.А.		

ТЕМАТИКИ КОНФЕРЕНЦИИ

- C1.Диагностика ИТЭР***
- C2.Инженерные вопросы диагностики плазмы***
- C3.Спектроскопия плазмы и лазерные методы диагностики.***
- C4.Корпускулярные методы диагностики***
- C5.Микроволновые и субмиллиметровые методы
диагностики***
- C6.Диагностика плазмы на действующих термоядерных
установках***
- C7.Системы сбора и обработка экспериментальных данных,
диагностические средства и метрологическое обеспечение
измерений***

СТЕНДОВАЯ СЕССИЯ

№	ФИО	Секция
1	Горшков А.В.	С1
2	Ковалев А.О.	С1
3	Мельник А.Д.	С1
4	Мельник А.Д.	С2
5	Мельник А.Д.	С6
6	Наволоцкий А.С.	С2
7	Таскаев А.С.	С2
8	Таскаев А.С.	С2
9	Хафизов Р.Р.	С2
10	Родионова В.П.	С2
11	Нагорный Н.В.	С3
12	Барыков И.А.	С4
13	Кумпилов Д.А.	С4
14	Кормилицын Т.М.	С4
15	Мунтян А.Н.	С4
16	Данилов В.В.	С5
17	Будаева В.В.	С6
18	Джурик А.С.	С6
19	Мещеряков А.И.	С6
20	Артемьев К.К.	С6
21	Голачев В.М.	С7
22	Голачев В.М.	С7
23	Журавлев М.К.	С7
24	Мартазов Е.С.	С7
25	Мартазов Е.С.	С7

ОГЛАВЛЕНИЕ

ДИАГНОСТИКА ИТЭР	27
СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ ДИАГНОСТИКИ «ДИВЕРТОРНЫЙ МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО ПОТОКА» ИТЭР	27
ПРОЕКТ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР .	29
РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» УСТАНОВКИ ИТЭР	31
СТАТУС ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙНИЯ В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР	33
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙНИЯ ПЛАЗМЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК	35
ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ССП ИТЭР ...	37
ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ СПЕКТРОМЕТР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СПЕКТРОСКОПИИ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ В ИТЭР	40
СООТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ В РЕФРАКТОМЕТРИИ ИТЭР	42
ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕМЕНТОВ УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ ДЛЯ АНАЛИЗАТОРА LENRA ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НА ITER	46
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРОЕКТ ДИАГНОСТИКИ «НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР» АНАЛИЗАТОРА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ТОКАМАКА-РЕАКТОРА ИТЭР ...	48
НЕЙТРОННЫЙ КОЛЛИМАТОР В ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НА ITER	50
СТАТУС СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР	53

МОДЕЛЬ ЦЕНТРА УДАЛЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С УСТАНОВКОЙ ИТЭР	55
ПРОЕКТ РОССИЙСКОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	57
НЕЙТРОННЫЕ ДИАГНОСТИКИ ИТЭР И ИХ АБСОЛЮТНАЯ КАЛИБРОВКА.....	58
ИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ	60
РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ АНТЕННЫ ДЛЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ИТЭР СО СТОРОНЫ СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ	60
АКТИВАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ГЕНЕРАТОРА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НГ-24М.....	64
ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ НЕКОТОРЫХ ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТ СВЛ.....	66
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОРТПЛАГОВ ИТЭР.....	69
ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ НЕЙТРОННОЙ И МАГНИТНОЙ ЗАЩИТЫ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НА ИТЕР	71
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ НА ВХОДНЫЕ ОКНА МНОГОАНОДНЫХ ФЭУ	74
СТЕНДОВЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «АЛМАЗНЫЙ ДЕТЕКТОР ИТЭР» ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ	76
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ	79
РАЗРАБОТКА АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ВНК ИТЭР ..	82
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРОЕКТ ИНТЕГРАЦИИ ВП№02 И ВП№08 ИТЭР	83

ИНТЕГРАЦИЯ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПОРТА №11 ИТЭР	85
ИНЖЕНЕРНАЯ ПРОРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ DC/PDC СИСТЕМЫ ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ ЗЕРКАЛ ДИАГНОСТИК “СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ” И “АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ” В ИТЭР	87
ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВНК	91
РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВНК.....	93
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДА И СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ЗАЩИТНОЙ ШТОРКИ ДИАГНОСТИКИ СВЛА.....	95
СОЗДАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ МОДУЛЕЙ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПОРТА №11	97
РАДИАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ БЛОКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ВНК.....	100
МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗОНДА С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕГО ЕМКОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ	102
СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛАЗМЫ И ЛАЗЕРНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ.....	107
СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ НА СОВРЕМЕННЫХ ТОКАМАКАХ	107
ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДА В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА	109
СХRS-ДИАГНОСТИКА ТОКАМАКА Т-15МД	112
СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ В МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ	116
МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ МНОГОКАНАЛЬНОГО СПЕКТРОМЕТРА-ПОЛИХРОМАТОРА ПО ДЛИНАМ ВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭТАЛОНА ФАБРИ-ПЕРО	120

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА УСТАНОВКЕ ГДЛ	122
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ, ТРАНСПОРТА И ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ В ЧИСТЯЩЕМ ВЧ-РАЗРЯДЕ ИТЭР	125
УЗЕЛ ПЕРВОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ ИТЭР: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ	128
СТАТУС РЕАЛИЗАЦИИ УЗЛА ПЕРВЫХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ ITER	131
МАКЕТИРОВАНИЕ УЗЛА ВХОДНОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СВЛ В ИТЭР	135
ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ДИАГНОСТИКИ ЛАЗЕРНОЙ ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР	139
ОДНОКАНАЛЬНЫЙ МАКЕТ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ НА БАЗЕ SCMOS КАМЕРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ	143
4-Х КАДРОВЫЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЭЛЕКТРОННО- ОПТИЧЕСКИЙ РЕГИСТРАТОР ПОВЫШЕННОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ	145
КОРПУСКУЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ	147
ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕРЖАНИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ В КОМПАКТНОМ ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ НЕЙТРОНОВ.....	147
ДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ ГОМОЭПИТАКСИАЛЬНОЙ АЛМАЗНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ АЛМАЗНОГО СПЕКТРОМЕТРА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ	151
ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРОВ НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА АНЧ ИТЭР	154
ПРИМЕНИМОСТЬ КАЛИБРОВКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ФОТОХРОНОГРАФА НА СТАТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКАХ	

РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ К АБСОЛЮТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ С ПИКОСЕКУНДНЫМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ	156
РАДИАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДМНП ПРИ РАСПОЛОЖЕНИИ ПОД ДИВЕРТОРОНОЙ КАССЕТОЙ ИТЭР	158
АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НГ-24М.....	160
АКТИВАЦИЯ БЛОКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДИАГНОСТИКИ ИТЭР «ДИВЕРТОРНЫЙ МОНИТОР НЕЙТРОННОГО ПОТОКА» НА РЕАКТОРЕ ИБР-2.....	162
ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ СПЕКТРОМЕТРИИ DD НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ТОКАМАКА-РЕАКТОРА ИТЭР.....	164
КАЛИБРОВКА НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА ВС-501А	166
АНАЛОГОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА С АЛМАЗНЫМ ДЕТЕКТОРОМ ДЛЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ	168
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ НЕЙТРОН-ГАММА СПЕКТРОМЕТР С РАЗДЕЛЕНИЕМ СИГНАЛОВ ПО ФОРМЕ ИМПУЛЬСА....	171
ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ И КОПУСКУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА	173
МОНИТОР МОЩНОСТИ ДОЗЫ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА	176
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР МОЩНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ: ПАРАМЕТРЫ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ	179

**МИКРОВОЛНОВЫЕ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЕ МЕТОДЫ
ДИАГНОСТИКИ 181**

ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В РЕЖИМЕ НА
ПРОСВЕТ НА ТОКАМАКЕ Т-10 181

ТЕСТИРОВАНИЕ ДВУХЧАСТОТНОГО
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РЕФРАКТОМЕТРА НА ТОКАМАКЕ
Т-11М 185

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ НА
ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В РЕФРАКТОМЕТРИИ
ИТЭР 189

ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД. ПЕРСПЕКТИВЫ И
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ 192

ФАЗОМЕТР ДИСПЕРСИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА
ОСНОВЕ СО₂-ЛАЗЕРА 195

ПРИМЕНЕНИЕ АЦП ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗЫ В
ЛАЗЕРНОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ НА ТОКАМАКЕ Т-10 197

ДВУХЦВЕТНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПЛОТНОЙ СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ МИШЕННОЙ ПЛАЗМЫ
..... 200

ДИНАМИКА ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ
ПЛАЗМЫ СТЕЛЛАРАТОРА Л-2М В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ
ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЦР-НАГРЕВА 203

**СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКА
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ
СРЕДСТВА И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИЗМЕРЕНИЙ 207**

РАСЧЕТ СИГНАЛОВ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НА
УСТАНОВКЕ ЖЕТ, ОЖИДАЕМЫХ В ИТЕР-РЕЛЕВАНТНЫХ DT
РАЗРЯДАХ 207

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ
ВИДЕОКАМЕР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОВЕДЕНИЯ ЛИТИЕВОГО

ЛИМИТЕРА НА ТОКАМАКЕ Т-11М В ИНФРАКРАСНОМ И ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНАХ. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ...	209
ДИАГНОСТИКА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ НА ТОКАМАКЕ EAST НА ОСНОВЕ АЛМАЗНОГО СПЕКТРОМЕТРА	211
ПРОДОЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В РЕЖИМАХ ОМИЧЕСКОГО И ЭЦР НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М	213
СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ УЧЕБНО-ДЕМОНСТРАЦИОННОГО ТОКАМАКА МИФИСТ	218
ПРОЕКТ КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИК ДЛЯ ТОКАМАКА МИФИСТ	222
МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАМКНУТЫХ ПОЛОСТЯХ И ВРЕМЕНИ ТЕПЛООВОГО ПРОБОЯ ФОЛЬГ	224
МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ АБСОЛЮТНЫХ ПОТОКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 0,15 – 1,0 КЭВ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ $\Delta/\Delta\lambda \approx 20$ И 30 ПС ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЯМИ	226
РАЗРАБОТКА СТЕНДА КАЛИБРОВКИ МАГНИТНЫХ ЗОНДОВ ТОКАМАКА Т-15МД И ИЗМЕРЕНИЕ ИХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	228
ДИАГНОСТИКА ЭФФЕКТИВНОГО ЗАРЯДА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-15МД	232
POST MORTEM АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ОБРАЩЕННЫХ В ЩЕЛЬ МЕЖДУ ТАЙЛАМИ ЛИМИТЕРА ТОКАМАКА Т-10	235

АППАРАТУРА СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ	239
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРОЕКТ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА.....	239
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРОЕКТ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ	241
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКИ ИТЭР	243
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ИНСТРУМЕНТА PSPS- EDITOR ДЛЯ КОНФИГУРИРОВАНИЯ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР	245
ОРГАНИЗАЦИЯ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ ПОДСИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА	247
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДОМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПОРТ-ПЛАГОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕСТЫ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	249
АНАЛИЗ ИМЕЮЩИХСЯ СРЕДСТВ И ТРЕБОВАНИЙ К СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВ NATIONAL INSTRUMENTS НА ОСНОВЕ FPGA ДЛЯ ПРОЕКТА ИТЭР ..	250
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ DC/PDC СИСТЕМОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ ЗЕРКАЛ ДИАГНОСТИКИ «СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ» В ИТЭР	252

СЕРТИФИКАЦИЯ СПЕЦОБОРУДОВАНИЯ ПО ЕВРОПЕЙСКИМ СТАНДАРТАМ ПРИ ЕГО ПОСТАВКЕ В РАМКАХ ПРОЕКТА ИТЭР	256
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ СО СПЕКТРОМЕТРОВ ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ»	258
РАЗРАБОТКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ КОМПЛЕКСА АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НА ITER	261
СТАТУС РАЗРАБОТКИ КАНАЛА РЕГИСТРАЦИИ ГАММА- СПЕКТРОМЕТРА В СОСТАВЕ АНАЛИЗАТОРОВ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ИТЭР	264
АРХИТЕКТУРА И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ, СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВНК	266
ИСПЫТАНИЯ АНАЛОГОВОГО ТРАКТА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ВНК	269
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАКТА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА СИГНАЛА ОТ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕКТРОМЕТРОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА	271
ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ	273
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ ИКД. ОБЗОР ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ И РЕЗУЛЬТАТОВ	275
АНАЛИЗ ШУМОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАКТАХ КАНАЛА КОНТРОЛЯ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА	277
ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ССД ДМНП	279
ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРИЕМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ССД ДМНП	281

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕЙТРОННО- ФИЗИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДМНП ПРОЕКТА ИТЭР ...	284
ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ НА ИМПУЛЬСНОМ РЕАКТОРЕ ИБР-2	286
НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ В ФОТОХРОНОГРАФАХ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСОВ В ДИАПАЗОНЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ 10^{-13} - 10^{-8} СЕКУНДЫ	289

ПОДРОБНАЯ ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

Всероссийская конференция	Вторник, 10 сентября 2019
15:00-20:00	Регистрация участников конференции

Всероссийская конференция		Среда, 11 сентября 2019	
Зал №1			
10:00	Приветствие: д.ф.-м.н. Красильников А.В.		
<i>Секция 1 Диагностика ИТЭР</i>			
10:30	НЕЙТРОННЫЕ ДИАГНОСТИКИ ИТЭР И ИХ АБСОЛЮТНАЯ КАЛИБРОВКА <i>Красильников В.А.</i>		
10:50	СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ ДИАГНОСТИКИ «ДИВЕРТОРНЫЙ МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО ПОТОКА» ИТЭР <i>Кащук Ю.А.</i>		
11:10	ПРОЕКТ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР <i>Немцев Г.Е.</i>		
11:30	РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» УСТАНОВКИ ИТЭР <i>Тугаринов С.Н.</i>		
12:00	Кофе брейк		
Зал №1		Зал №2	
<i>Секция 1 Диагностика ИТЭР</i>		<i>Секция 2 Инженерные вопросы диагностики плазмы</i>	
12:30	СТАТУС ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙЯНИЯ В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР <i>Мухин Е.Е.</i>	12:30	РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ АНТЕННЫ ДЛЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ИТЭР СО СТОРОНЫ СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ <i>Mickaël Portalès</i>
12:50	СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙЯНИЯ ПЛАЗМЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК <i>Курскиев Г.С.</i>	12:50	АКТИВАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ГЕНЕРАТОРА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НГ 24М <i>Родионов Р.Н.</i>
13:10	ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ССП ИТЭР <i>Субботин Г.Ф.</i>	13:10	ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ НЕКОТОРЫХ ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТ СВЛ <i>Андреевко Е.Н.</i>
13:30	СООТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ В	13:30	РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

	РЕФРАКТОМЕТРИИ ИТЭР <i>Петров В.Г.</i>		СВОЙСТВ КЕРАМИКИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОРТПЛАГОВ ИТЭР <i>Шошин А.А.</i>
13:45	НЕЙТРОННЫЙ КОЛЛИМАТОР В ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НА ITER <i>Наволоцкий А.С.</i>	13:50	СТЕНДОВЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «АЛМАЗНЫЙ ДЕТЕКТОР ИТЭР» ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ <i>Родионов Н.Б.</i>
14:00	СТАТУС СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР <i>Семенов И.Б.</i>	14:10	ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРОЕКТ ИНТЕГРАЦИИ ВП№02 и ВП№08 ИТЭР <i>Листопад А.А.</i>
14:15	МОДЕЛЬ ЦЕНТРА УДАЛЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С УСТАНОВКОЙ ИТЭР <i>Семенов О.И.</i>		
14:30	Перерыв на обед		
15:30	ПРОЕКТ РОССИЙСКОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ <i>Семенов Е.В.</i>	15:30	ИНТЕГРАЦИЯ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПОРТА №11 ИТЭР <i>Суляев Ю.С.</i>
<i>Секция 6 Диагностика плазмы на действующих термоядерных установках</i>			
15:50	СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ УЧЕБНО- ДЕМОНСТРАЦИОННОГО ТОКАМАКА МИФИСТ. ПРОЕКТ КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИК ДЛЯ ТОКАМАКА МИФИСТ <i>Курнаев В.А., Николаева В.Е.</i>	15:50	ИНЖЕНЕРНАЯ ПРОРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ DC/PDC СИСТЕМЫ ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ ЗЕРКАЛ ДИАГНОСТИК “СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ” И “АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ” В ИТЭР <i>Капустин Ю.В.</i>
16:10	МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАМКНУТЫХ ПОЛОСТЯХ	16:10	ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДА И СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ЗАЩИТНОЙ ШТОРКИ ДИАГНОСТИКИ СВЛ <i>Козлов А.М.</i>

	И ВРЕМЕНИ ТЕПЛОВОГО ПРОБОЯ ФОЛЬГ <i>Мутян А.Н.</i>		
16:30	<i>Кофе брейк</i>		
17:00	МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ АБСОЛЮТНЫХ ПОТОКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 0,15 – 1,0 КЭВ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ $\lambda/d\lambda \sim 20$ И 30 ПС ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЯМИ <i>Мутян А.Н.</i>	17:00	СОЗДАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ МОДУЛЕЙ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПОРТА №11 <i>Гавриленко Д.Е.</i>
17:20	ДИАГНОСТИКА ЭФФЕКТИВНОГО ЗАРЯДА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т- 15МД <i>Немец А.Р.</i>	17:20	РАДИЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ БЛОКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ВНК <i>Мещанинов С.А.</i>
17:40	POST MORTEM АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ОБРАЩЕННЫХ В ЩЕЛЬ МЕЖДУ ТАЙЛАМИ ЛИМИТЕРА ТОКАМАКА Т-10 <i>Писарев А.А.</i>	17:40	МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗОНДА С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕГО ЕМКОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ <i>Беграмбеков Л.Б.</i>

Всероссийская конференция		Четверг, 12 сентября 2019	
Зал №1		Зал №2	
<i>Секция 7 Системы сбора и обработка экспериментальных данных, диагностические средства и метрологическое обеспечение измерений</i>		<i>Секция 3 Спектроскопия плазмы и лазерные методы диагностики</i>	
10:00	ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРОЕКТ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА Портоне С.С.	10:00	СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ НА СОВРЕМЕННЫХ ТОКАМАКАХ <i>Вуколов К.Ю.</i>
10:15	ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРОЕКТ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ Миронова Е.Ю.	10:40	ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДА В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА <i>Горбунов А.В.</i>
10:30	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКИ ИТЭР Миронов А.Ю.	11:00	СХRS-ДИАГНОСТИКА ТОКАМАКА Т-15МД <i>Ключников Л.А.</i>
10:45	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ИНСТРУМЕНТА PSPS-EDITOR ДЛЯ КОНФИГУРИРОВАНИЯ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР; ОРГАНИЗАЦИЯ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ ПОДСИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА; СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДОМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПОРТ-ПЛАГОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕСТЫ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ		

	СИСТЕМ <i>Пищулина П.А. Звонарева А.А. Вервелакис Г.М.</i>		
11:00	АНАЛИЗ ИМЕЮЩИХСЯ СРЕДСТВ И ТРЕБОВАНИЙ К СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВ NATIONAL INSTRUMENTS НА ОСНОВЕ FPGA ДЛЯ ПРОЕКТА ИТЭР <i>Сорокин А.С.</i>	11:20	СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ В МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ <i>Зимин А.М.</i>
11:15	РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ DC/PDC СИСТЕМОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ ЗЕРКАЛ ДИАГНОСТИКИ "СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ" В ИТЭР <i>Драпико Е.А.</i>		
11:30	СЕРТИФИКАЦИЯ СПЕЦОБОРУДОВАНИЯ ПО ЕВРОПЕЙСКИМ СТАНДАРТАМ ПРИ ЕГО ПОСТАВКЕ В РАМКАХ ПРОЕКТА ИТЭР <i>Вервелакис Г.М.</i>	11:40	МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ МНОГОКАНАЛЬНОГО СПЕКТРОМЕТРА-ПОЛИХРОМАТОРА ПО ДЛИНАМ ВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭТАЛОНА ФАБРИ-ПЕРО <i>Миронов А.Ю.</i>
11:45	МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ СО СПЕКТРОМЕТРОВ ДИАГНОСТИКИ "АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ" <i>Кудрявцев А.В.</i>		
12:00	Кофе брейк		
12:30	РАЗРАБОТКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ КОМПЛЕКСА АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НА ИТЕР <i>Наволоцкий А.С.</i>	12:30	МОДЕРНИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА УСТАНОВКЕ ГДЛ <i>Пурьга Е.А.</i>
12:45	СТАТУС РАЗРАБОТКИ КАНАЛА РЕГИСТРАЦИИ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА В	12:50	МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ, ТРАНСПОРТА И

	СОСТАВЕ АНАЛИЗАТОРОВ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ИТЭР <i>Хилькевич Е.М.</i>		ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ В ЧИСТЯЩЕМ ВЧ-РАЗРЯДЕ ИТЭР <i>Бабинов Н.А.</i>
13:00	АРХИТЕКТУРА И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ, СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВНК <i>Зубарев П.В.</i>	13:10	УЗЕЛ ПЕРВОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ ИТЭР: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ <i>Дмитриев А.М.</i>
13:15	ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ <i>Джурик А.С.</i>		
13:30	ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ ИКД. ОБЗОР ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ И РЕЗУЛЬТАТОВ <i>Воробьев В.А.</i>	13:30	СТАТУС РЕАЛИЗАЦИИ УЗЛА ПЕРВЫХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ ИТЕР <i>Самсонов Д.С.</i>
13:45	ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ССД ДМНП <i>Федоров В.А.</i>	13:50	МАКЕТИРОВАНИЕ УЗЛА ВХОДНОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СВЛ В ИТЭР <i>Орловский И.И.</i>
14:00	ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРИЕМО СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ССД ДМНП <i>Аляев И.В.</i>	14:10	ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ДИАГНОСТИКИ ЛАЗЕРНОЙ ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР <i>Мухин Е.Е.</i>
14:15	ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДМНП ПРОЕКТА ИТЭР <i>Парышкин Ю.А.</i>		
14:30	Перерыв на обед		
15:30	СТЕНДОВАЯ СЕССИЯ		
16:30	Кофе брейк		
17:00	ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ НА ИМПУЛЬСНОМ	17:00	4-Х КАДРОВЫЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ РЕГИСТРАТОР

	РЕАКТОРЕ ИБР-2 <i>Обудовский С.Ю.</i>		ПОВЫШЕННОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ <i>Корниенко Д.С.</i>
17:15	НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ В ФОТОХРОНОГРАФАХ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСОВ В ДИАПАЗОНЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ 10^{-13} - 10^{-8} СЕКУНДЫ <i>Душина Л.А.</i>		

Всероссийская конференция		Пятница, 13 сентября 2019
Секция 4 Корпускулярные методы диагностики		Секция 5 Микроволновые и субмиллиметровые методы диагностики
10:00	ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕРЖАНИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ В КОМПАКТНОМ ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ НЕЙТРОНОВ <i>Корнев В.А.</i>	ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В РЕЖИМЕ НА ПРОСВЕТ НА ТОКАМАКЕ Т-10 <i>Петров В.Г.</i>
10:20	ДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ ГОМОЭПИТАКСИАЛЬНОЙ АЛМАЗНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ АЛМАЗНОГО СПЕКТРОМЕТРА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ <i>Артемьев К.К.</i>	ТЕСТИРОВАНИЕ ДВУХЧАСТОТНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РЕФРАКТОМЕТРА НА ТОКАМАКЕ Т-11М <i>Афонин А. Ю.</i>
10:40	РАДИАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДМНП ПРИ РАСПОЛОЖЕНИИ ПОД ДИВЕРТОРОНОЙ КАССЕТОЙ ИТЭР <i>Портнов Д.В.</i>	ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ <i>Афонин К.Ю.</i>
11:00	АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НГ 24М <i>Родионов Р.Н.</i>	ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД. ПЕРСПЕКТИВЫ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ <i>Соловьёв Н.А.</i>
11:20	ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ СПЕКТРОМЕТРИИ DD НЕЙТРОНОВ <i>Кормилицын Т.М.</i>	ФАЗОМЕТР ДИСПЕРСИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ СО ₂ -ЛАЗЕРА <i>Гринемайер К.А.</i>
11:40	КАЛИБРОВКА НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА ВС-501А <i>Ильсцова М.В.</i>	ПРИМЕНЕНИЕ АЦП ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗЫ В ЛАЗЕРНОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ НА ТОКАМАКЕ Т-10 <i>Неруи М.Н.</i>
12:00	Кофе брейк	
12:30	АНАЛОГОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА С АЛМАЗНЫМ	ДИНАМИКА ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ СТЕЛЛАТОРА Л-2М В

	ДЕТЕКТОРОМ ДЛЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ <i>Амосов В.Н.</i>	ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЦР- НАГРЕВА <i>Летунов А.А.</i>
12:50	СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ НЕЙТРОН-ГАММА СПЕКТРОМЕТР С РАЗДЕЛЕНИЕМ СИГНАЛОВ ПО ФОРМЕ ИМПУЛЬСА <i>Пинженин Е.И.</i>	
13:10	ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ И КОПУСКУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА <i>Родионов Н.Б.</i>	
13:30	МОНИТОР МОЩНОСТИ ДОЗЫ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА <i>Мещанинов С.А.</i>	

СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ ДИАГНОСТИКИ «ДИВЕРТОРНЫЙ МОНИТОР НЕЙТРОННОГО ПОТОКА» ИТЭР

С.Ю. Обудовский, В.А. Воробьев, Ю.А. Кашук

Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР»

Диагностика «ДМНП» является составной частью комплекса нейтронной диагностики экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. В ходе защиты предварительного проекта была показана реализуемость системы и полное соответствие проектным требованиям, предъявляемым к ней, а именно:

- выполнить абсолютную калибровку диагностики в течение ограниченного промежутка времени;

- определить полный выход нейтронного излучения для DD и DT плазмы с требуемым временным разрешением и погрешность измерений.

В качестве детекторов нейтронного излучения плазмы будут использованы ионизационные камеры деления (ИКД) с радиатором из урана 235 и 238. Эти газонаполненные детекторы размещены внутри вакуумной камеры и, в соответствии с техническими требованиями ИТЭР, должны быть подсоединены к системе контроля герметичности. Реализовать данное техническое решение можно при перемещении модулей ДМНП с тела диверторной

кассеты на внутреннюю поверхность вакуумной камеры. С этой целью инициирован запрос на изменение проекта (PCR).

В докладе приведены направления и результаты работ по реализации данного PCR, представлен дизайн модуля ДМНП с системой контроля герметичности, обсуждаются вопросы интеграции диагностического оборудования ДМНП в нижнем порту и в портовой ячейке. Выполнена доработка испытательных стендов для проведения заводских приемо-сдаточных испытаний (Factory Acceptance Tests) как отдельных элементов, так и всей диагностики в сборе.

Обсуждены результаты испытаний макета 3-х канальной системы регистрации сигналов детекторов ДМНП при работе в интенсивных полях нейтронного излучения. Макет системы позволяет производить измерение плотности потока нейтронов с временным разрешением 1мс для трех ИКД одновременно. Измерения проводятся в импульсном, флуктуационном и токовом режимах обработки сигналов. Испытания макета трехканальной системы регистрации с ИКД КНТ30-5 выполнены на импульсном быстром реакторе ИБР-2 в Лаборатории нейтронной физики в ОИЯИ (Дубна). Смоделированы режимы выхода на мощность и остановки токамака-реактора.

В данном докладе отображены результаты работ, выполненных в период 2017-2019 гг.

Работа профинансирована Росатомом в рамках государственных контрактов № Н.4а.241.9Б.17.1001, № Н.4а.241.19.18.1027 и № Н.4а.241.19.19.1009.

ПРОЕКТ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ ИТЭР

Г.Е. Немцев, Р.Н. Родионов, Р.Р. Хафизов, Т.М. Кормилицын, Н.Б. Родионов, С.А. Мещанинов, В.М. Голачев

Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР»

В данной работе описывается проект Вертикальной Нейтронной Камеры (ВНК) – диагностики ИТЭРа, предназначенной для измерения профиля плазменного нейтронного источника[1]. В настоящий момент диагностическая система находится в стадии предварительного проекта. В работе описана конструкция диагностики и процесс ее интеграции в вакуумную камеру токамака, представлены результаты разработки детекторов и системы сбора данных, показаны расчеты сигналов детекторов. Основные компоненты ВНК сконструированы для обслуживания системой удаленного управления ИТЭРа. Согласно проектным требованиям диагностика должна работать в условиях меняющегося в широком диапазоне нейтронного потока и определять параметры плазмы с низкой погрешностью.

ВНК содержит 11 каналов нейтронных коллиматоров, расположенных в верхнем 18 и нижнем 14 портах вакуумной камеры токамака. Для работы в широком динамическом диапазоне в каждом канале расположены нейтронные детекторы различной чувствительности: две ионизационные камеры деления на основе ^{238}U и два полупроводниковых детектора на основе синтетического CVD алмаза. Детекторы ВНК располагаются в условиях глубокого вакуума, высоких нейтронных потоков до 10^{12} н/см²с, сильного магнитного поля до 1,5 Тл. Основная проблема, которую приходилось решать при разработке данной системы – значительный фоновый сигнал детекторов, возникающий из-за

нейтронов, прошедших не через канал коллиматора, а также из-за сопутствующего гамма излучения. В первоначальной конструкции ВНК отношение сигнал-фон в измерительных каналах ВНК было около 1 [2]. Для увеличения отношения сигнал-фон была выполнена оптимизация формы детекторов и коллиматоров. Кроме того, был разработан специализированный алгоритм восстановления профиля нейтронного источника, позволяющий учитывать влияние фонового сигнала.

На основе результатов данной работы можно сделать вывод, что диагностика ВНК удовлетворяет проектным требованиям, предъявляемым к системе.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 19.04.2018 № Н.4а.241.19.18.1027 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2018 году».

Литература.

- [1] *L. Bertalot, et.al.* – Concept design and integration aspects of ITER Vertical Neutron Camera // Proceedings of the 1st EPS conference on Plasma Diagnostics (ECPD2015). 14-17 April 2015
- [2] *Борисов А.А., и др.* – Нейтронный анализ вертикальной нейтронной камеры токамака-реактора ИТЭР // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 2. – С. 5-12.

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» УСТАНОВКИ ИТЭР

Тугаринов С.Н., Бондаренко А.В., Науменко Н.Н.¹, Серов
В.В., Серов С.В., Шабашов А.Ю., Ярцев В.П.

Частное учреждение «ИТЭР-Центр», г. Москва, РФ
¹ЗАО «СОЛАР», г. Минск, РБ

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 осуществления управляемой стационарной термоядерной D-T реакции горения и получения положительного энергетического выхода. Для управления работой реактора ИТЭР требуется разработка и создание целого комплекса диагностических систем для измерения параметров термоядерной плазмы. Одной из создаваемых диагностических систем является диагностика Активная спектроскопия. Активная спектроскопия (английская аббревиатура CXRS – Charge Exchange Recombination Spectroscopy) реализуется с использованием диагностического или нагревного пучка атомов и широко используется практически на всех современных токамаках. Активная спектроскопия позволяет измерять такие важнейшие параметры плазмы как, ионная температура, скорости тороидального и полоидального вращения плазмы, концентрация легких примесей (в том числе гелиевой золы), по всему сечению плазменного шнура с высоким пространственным и временным разрешением.

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

(CXRS) на стадии прохождения защиты Предварительного проекта диагностики (PDR – Preliminary Design Review). В докладе представлено описание состояния диагностической системы Активная спектроскопия в целом, а также результаты разработок и испытаний основных подсистем данной диагностически. В частности, в докладе представлены результаты разработки узла первого зеркала, включающего защитную шторку и систему очистки. Кроме того, в докладе представлены результаты разработки систем дистанционной калибровки пропускания оптического тракта и прецизионной калибровки калибровки спектроскопической аппаратуры по длинам волн, а также результаты разработки системы регистрации для спектрометра-полихроматора высокого разрешения.

Работа выполнена в рамках реализации Государственного контракта №Н.4а.241.19.19.1009 от 26.12.2018 г.

СТАТУС ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР

Е.Е. Мухин¹, С.Ю. Толстяков¹, Г.С. Курскиев¹, А.Г. Раздобарин¹,
С.В. Масюкевич¹, Ал.П. Чернаков¹, Ан.П. Чернаков¹,
А.М. Дмитриев¹, Д.С. Самсонов¹, А.Е. Литвинов¹, А.Н. Баженов¹,
А.Н. Коваль¹, Н.А. Бабинов¹, Н.С. Жильцов¹, И.А. Ходунов¹,
В.А. Соловей¹, А.Н. Баженов¹, В.А. Сениченков¹, И.М. Букреев¹,
Л.А. Варшавчик¹, П.А. Затылкин¹, И.Б. Терещенко¹, А.Ф. Корнев²,
П.В. Чернаков³, А.Н. Мокеев⁴

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, ул.

Политехническая, 26

²ЛОС ООО, 199034, Санкт-Петербург, 2-я линия ВО, д.5, литера Б

³Спектрал-Тех, ООО, 194223, Санкт-Петербург, ул. Курчатова, 10

⁴Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182, Москва, пл.

Курчатова 1

В докладе представлено современное состояние разработки диагностического комплекса томсоновского рассеяния дивертора токамака ИТЭР. Электронная температура и концентрация, как наиболее существенные характеристики плазмы, нуждаются в измерениях с высоким пространственным и временным разрешением. Диагностика наружной «ноги» дивертора к настоящему моменту времени представлена системой томсоновского рассеяния в классическом исполнении. Такая система удовлетворяет требованиям мониторинга режимов работы дивертора, допуская при этом дальнейшее совершенствование характеристик диагностики в соответствии с проектным заданием ИТЭР. Для обеспечения необходимого баланса между энерговыделением на диверторной пластине и диссипацией энергии в виде излучения требуется управление ионизационным равновесием примесей. Для контроля равновесия первостепенной

задачей диагностики в наружной «ноге» является измерение профиля электронной температуры и концентрации в полоидальном сечении на большом протяжении вдоль диверторной пластины. Важным требованием является возможность измерения низких температур $T_e \sim 1$ эВ вблизи ионизационного фронта. Наблюдение рассеянного лазерного излучения предполагается производить через щелевой зазор между диверторными кассетами. Разработка диагностического комплекса для исследования режимов работы дивертора методом томсоновского рассеяния, а также макетирование основных подсистем диагностики имеет большое практическое значение, как для развития данной диагностики, так и для проектирования диагностических комплексов токамаков будущего.

Благодарность: Работа поддержана Росатомом (контракт - N.4k.52.9Б.14.1001) в рамках работ по созданию токамака ИТЭР. Мнения, выраженные здесь, не обязательно отражают точку зрения Организации ИТЭР.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙЯНИЯ ПЛАЗМЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

Г.С. Курский¹, Ал.П. Чернаков^{1,2}, В.А. Соловей², Н.С. Жильцов¹,
И.А.Ходунов¹, С.Ю. Толстяков¹, Е.Е. Мухин¹, А.Н. Коваль¹, А.Н.
Баженов¹, С.Е. Александров¹, В.А.Сениченков¹, А.В. Лукоянова²,
П.В.Чернаков², В.К. Гусев¹, В.И. Варфоломеев¹, Е.О. Киселев¹,
Ю.В. Петров¹, Н.В. Сахаров¹, В.Б. Минаев¹, А.Н. Новохацкий¹,
М.И. Патров¹, А.В. Горшков³, Г.М. Асадулин³.

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

² АО СпектралТех, С.-Петербург, Россия

³ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
gleb.kurskiev@gmail.com

В докладе приводится описание многоканального спектрометра на основе интерференционных светофильтров, предназначенного для регистрации сигналов лазерного рассеяния на плазме в видимом и ближнем ИК диапазоне (500-1070 нм). Шесть спектральных каналов позволяют перекрыть широкий диапазон измеряемых температур в зависимости от выбранных спектральных характеристик фильтров, что позволяет использовать прибор для диагностики как центральной, так и краевой и пристеночной плазмы токамака. Оптическая часть прибора предназначена для приема излучения волокном диаметром 3 мм с числовой апертурой 0,22. В качестве детекторов используется лавинные фотодиоды диаметром 1,5 мм, в то время как 100% энергии собранного излучения фокусируется в область диаметром 1,4 мм. Применение детекторов с малой апертурой позволяет проводить регистрацию коротких лазерных импульсов < 3 нс, что

существенно снижает вклад шумов от фонового света плазмы. В отсутствии фоновой засветки соотношение сигнал/шум определяется дробовым шумом самого сигнала, который превышает шумы регистрирующей системы при уровне сигнала в диапазоне от 25 фотоэлектронов (приведенных ко входу детектора) и выше. Данная особенность актуальна для построения диагностических периферийной и пристеночной плазмы. Регистрация сигналов проводится в осциллографическом режиме модулем АЦП на основе аналоговой памяти, расположенным в корпусе прибора с частотой оцифровки 5, 2,5 и 1 событий в секунду при полосе пропускания 500 МГц. Время считывания из аналоговой памяти составляет 320 мкс, что позволяет регистрировать события с частотой следования 3кГц. Вычислительная мощность микропроцессора позволяет проводить обработку данных в режиме реального времени с выдачей результата по оптическому интерфейсу Ethernet 1 GBit. Проведенная апробация двух спектрометров в составе диагностического комплекса Томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М2 продемонстрировала точность измерения температуры внутри плазменного шнура 6% при относительно низкой плотности плазмы $1-1,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и достаточно малой энергии зондирующего лазера 0,4 Дж.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ССП¹ ИТЭР

Д.А. Шелухин^{1,2}, В.А. Вершков^{1,2}, А.В. Горбунов^{1,2}, В.В. Лукьянов^{1,2}, В.Г. Петров^{1,3}, Д.В. Сарычев^{1,2}, Г.Ф. Субботин^{1,2}

¹ Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез - международные проекты» (УТС-Центр), 123182, пл. Академика Курчатова, д.1, Москва, Российская Федерация

² Национальный Исследовательский Центр «Курчатowskiй Институт», 123182, пл. Академика Курчатова, д. 1, Москва, Российская Федерация

³ Государственный Исследовательский Центр РФ «Троицкий институт инноваций и термоядерных исследований», 108840, ул. Пушкиных, вл. 12, Троицк, Российская федерация
e-mail: subbotingf@gmail.com

Измерения профиля электронной плотности со стороны сильного магнитного поля в ИТЭР являются основной задачей для рефлектометра со стороны сильного магнитного поля (рефректометра ССП). В данной работе представлен обзор статуса разработки диагностики рефлектометрии ССП для ИТЭР, а также решений, которые могут быть использованы в существующих и новых установках. Основная активность в настоящий момент сфокусирована на пассивных элементах передающих линий. Главной проблемой является необходимость обеспечения структурной целостности диагностики, интеграции, ядерной безопасности и хороших микроволновых параметров.

Результаты оценок нагрузок на волноводную линию показали, что текущая конструкция не обеспечивает необходимую прочность системы. Для достижения лучших прочностных

¹ ССП – сторона сильного (магнитного) поля

характеристик было принято решение о смене основного материала волноводов на сплав 718 для внутрикамерной части передающей линии. Тестовая партия волноводов была успешно изготовлена.

Первоначальная конструкция первичного вакуумного окна не оправдала себя на стадии изготовления. Предложенный новый дизайн использует традиционный способ крепления окон из плавленого кварца к гильзам. Моделирование показало возможность установки окна с малой апертурой в разрыв волновода без существенного ухудшения микроволновых параметров.

Дополнительные окна в атмосферной части передающей линии требуются по соображениям ядерной безопасности и должны осуществлять секционирование различных помещений. В качестве таких окон были предложены окна на основе материала Рохаселл и проведены тесты в поддержку такого решения. Было показано, что диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь постоянны в диапазоне от 12 до 170 ГГц, а тесты газовой проницаемости показали низкую диффузию дейтерия через материал.

Были проведены тесты системы сложения, расширенной до 5 каналов. Микроволновые испытания показали хорошую работу системы сложения на частотах до 140 ГГц.

Новый канал для работы сквозь плазму был включен в состав диагностики для расширения ее возможностей по измерению среднехордовой плотности электронов. Текущая конструкция основана на оптимизированном прямоугольном рупоре и традиционном волноводе. Было предложено два алгоритма восстановления среднехордовой плотности: на основе поиска невязки многомерного функционала и с использованием нейронных сетей. Оба подхода демонстрируют высокую скорость восстановления и точность в основных сценариях работы ИТЭР и их развитие будет продолжено в дальнейшем.

Активное моделирование диагностики было сделано для анализа различных критических для работоспособности системы сценариев. Было продемонстрировано, что флуктуации электронной плотности с амплитудой 0.1% приводят к

невозможности регистрации фазы сигнала на отдельных частотах для одного скана по частоте. Однако, спектр, усредненный по 10 измерениям, демонстрирует достоверное измерение частоты биений с ослаблением основного пика на 2 дБ. Алгоритм восстановления профиля был улучшен для увеличения скорости и точности обработки данных.

Подход «синтетической диагностики» был использован для моделирования отклика диагностики на тороидальные альфвеновские моды (ТАЕ моды) в ИТЭР. Было показано, что относительная амплитуда возмущений сигнала составляет 0,4 и может быть измерена рефлектометром. Также было обнаружено, что отклик на вызванные ТАЕ модами возмущения, существует в узком диапазоне зондирующих частот, поэтому методика измерения свойств таких мод в ИТЭР должна быть пересмотрена.

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ СПЕКТРОМЕТР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СПЕКТРОСКОПИИ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ В ИТЭР

А.В. Горшков^{1,2}, Г.М. Асадулин^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский Институт», Россия, 123182 Москва, пл.
Курчатова 1

²Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез -
международные проекты», Россия, 123182 Москва, пл. Курчатова
1

Диагностика спектроскопии водородных линий входит в список диагностик первой очереди и должна начать работу с первой плазмой на установке ИТЕР. Для данной диагностики был разработан спектральный прибор высокого разрешения, который даёт возможность разделить вклады диверторного и пристеночного излучения в измеряемых сигналах. Отличительной особенностью оптической схемы данного прибора является псевдо автоколлимационная схема с двумя голографическими дифракционными решётками, в которой обратный ход светового потока переносится на другой уровень по вертикали. Также данная схема обеспечивает независимость дисперсии от длины волны. Целью данной работы было проведение испытания макета спектрального прибора, измерения основных характеристик и их сравнение с расчетными значениями. Были осуществлены: проверка полного спектрального диапазона, обратной дисперсии, спектрального разрешения и контраста прибора. В качестве детектора на выходе спектрометра использовалась научная CMOS камера PCO Edge 4.2. Измерения производились при двух углах падения света на дифракционную решетку – 65° и 75°. Обратная

дисперсия составила соответственно $2,06 \text{ \AA}/\text{мм}$ и $1,3 \text{ \AA}/\text{мм}$. Спектральное разрешение на основном рабочем угле в 65° - $0,1 \text{ \AA}$. Ближний контраст, измеренный с помощью HeNe лазера, на расстоянии $0,7 \text{ нм}$ от лазерной линии составил $2 \cdot 10^{-6}$.

Проведенные испытания экспериментального образца перестраиваемого спектрометра высокого разрешения показали соответствие основных характеристик техническому заданию и совпадение с расчетными значениями.

СООТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ В РЕФРАКТОМЕТРИИ ИТЭР

Вершков В.А.,^{1,2} Петров В.Г.,^{2,3} Скопинцев Д.А.^{2,3}, Субботин Г.Ф.,^{1,2}
Шелухин Д.А.^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт» (123182 Россия, Москва, пл.
Академика Курчатова, д. 1)

²УТС-центр (123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д.
1)

³АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ (108840, г. Москва, г. Троицк, ул.
Пушиковых, вл. 12), vpetrov@triniti.ru

Как известно, рефрактометр позволяет определять среднюю электронную плотность (свободную от «перескоков» фазы) в плазме токамака за счет измерений времени распространения микроволнового сигнала в плазме [1, 2]. Принцип действия диагностики подобен принципу действия рефлектметра, только в отличие от последнего зондирование плазмы производится на частоте, на которой исследуемая плазма прозрачна, и регистрируется сигнал, прошедший через плазму (схема с одним проходом) или отраженный от внутренней стенки вакуумной камеры (схема с двойным проходом через плазму). Время задержки сигнала в плазме τ_{gr} дает информацию о линейной плотности зондируемой плазмы.

Рефрактометр ИТЭР входит в расширенный проект рефлектметра ИТЭР со стороны сильного магнитного поля (РСП, HFS-рефлектметр ИТЭР, HFSR), и обеспечивает работу данной системы в режиме рефрактометра – на просвет [3], используя окно прозрачности плазмы ИТЭР на необыкновенной волне между нижней и верхними частотами отсечки (40–110 ГГц), ниже частот поглощения на электронно-циклотронных резонансах. К сожалению, с увеличением плотности выше $2.5 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, это окно

прозрачности сужается, а затем исчезает, и ожидаемый диапазон измеряемых рефрактометром плотностей ограничивается сверху величиной $\sim 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, нижний предел будет определяться соотношением сигнал/шум, по требованиям ИТЭР рефрактометр должен измерять плотности не менее $1 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

Для оценки возможностей расширенного проекта NFS-рефлектометра ИТЭР были проведены оценки полезного сигнала в рефрактометрии ИТЭР [4] с учетом потери сигнала на всех элементах антенно-волноводного тракта на пути от передатчика к приемнику в частотном диапазоне 40—90 ГГц, для передающей антенны размерами 30x120 мм (приемной антенной для рефрактометра будет служить антенная система РСП, конструкция и размеры ее -- 18x58 мм зафиксированы). С целью максимального повышения мощности сигнала в рефрактометре принята однопроходная схема зондирования.

Для рефрактометра, структура потерь сигнала аналогична таковой в рефлектометре. Только при расчете потерь необходимо учитывать потери в антенной системе рефрактометра при прохождении сигнала от передающей к приемной антенне и учесть, что в отличие от рефлектометра, в рефрактометре ИТЭР сигнал проходит через волноводно-антенную систему только один раз.

Для определения потерь в антенной системе рефрактометра были проведены расчеты по распространению излучения в плазме ИТЭР (ray-tracing). При расчетах коэффициента преломления плазмы для зондирующей X-волны использовались ожидаемые распределение плотности и распределение полного магнитного поля для сценария с током 15 МА [5]. Далее плазма ИТЭР с рассчитанным пространственным распределением коэффициента преломления для X-волны вносилась, как элемент оптической системы, в пакет ZEMAX с актуальной геометрией ИТЭР, т.е. с реальным расположением приемной и передающей антенн.

На основе проведенных расчетов рэй-трейсинга с учетом реальной геометрии ИТЭР, были проведены оценки соотношения сигнал/шум в измерениях.

Соотношение сигнал/шум оценивалось с учетом потерь СВЧ мощности в поворотах, волноводах и системах сложения

диапазонов [6]. Расчеты проводились для двух СВЧ диапазонов U (40-60 ГГц) и E (60-90 ГГц), которые будет использовать канал рефрактометра. Оценки отношения сигнал/шум были проведены для работы рефрактометра с использованием предполагаемого режима его работы с (амплитудной) АМ-модуляцией, с учетом влияния высокотемпературных эффектов [7] и турбулентности плазмы.

Показано, что смещение плазмы может приводить к значительному увеличению потерь сигнала на пути от передающей к приемной антенне, причем величина потерь нелинейно зависит от смещения плазмы. Такой эффект обусловлен тем, что распределение излучения рефрактометра в дальней зоне представляет собой дифракционную картину с чередующимися максимумами и минимумами. Кроме этого, при зондировании на частоте, близкой к частоте отсечки, дополнительное ослабление вносит турбулентность плазмы.

Полученные по результатам расчетов значения ослабления сигнала при однократном проходе его через плазму достаточно оптимистичны и позволяют, в принципе, получить приемлемые полезные сигналы в режиме рефрактометра с учетом применения более узкополосной схемы приема по сравнению с применяемой в HFSR ИТЭР. В частности, в диапазоне U ожидаемое соотношение сигнал/шум с учетом потерь во всем тракте составляет 33...37 дБ, а в диапазоне E – 24...28 дБ при работе рефрактометра в режиме амплитудной модуляции с полосой 1 МГц.

Литература.

- [1]. Петров А. А., Петров В. Г., Малышев А. Ю., Марков В. К., Бабарыкин А. В. // Физика Плазмы. 2002. Т. 28. № 10. С. 877–885.
- [2]. Petrov A. A., Petrov V. G. // Rev. Sci. Instrum. 2003. V. 74. P. 1465–1468
- [3]. A.V. Krasilnikov, Y.A. Kaschuck, V.A. Vershkov, A.A. Petrov, V.G. Petrov, S.N. Tugarinov. International Conference on Fusion Reactor Diagnostics, Varenna, Italy September 9–13, 2013.

- [4]. Design Description Document on 55.F9 HFSR system.
ITER_D_3WD9DT
- [5]. Sun Hee Kim. Corsica scenarios to Diagnostics group.
ITER_D_QVJTJK, <https://user.iter.org/?uid=R4FT8D>.
- [6]. Отчет о НИОКР «Разработка и испытания опытных образцов компонентов диагностических систем рефлектометрии плазмы и спектроскопии водородных линий ИТЭР в 2014 – 2016 годах. Этап № 5». НИЦ «Курчатовский институт. Инв. № 110.8-13/7116-16.
- [7]. E. Mazzucato. Relativistic effects on microwave reflectometry. *Physics of Fluids B: Plasma Physics*, 4, p. 3460 (1992).

ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕМЕНТОВ УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ ДЛЯ АНАЛИЗАТОРА LENRA ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НА ITER

¹Мельник А.Д., ¹Афанасьев В.И., ¹Миронов М.И., ¹Наволоцкий А.С.,

¹Несеневич В.Г., ¹Петров М.П., ¹Петров С.Я., ¹Чернышев Ф.В.,
²Яценко А. В.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия, 194021,
amelnik@mail.ioffe.ru

²ООО "РУССКИЕ ТЕХНОЛОГИИ", Санкт-Петербург, Россия,
195279

Важную роль в работе анализатора LENRA [1] выполняет ускоритель ионов. С его помощью вторичные ионы, образованные в обдирочной пленке анализатора, получают дополнительную энергию. Это значительно облегчает регистрацию частиц с низкой (<100 кэВ) энергией в условиях высокого фона нейтронного и гамма излучений, а также расширяет энергетический диапазон регистрируемых частиц.

Ключевым элементом ускорителя является связка высоковольтных колонн, образующая центральный вакуумный канал, в котором происходит ускорение частиц. Так как колонны являются границей первичного вакуума, со стороны ИТЭР к ним предъявляются особые требования – соответствие классу безопасности SIC-1 и вакуумному классу VQC1A. Согласно вакуумным требованиям VQC1A колонны необходимо изготавливать по технологии термомодиффузионной сварки. Это в свою очередь накладывает ограничения на максимальные механические нагрузки, прикладываемые к колоннам.

Данный доклад посвящен описанию расчетных и экспериментальных работ по определению усилия осевого сжатия колонн в различных режимах эксплуатации ускорителя. Приведены результаты расчетов усилия с привлечением современных программных пакетов на основе метода конечных элементов. Дано описание экспериментального стенда и приведены результаты измерения усилия осевого сжатия при разных давлениях окружающего колонны изолирующего газа. Проведен анализ полученных результатов и сформулированы предложения о модификации конструкции ускорителя для того, чтобы усилие сжатия оставалось в пределах значений, рекомендованных изготовителем колонн.

Финансирование работы: госконтракт № Н.4а.241.19.19.1009 от 26.12.2018, часть работы, связанная с измерением величины усилия сжатия, выполнена в рамках госзадания по теме № 0040-2019-0023.

Литература.

- [1] Afanasyev V A, Chernyshev F V, Kislyakov A I, Kozlovski S S, Lyublin B V, Mironov M I, A.D. Melnik, Nesenevich V G, Petrov M P and Petrov S Ya 2010 Neutral Particle analysis on ITER: present status and prospects *Nucl. Instr. and Meth. A* **621** 456-467

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРОЕКТ ДИАГНОСТИКИ «НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР» АНАЛИЗАТОРА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ТОКАМАКА-РЕАКТОРА ИТЭР

Ковалев А.О., Кормилицын Т.М., Портнов Д.В., Кашук Ю.А., С.Ю.
Обудовский

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр» Москва, Россия, e-mail:
A.Kovalev@iterrf.ru*

В данной работе представлены результаты разработки диагностики «Нейтронный спектрометр». Диагностика «Нейтронный спектрометр» (НС) является подсистемой диагностики «Анализатор нейтральных частиц» (АНЧ) и предназначена для определения параметров плазмы в зоне обзора АНЧ по измерениям потока нейтронов с временным и энергетическим разрешением. В числе параметров - ионная температура и относительная концентрация трития в плазме (топливное отношение). В диагностике НС используются алмазные и стильбеновые детекторы нейтронов [1]. По измерениям плотности потока нейтронов в зоне расположения детекторов НС и результатам расчёта транспорта нейтронов можно так же оценить величину плотности потока нейтронов в зоне расположения детекторов АНЧ.

Метод определения топливного отношения основан на различной чувствительности детекторов НС к ДД и ДТ нейтронам. Топливное отношение определяется на основании измерения энергетических распределений потока нейтронов, рождённых в результате ДТ и ДД реакций синтеза [2].

В ходе подготовки предварительного проекта НС разработана конструкция диагностики НС, определён тип и параметры детекторов нейтронов, проведены расчёты тепловых,

радиационных, электромагнитных и сейсмических нагрузок, протестировано измерительное оборудование на «Стенде нейтронной диагностики» АО ГНЦ РФ «ТРИНИТИ», проведён расчёт функции отклика стильбенового и алмазного детекторов.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 19.04.2018 № Н.4а.241.19.18.1027 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2018 году».

Литература.

- [1]. Ковалев А.О., и др. – Характеристики детекторов диагностики «Нейтронный спектрометр» анализатора нейтральных частиц токамака-реактора ИТЭР – XLVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 18 – 22 марта 2019 г.
- [2]. Ковалев А.О., и др. – Прогресс в разработке диагностики «Нейтронный спектрометр» токамака-реактора ИТЭР – XLV Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 2 – 6 апреля 2018 г.

НЕЙТРОННЫЙ КОЛЛИМАТОР В ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НА ITER

С.Я. Петров¹, В.И. Афанасьев¹, А.Д. Мельник¹, М.И. Миронов¹, А.С. Наволоцкий¹, В.Г. Несеневич¹, М.П. Петров¹, Ф.В. Чернышев¹, И.В. Александров², Г.В. Маринин², Д.В. Терентьев², А.С. Филиппов², А.В. Белов³, Е.И. Гапионок³, И.В. Кедров³, А.Ю. Конин³, Б.В. Люблин³, М.В. Суханова³, В.Н. Танчук³, А.А. Хитрук³, А.А. Борисов⁴, А.Н. Мокеев⁵

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

²*ООО «РУССКИЕ ТЕХНОЛОГИИ», Санкт-Петербург, Россия*

³*АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия*

⁴*НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

⁵*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия*

Диагностическая система анализаторов атомов перезарядки располагается в 11-м экваториальном порту токамака-реактора ИТЭР за пределами бетонной биологической защиты [1]. Объектом исследования диагностической системы являются выходящие из плазмы потоки нейтральных атомов дейтерия и трития, дающие информацию об изотопном соотношении дейтерий-тритиевой топливной смеси внутри плазмы. Для транспортировки атомов от камеры реактора до анализаторов используется прямой вакуумный трубопровод, проходящий сквозь биологическую защиту. Во время дейтерий-тритиевой фазы вакуумный трубопровод станет прямым каналом распространения термоядерных нейтронов за пределы биологической защиты. Рассеиваясь на элементах трубопровода, нейтроны будут активировать как сам трубопровод, так и окружающие его конструкции.

Для ослабления влияния нейтронного потока на радиационные условия в межпортовом и портовом помещениях применяется гетерогенная нейтронная защита, окружающая вакуумный трубопровод, для изготовления которой используется нержавеющая сталь и карбид бора. Основным требованием по безопасности, которому должен удовлетворять комплекс нейтронной защиты атомных анализаторов, является ограничение на максимальную величину контактной дозы в двух зонах: в межпортовом пространстве – 100 мкЗв/ч через 12 дней после остановки реактора ИТЭР, и в портовом помещении – 10 мкЗв/ч через 24 часа после остановки реактора ИТЭР. Наиболее критичным в данном случае оказывается соблюдение требований для межпортового пространства. Однако, на ранних этапах проектирования расчеты показали, что установка нейтронной защиты вокруг трубопровода не обеспечивает выполнение этих требований, что связано с ограничением габаритов защиты – ее диаметр не должен превышать 80 см.

Для решения этой проблемы было предложено установить в диагностическом защитном модуле непосредственно перед входом в вакуумный трубопровод системы дополнительную защиту в виде специального нейтронного коллиматора [2]. Конструкция коллиматора имеет ячеистую структуру с прозрачностью 80% для выходящего из плазмы и регистрируемого анализаторами потока нейтральных атомов. При этом рассеяние нейтронов в пластинах коллиматора и их последующее поглощение в нейтронной защите портовой заглушки приводит к уменьшению угла разлета нейтронов и существенному снижению их потока, попадающего в вакуумный трубопровод.

Проведенный тепловой анализ показал, что при работе реактора в режимах с генерацией максимальной мощности 500 МВт, излучение плазмы вызовет нагрев решетки коллиматора до температуры, не превышающей 2500С, что позволяет выбрать в качестве материала для изготовления коллиматора нержавеющую сталь марки 316L(N)-IG. При этом циклическая прочность коллиматора соответствует требованиям реактора ИТЭР, и он

может быть использован без замены на протяжении всего дейтерий-тритиевого эксперимента токамака-реактора.

Разработанный нейтронный коллиматор может быть рекомендован к использованию в других диагностических системах, использующих вакуумные трубопроводы для соединения регистрирующей аппаратуры с плазмой реактора, с целью уменьшения контактной дозы радиации в помещениях, где располагаются компоненты диагностик.

Финансирование работы: госконтракт № Н.4а.241.19.19.1009 от 26.12.2018, часть работы, связанная с анализом результатов расчетов, выполнена в рамках государственного задания по теме № 0040-2019-0023

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. Neutral Particle analysis on ITER – present status and prospects. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 621, 2010, p. 456–467.
- [2]. Петров С.Я., Наволоцкий А.С., Маринин Г.В., Александров И.В., Терентьев Д.В., Филиппов А.С., Коллиматор нейтронов. Заявка на изобретение № 2018118669, 21.05.2018.

СТАТУС СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР

И. Семенов, Е. Миронова, С. Портоне,

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, i.semenov@iterrf.ru,
e.mironova@iterrf.ru, s.portone@iterrf.ru*

Система управления установкой ИТЭР - CODAC (Control, Data Acquisition and Communication) разделена два уровня управления - на центральный супервайзор, 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 около 130 технологических и диагностических подсистем установки. CODAC использует SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) EPICS. Она построена на идеологии сервер-клиент и в настоящее время базируется на компьютерных сетях с пропускной способностью 10-40 Гбит/сек.

В докладе дан обзор состояния дел на февраль 2019 года по системе управления верхнего уровня, а также по системам управления технологических и диагностических систем за которые отвечает Российское Национальное Агентство ИТЭР (Проектный центр ИТЭР).

В докладе рассмотрены основные проблемы, которые решались по мере создания систем управления в 2018 году. В частности вопросы, связанные с радиационной стойкостью электронных компонент и ограничения связанные с конечной пропускной способностью компьютерных сетей при организации передачи исходных экспериментальных данных (Raw Data). Также

рассмотрены вопросы, связанные с организацией потока экспериментальных данных между защищённой зоной установки (POZ – Plant Operation Zone), внешней зоной на сайте ИТЭР (ХРОZ), работой в режиме удаленного доступа и организацией обработки этих данных внутри и между этими зонами.

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

Работа выполнялась по Контракту с Государственной Корпорацией РОСАТОМ №Н.4а.241.9Б.19.18.1027

МОДЕЛЬ ЦЕНТРА УДАЛЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С УСТАНОВКОЙ ИТЭР

О. Семенов, А. Ларионов, С. Лазарева, Е. Миронова, С. Портоне,
Д. Портнов, И. Семенов

Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

В соответствии со своими обязательствами члены кооперации ИТЭР поставляют различные диагностики и технологические системы. Перед поставкой во Францию на площадку ИТЭР, необходимо протестировать их в экспериментальных условиях и в режиме дистанционного управления. При поставке, вводе в эксплуатацию и сопровождении в будущем также требуется Центр Дистанционного Взаимодействия с площадкой ИТЭР в каждом из домашних агентств стран участников для выполнения своих гарантийных обязательств и участия в экспериментальной программе.

Для этих целей и для целей комплексной отработки функций дистанционного взаимодействия с МО ИТЭР в Российском Проектном Центре ИТЭР создается модельный вариант центра удаленного взаимодействия в экспериментах ИТЭР (Remote Participation Centre - RPC) с удаленной пультовой.

Основные задачи, которые решает данная модель: Тестирование интерфейсов удаленной работы с экспериментальными данными и самих сервисов работы с данными (Unified Data Access Servers, Data Visualization and Analysis tool, TermalVIP, Onedata, TERADICI, различные NX сервисы и т.д.). Исследование высокоскоростной передачи больших объемов данных на большие расстояния по сетям общего пользования (reliability, speed accuracy, latency). Отработка вопросов информационной безопасности, включая требования МО ИТЭР, Французского Ядерного Регулятора и требований стандарта IEC

62645. В рамках работы предложены роли персонала Центра удаленного взаимодействия в экспериментах ИТЭР.

Для информационного обмена RPC использует выделенный канал связи между МО ИТЭР и защищенной внутренней сетью RPC, в рамках построения которого решаются сетевые проблемы, как с точки зрения вопросов сетевой безопасности, так и с точки зрения устойчивости и производительности каналов связи.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом № Н.4а.241.19.18.1027 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2018 году» от 19.04.2018 и Соглашением о проведении работ С45TD15FR с МО ИТЭР.

ПРОЕКТ РОССИЙСКОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Е.В. Семенов, С.С. Портоне, Е.Ю. Миронова, О.И. Семенов, П.А. Сергеев, Г.С. Кирнев, И.Б. Семенов

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

В рамках исследования специфики термоядерных знаний, их типов и задач был сформулирован подход к систематизации знаний по проекту Российской национальной базы термоядерных исследований, которая в перспективе должна обеспечить структурированное хранение, поиск и анализ информации в области технологий управляемого термоядерного синтеза (УТС). Разрабатываемая база знаний будет включать в себя опыт создания российских и зарубежных термоядерных установок (научно-исследовательский, технологический), в частности базируемый на проекте термоядерного реактора ИТЭР. Для этого была изучена и структурирована ключевая информация по установке ИТЭР, её подсистемам, включая подсистемы, поставляемые РФ, и их взаимодействию. Также обобщен передовой опыт международных (МАГАТЭ) и российских (РОСАТОМ, НИЯУ МИФИ) организаций в отношении методов сбора, хранения и управления научными знаниями.

В докладе представлены базовые принципы организации структуры Российской национальной базы знаний термоядерных технологий на основе информации проекта ИТЭР и предварительные технических требований к ней.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

НЕЙТРОННЫЕ ДИАГНОСТИКИ ИТЭР И ИХ АБСОЛЮТНАЯ КАЛИБРОВКА

В. Красильников^{1,2}, Л. Берталот¹, Ю. Кашук², Н. Юхнов^{1,2},
А. Саксена¹ и Л. Коре¹

¹*Международная Организация ИТЭР, Кадараш, Франция;*

²*Токамак Энерджи лтд, Абингдон, Великобритания;*

³*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия*

Нейтронные диагностические системы необходимы для контроля важных параметров плазмы ИТЭР, таких как, в первую очередь, мощность термоядерного синтеза, плотность мощности или ионная температура. Целью данной работы является описание различных нейтронных диагностических систем ИТЭР, таких как радиальная и вертикальная нейтронные камеры, внутревакуумные и вневакуумные мониторы нейтронных потоков, активационная система и нейтронные спектрометры. Диагностические комплексы с различными принципами измерения нейтронов, разрабатываемые в разных странах – партнёрах ИТЭР будут вести измерения одновременно и их синергия позволит определить искомые параметры плазмы максимально точно. Для повышения точности измерения и определения абсолютной чувствительности нейтронных детекторов в конкретных местах их расположений на ИТЭР планируется кампания по калибровке абсолютной чувствительности нейтронных диагностик с применением DD и DT нейтронных генераторов. Нейтронный выход таких генераторов будет достигать 109 и 1011 н/с для DD и DT генераторов соответственно. Плазма будет эмитироваться точечным источником, перемещаемым в различные положения внутри вакуумной камеры ИТЭР. Расчёты нейтронных транспортных

кодов будут сравнены с измерениями детекторов в ходе этого эксперимента для определения необходимых поправок к компьютерным моделям, используемым при расчётах. ИТЭР в настоящее время строится в Кадараше (Франция), и системы нейтронной диагностики находятся на различных стадиях – от разработки финального дизайна до производства и готовности к поставке.

Инженерные вопросы диагностики плазмы

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ АНТЕННЫ ДЛЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ИТЭР СО СТОРОНЫ СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В.А. Вершков^{1,2}, Mickaël Portalès³, В.В. Лукьянов^{1,2}, Д.А.
Шелухин^{1,2}, Laurent Saint-Michel³

¹*Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез - международные проекты» (УТС-Центр), 123182, пл. Академика Курчатова, д.1, Москва, Российская Федерация*

²*Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский Институт», 123182, пл. Академика Курчатова, д. 1, Москва, Российская Федерация*

³*Фирма «Конвексум», 514 Chemin de Saint-Jean-de-Garguier 13400 Aubagne, France.*

e-mail: tro@convexum.fr

Измерения профиля электронной плотности с помощью рефлектометрии в настоящее время проводятся на многих термоядерных установках. В большинстве случаев для измерения применяется локация плазмы со стороны слабого магнитного поля. Для базовых сценариев разряда в установке ИТЭР локация центральных областей со стороны слабого магнитного поля затруднена из-за плоского профиля электронной плотности и поглощения зондирующего излучения на циклотронном резонансе.

Однако центральные области шнура доступны для локации со стороны сильного магнитного поля при использовании нижней отсечки необыкновенной волны. Для практической реализации необходимо решить технические проблемы передачи СВЧ сигналов в широком частотном диапазоне на сторону сильного магнитного поля и размещения достаточно эффективной антенны на внутренней части камеры. Данная работа посвящена описанию работ по разработке и созданию антенны диагностики рефлектометрия со стороны сильного магнитного поля (HFS рефлектометрия).

Диагностика требует размещения на внутреннем обводе камеры излучающей и приемной антенн. Необходимость размещения антенны внутри узкой щели между бланкетами и малое расстояние между волноводами приводит к тому, что традиционный вариант антенной системы в виде двух пирамидальных рупоров неэффективен из-за малых размеров рупоров. Для решения проблемы была предложена концепция зеркально-рупорной антенны, показанной на Рис.1. Антенна является продолжением двух волноводов 1 и 2 и состоит из излучающего рупора 3, эллиптического зеркала 4 и плоского зеркала 5. Центр эллиптического зеркала расположен в центре камеры

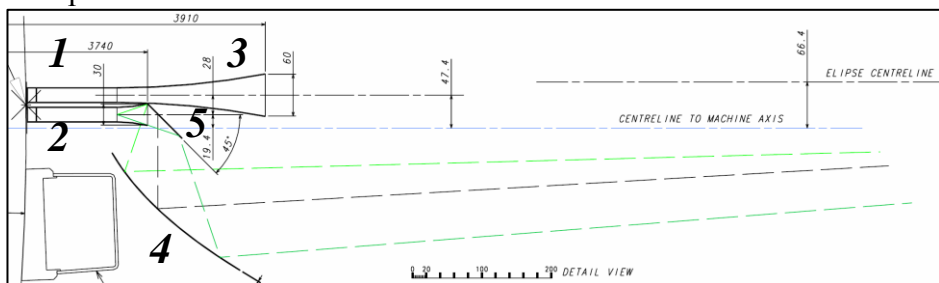


Рисунок 1. Детали конструкции антенны диагностики HFS рефлектометрия

в приближении геометрической оптики эффективно фокусирует лучи в приемный волновод. Расчеты показали, что связь приемного и передающего рупоров в такой антенны на 10-15 дБ больше традиционного варианта, однако антенная система сложна для

изготовления при использовании традиционных технологий (фрезеровка, сварка, электроэрозия). Анализ различных технологий привел к выбору в качестве технологии изготовления селективного лазерного плавления (СЛП) из порошка нержавеющей стали 316 L. На Рис. 2 показана 3-х мерная модель, а на Рис. 3 фотография изготовленного по такой технологии макетного варианта антенны. Для использования такой антенны в ИТЭР необходимо было показать, что свойства материала, полученного методом СЛП, удовлетворяют требованиям для внутрикамерных элементов. Для этого была разработана и утверждена в МО ИТЭР программа квалификации процесса СЛП. Проведенная в соответствии с утвержденной программой, квалификация технологии селективного лазерного плавления показало, что химический состав, магнитная проницаемость, теплопроводность, твердости изготовленного образца соответствует характеристикам аустенитной стали SS316LN. Было показано, что проводимость полученного материала существенно выше (в 6.6 раз), чем у стали SS316LN, что, однако, не препятствует применению изделий из материала на установке ИТЭР при условии низких наведенных гало-токов. Также показано существенное превышение прочности и предела упругости полученного материала по сравнению со

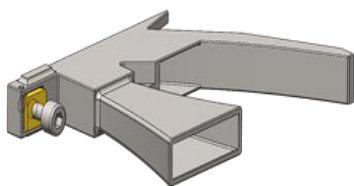


Рисунок 2.

3D модель антенны

сталью SS316 LN. Образцы, полученные по технологии SLM показали низкий уровень остаточного газовыделения и соответствие вакуумным критериям ИТЭР. Результаты испытаний показали перспективность применения изделий, изготовленных при помощи процедуры селективного лазерного плавления, на установке ИТЭР.



Рисунок 3.

Макет антенны

СВЧ свойства антенны были испытаны в специальной безэховой камере. Результаты испытаний подтвердили расчетные характеристики.

АКТИВАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ГЕНЕРАТОРА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НГ-24М

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

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

Нейтронные генераторы широко используются в различных областях науки и техники в качестве источников быстрых нейтронов. Их применяют для нейтронного каротажа скважин, в аналитических приложениях для нейтронно-активационного анализа, в системах безопасности для обнаружения наркотических и взрывчатых веществ, а также в медицинских исследованиях [1]. В качестве источника нейтронов в НГ-24М используется запаянная нейтронная трубка, внутри которой расположена секция ускорения ионов, источник ионов Пеннинга, тритиевая мишень, система наполнения и хранения дейтерий-тритиевой смеси. Медицинское применение нейтронных генераторов предполагает выбор и оптимизацию конструкционных материалов с целью снижения уровня активации мишенного узла, и соответственно, снижение дозовой нагрузки на пациента во время юстировки пучка и проведения подготовительных работ. Также знание уровня наведенной активности мишенного узла позволит спланировать и минимизировать затраты на демонтаж и захоронение радиационных отходов.

В данной работе проведено исследование активации нейтронного генератора НГ-24М. Рассмотрено два сценария работы нейтронного генератора: 16 часов с нейтронным выходом 2×10^{10} н/с, и 25 дней по 4 часа работы с выходом 2×10^{10} н/с. С помощью кода MCNP [2] рассчитано пространственное

распределение нейтронного потока в конструкции НГ-24М. Для расчета активации материалов использовался код FISPACT [3]. На основе расчетов активации материалов формировался объемный источник гамма-излучения для расчета транспорта фотонов. В результате было получено пространственное распределение мощности эквивалентной дозы.

В работе исследовано влияние различных марок сталей (03X16H15M3, 12X18H10T, 316L, 316L-IG), из которых выполнены элементы конструкции НГ-24М, на значения мощности дозы гамма-излучения после завершения работы нейтронного генератора. В течение суток после завершения работы выбор марки стали практически не влияет на мощность дозы в окружающем пространстве. Применение стали 316L-IG позволяет существенно снизить мощность дозы (до 40%) при больших временах выдержки, главным образом, за счет пониженного содержания (0,05%) кобальта.

Литература.

- [1]. Кирьянов Г.И. «Генераторы быстрых нейтронов». М. Издательство Энергоатомиздат, 1990 г., 223 с.
- [2]. MCNP USER'S MANUAL Code Version 6.2, Los Alamos National Laboratory report LA-UR-1729981
- [3]. M. Flemming, et al, The FISPACT-II User Manual, UKAEA-R(18)001 Issue January 2018

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ НЕКОТОРЫХ ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТ СВЛ

Е.Н. Андреев^{1,2}, И.И. Орловский^{1,2}, К.Ю. Вуколов^{1,2}, А.Г. Алексеев^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский Институт», Россия, 123182 Москва, пл. Курчатова 1

²УТС-Центр, Россия, 123182 Москва, пл. Курчатова 1

Оптические каналы диагностики «Спектроскопия водородных линий» (СВЛ) располагаются в экваториальных патрубках ИТЭР. Для вывода излучения плазмы и передачи его на детекторы используется как зеркальная, так и пропускающая оптика. Однако, в отличие от современных токамаков на ИТЭР будут существенно большие радиационные нагрузки, поэтому необходимо выбирать материалы для пропускающей оптики с учётом этого факта. В данной работе рассматривается радиационная стойкость 2-х типов кварцевых стекол КУ-1 и КС-4В, нескольких марок стекол типа флинт, а также 3-х типов кварцевого оптоволокна.

Основным кандидатным материалом для изготовления оптических вакуумных стекол для ИТЭР является плавный кварц. Ожидаемая поток нейтронов на вакуумные окна в экваториальных патрубках ИТЭР составляет $\sim 108 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, что соответствует флюенсу $2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ за всё время жизни ИТЭР. В НИЦ «Курчатовский Институт» на реакторе ИР-8 было проведено облучение образцов кварца КУ-1 и КС-4В толщиной 1 см до флюенса $6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. В результате было показано, что деградация пропускания образцов ввиду наведённого оптического поглощения (НОП) не превышает 5% в оптическом диапазоне длин волн [1].

Стекла типа флинт в паре с кварцевыми стеклами могут быть использованы на ИТЭР для изготовления ахроматических

объективов. Но, поскольку, в литературе практически отсутствуют данные об устойчивости коммерчески доступных марок флинтгов к нейтронному облучению, в НИЦ «Курчатовский Институт» были протестированы стёкла шести марок. Облучение образцов также проводилось на реакторе ИР-8 и велось до двух флюенсов $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$, что релевантно флюенсам в зонах ячейки порта и промежутка порта экваториального сечения ИТЭР соответственно. Наибольшую радиационную стойкость продемонстрировали стёкла марок Ф108 и ТФ200. Для использования в зоне ячейки порта больше подходит стекло Ф108 из-за того, что оно обладает более высоким пропусканием в синей области спектра в исходном состоянии, а его НОП при облучении до флюенса $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$ не превышает 0,5 дБ/см. Флинт марки ТФ-200 может быть рекомендован для использования в зоне промежутка порта, т.к. он продемонстрировал большую радиационную стойкость при облучении до флюенса $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$, однако необходимо отметить, что синяя граница рабочего диапазона этого стекла начинается в районе 450 нм [2].

Оптоволокно будет использоваться на ИТЭР для передачи излучения плазмы на удаленные детекторы в диагностической пультовой. В месте его расположения поглощенная доза по оценкам не превысит 10 кГр (по кремнию). Для выбора подходящего типа оптоволокна на гамма-источнике ГУТ-200М были протестированы образцы 3-х типов. В тестах измерения НОП производились непосредственно в процессе облучения. В результате исследований было показано, что наводороженные кварцевые волокна обладают достаточной радиационной стойкостью для применения в ИТЭР, их НОП в оптическом диапазоне не превышает 0,1 дБ/м при набранной дозе 15 кГр (по кремнию) [3].

Проведенные исследования позволяют сделать выбор подходящих материалов для изготовления пропускающей оптики, входящей в состав диагностики СВЛ на ИТЭР.

Литература.

- [1]. I.I. Orlovskiy, K.Yu. Vukolov, E.N. Andreenko, T.R. Mukhammedzyanov, *Journal of Nuclear Materials*, Volume 442, Issues 1–3, Supplement 1, 2013, Pages S508-S510.
- [2]. I.I. Orlovskiy, K.Yu. Vukolov, E.N. Andreenko, M.N. Gulyukin, *Nuclear Materials and Energy*, Volume 15, 2018, pp. 249-253.
- [3]. K.Yu. Vukolov, E.N. Andreenko, I.I. Orlovskiy, V.F. Shikalov, *Fusion Engineering and Design*, 2019, (4 pp.), In Press

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОРТПЛАГОВ ИТЭР

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

¹*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

³*Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск*

По спецификации ИТЭР, для возможности персоналом обслуживать оборудование радиационный фон вблизи вакуумного фланца диагностического порта через 10^6 с после окончания работы должен составлять менее 100 мкЗв/ч, что требует ослабления первичного потока нейтронов из плазмы более чем в 10^7 раз. Для обеспечения нейтронной защиты оборудования в диагностических порт-плагах токамака ИТЭР предложено использовать керамику из карбида бора. В ходе концептуального проектирования ИТЭР не предполагалось использование данной керамики в вакуумной камере ИТЭР. Поэтому возникла задача исследовать свойства карбид бора для подтверждения возможности ее использования в диагностических портах.

В рамках работы были проведены исследования химического состава, вакуумных и тепловых свойств керамики на основе карбида бора, изготавливаемой на российских предприятиях. Образцы керамики были представлены ООО «Вириал» (г. Санкт-Петербург), АО «НЭВЗ-Керамикс» (г. Новосибирск), ООО Бифорс (г. Тверь). Были исследованы горячепрессованный, реакционноспеченный, спеченный карбид бора, а также исходный порошок с различным размером зерна.

Для исследования химсостава использовались рентгеновский энергодисперсионный метод, а также нейтронный активационный метод. Показано, что горячепрессованная и спеченная керамика содержит не более 1 % разрешенных примесей.

Проведены тесты по определению скорости газоотделения в вакуум согласно ITER Vacuum Handbook. Для экваториального порт-плага №11 сделана оценка полного газовыделения с учетом карбида бора.

Получены данные о контактной теплопроводности на границе керамики карбида бора и CuCrZr бронзы. Из бронзы будут изготавливаться треи, с помощью которых керамика будет устанавливаться в порт-плагах ИТЭР. Теплопроводность на границе бронзы и керамики влияет на температуру керамики как при прогреве вакуумной камере ИТЭР перед экспериментами, так и при работе порта под нейтронной нагрузкой во время разрядов.

ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ НЕЙТРОННОЙ И МАГНИТНОЙ ЗАЩИТЫ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НА ITER

А.С. Наволоцкий¹, В.И. Афанасьев¹, А.Д. Мельник¹, М.И. Миронов¹, В.Г. Несеневич¹, М.П. Петров¹, С.Я. Петров¹, Ф.В. Чернышев¹, И.В. Александров², Г.В. Маринин², А.К. Валеев³, А.И. Маркелов³, А.П. Терешенок³, И.В. Кедров⁴, Б.В. Люблин⁴, Н.Ф. Шилкин⁴

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

²*ООО «РУССКИЕ ТЕХНОЛОГИИ», Санкт-Петербург, Россия*

³*ООО НПП «Металл-Композит», Ульяновск, Россия*

⁴*АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия*

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.

Прототипы анализаторов, разрабатываемых в настоящее время для установки ИТЭР, уже были успешно использованы в экспериментах на крупнейших токамаках: JET (Евратом, Великобритания) [1, 2], TFTR (США) [3], JT-60U (Япония) [4]. Тем не менее при создании комплекса анализаторов атомов для ИТЭР необходимо учитывать влияние дополнительных факторов, которые требуют принятия новых инженерных решений.

Во-первых, наличие рассеянного магнитного поля, достигающего 10^3 Гс в месте расположения диагностической системы, требует разработки индивидуальных магнитных экранов как для каждого из анализаторов, так и для предусилительной электроники, которая устанавливается в непосредственной близости от анализаторов. Кроме того, детекторные системы на основе фотоэлектронных умножителей располагаются в рассеянных магнитных полях анализирующих электромагнитов каждого из анализаторов, что также приводит к необходимости разработки магнитной защиты для детекторных модулей.

Во-вторых, во время дейтерий-третиевой фазы исследуемые потоки нейтральных атомов будут сопровождаться интенсивными потоками термоядерных нейтронов, которые будут активировать вакуумный трубопровод и окружающие его конструкции. Для того, чтобы диагностический комплекс удовлетворял требованиям радиационной безопасности, применяемым на ИТЭР, необходима разработка нейтронной защиты как вокруг трубопровода, так и вокруг анализаторов.

В докладе представлены результаты разработки магнитных экранов для детекторов и предусилительной электроники. Приведена методика изготовления карбида бора, являющегося одним из компонентов гетерогенной нейтронной защиты. Описана конструкция магнитного экрана анализатора HENPA в которую интегрирована нейтронная защита. Представлена конструкция элементов нейтронной защиты трубопровода.

Финансирование работы: госконтракт № Н.4а.241.19.19.1009 от 26.12.2018, часть работы, связанная с разработкой конструкции магнитных экранов предусилительной электроники, выполнена в рамках государственного задания по теме № 0040-2019-0023.

Литература.

- [1]. Petrov M.P., Afanasyev V.I., Corti S., Gondhalekar A., Khudoleev A.V., Korotkov A.A., Maas A.C. Neutral particle analysis in the MeV range in JET. — In: Intern. Conf. on Plasma Physics.

- Innsbruck, 1992, vol. 16C, Part II. European Physical Society, Geneva, 1992, p. 1031.
- [2]. Mironov M.I., Afanasyev V.I., Murari A., Santala M., Beaumont P. Tritium transport studies with use of the ISEP NPA during tritium trace experimental campaign on JET. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2010, vol. 52, p. 10.
- [3]. Petrov M.P., Budny R.V., Duong H.H., Fisher R.K., Gorelenkov N.N., McChesney J.M., Mansfield D.K., Medley S.S., Parks P.B., Redi M.H., Roquemore A.L. Studies of energetic confined alphas using the pellet charge exchange diagnostic on TFTR. — Nuclear Fusion, 1995, vol. 35 (12), p. 1437—1443
- [4]. Kusama Y., Nemoto M., Afanassiev V.I., Kozlovskij S.S., Petrov S.Ya., Satoh M., Tsukahara Y., Kislyakov A.I., Petrov M.P., Takeuchi H. Neutral particle analyzer with energy range up to 4 MeV for both alpha particles and protons. — Fusion Engineering and Design, 1997, vol. 34—35, p. 531—534.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ НА ВХОДНЫЕ ОКНА МНОГОАНОДНЫХ ФЭУ

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

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая 26,
194021*

*1 Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого», Россия, Санкт-
Петербург, Политехническая 29, 195251
E-mail: amelnik@npd.ioffe.ru*

В настоящее время в ФТИ им. А.Ф. Иоффе ведется разработка диагностической системы атомных анализаторов [1, 2] для строящегося токамака-реактора ITER. Данная система состоит из двух приборов – анализаторов LENPA и HENPA, предназначенных для регистрации атомов изотопов водорода в диапазоне тепловых (10 – 200 кэВ) и надтепловых (до 2.2 МэВ) энергий соответственно. Особенностью работы анализаторов в условиях горения дейтерий-третиевой плазмы токамака ИТЭР является наличие высокого нейтронного и гамма-фона.

Для регистрации вторичных ионов в анализаторах будут использованы сцинтилляционные детекторы на основе многоанодных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) НАМАМАТСУ H8500D и кристаллов CsI(Tl). Применение сцинтилляторов микронной толщины (2-27 мкм), нанесенных на входные окна ФЭУ, позволяет создавать детекторы ионов с малой чувствительностью к нейтронам и гамма-квантам [3, 4]. В докладе представлена технология, разработанная для производства таких

детекторов. Технология включает в себя несколько этапов. В начале на подложки из кварцевого стекла методом вакуумного термического напыления наносится сцинтиллятор требуемой толщины. После контроля качества напыленного сцинтиллятора подложки приклеиваются с помощью оптического клея на входное окно многоанодного ФЭУ. На последнем этапе проводится тестирование изготовленного детектора при помощи источника альфа-частиц. В докладе описаны особенности каждого этапа технологического процесса, представлен один из произведенных детекторов и его характеристики.

Финансирование работы: госконтракт № Н.4а.241.19.19.1009 от 26.12.2018, часть работы, связанная с исследованием характеристик изготовленных детекторов, выполнена в рамках госзадания по теме № 0040-2019-0023

Литература.

- [1]. V.I. Afanasyev, F.V. Chernyshev, A.I. Kislyakov, S.S. Kozlovsky, B.V. Lyublin, M.I. Mironov, A.D. Melnik, V.G. Nesenevich, M.P. Petrov, S.Ya. Petrov // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2010. V. A 621. P. 456-467.
- [2]. Petrov S.Ya., Afanasyev V.I., Melnik A.D., Mironov M.I., Navolotsky A.S., Nesenevich V.G., Petrov M.P., Chernyshev F.V., Kedrov I.V., Kuzmin E.G., Lyublin B.V., Kozlovski S.S., Mokeev A.N. // Physics of Atomic Nuclei. 2017. V. 80. N. 7. P. 1268–1278
- [3]. Афанасьев В.И., Козловский С.С., Макарьин Д.В., Мельник А.Д., Миронов М.И., Несеневич В.Г., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 5. P. 440-446.
- [4]. Несеневич В.Г., Афанасьев В.И., Козловский С.С., Макарьин Д.В., Мельник А.Д., Миронов М.И., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В. // ПТЭ, 2012 № 2 с. 115-119

СТЕНДОВЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «АЛМАЗНЫЙ ДЕТЕКТОР ИТЭР» ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

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

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, n.rodionov@iterrf.ru,
v.rodionova@iterrf.ru, trapag@triniti.ru*

В проектом центре ИТЭР создан технологический стендовый комплекс «Алмазный детектор». Цель стендового комплекса разработка и изготовление алмазных детекторов ионизирующих излучений для термоядерной установки ИТЭР, а также алмазных детекторов различного назначения. Стендовый комплекс предназначен для выполнения работ по разработке конструкций и технологии изготовления детекторов ионизирующего излучения, контроля параметров как комплектов, так и детекторов в целом. В состав стендового комплекса входят напылительные установки, высокотемпературная печь для отжига кристаллов, лазерный комплекс, установка ультразвуковой микросварки, участок химической обработки поверхности кристаллов, а также аналитический участок для определения качества алмазного материала и контроля параметров детекторов. Технологический цикл изготовления детекторов состоит из этапов: отжиг кристаллов, химическая и ионная обработка поверхности кристаллов, напыление металлических контактов, приварка тоководов и монтаж детектора.

Для отжига алмазных кристаллов используется высокотемпературная вакуумная печь RD WEBB 117, позволяющая производить отжиг кристаллов при температуре до 2000°C, что способствует устранению дефектов кристалла. Участок химической

подготовки предназначен для очистки поверхности алмазных кристаллов и вспомогательной оснастки, перед напылением, а также корпусов и деталей детекторов перед сборкой. На участке используются концентрированные минеральные кислоты, такие как соляная, азотная, серная, ортофосфорная, щелочи, органические растворители (изопропиловый спирт, ацетон), дистиллированная и деионизованная вода.

Напыление металлических контактов выполняется на установках магнетронного напыления. Комплекс оснащен вакуумной технологической установкой для напыления контактов алмазных детекторов «ФЕРМИ 450-ДИ» и тремя настольными напылительными установками «DESK V». Вакуумная технологическая установка для напыления контактов алмазных детекторов «ФЕРМИ 450-ДИ» предназначена для нанесения металлических пленок в магнетронном разряде. Установка позволяет напылять одно- и многослойные покрытия с использованием трех различных металлов и имеет в своем составе имеет 3 магнетрона и ионный источник. Операции ионной чистки и напыления выполняются в одном вакуумном объеме.

Настольные напылительные установки «DESK V» предназначены для макетирования технологических процессов с различными мишенями.

Установка технологический лазерный комплекс DIAMAX предназначена для изготовления оснастки для напыления кристаллов и малоразмерных деталей корпусов детекторов (сапфировые оправки и диафрагмы из бериллиевой бронзы для крепления кристаллов в корпусе детектора), а также маски с характерными размерами «рисунка» деталей 50-100 мкм. Управление лазерным комплексом происходит с компьютера.

На участке сборки детекторов проводится приварки тоководов к контактам чувствительного алмазного элемента детектора и монтаж детекторов. Для приварки тоководов участок укомплектован полуавтоматической установкой ультразвуковой микросварки ТРТ НВ16.

Стендовый комплекс оснащен аналитическим участком, в состав которого входит следующее оборудование:

- Электронный микроскоп TESCAN VEGA 3LMH;
- Люминесцентный микроскоп OLYMPUS BX43;
- Стереоскопический микроскоп «Альтами Ювелир 1»;
- Оптический профилометр «ProFilm 3D 205-0835»;
- Спектрометр инфракрасного диапазона Spectrum TWO;

- Спектрометр видимого и УФ диапазона Lambda 265.

Участок предназначен для контроля качества алмазных кристаллов, качества напыления контактов, а также электротехнических параметров комплектующих и детекторов.

Стенд способен выполнять широкий круг задач, связанных с разработкой и созданием детекторов ионизирующих излучений различного назначения, проводить разработку радиационно-стойкой электроники на основе синтетического алмаза, проводить исследования по созданию адгезионно-прочных покрытий.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Красильников А.В.¹, Родионов Н. Б.¹, Амосов В.Н.²,
Родионова В. П.¹, Мещанинов С.А.², Трапезников А.Г.¹,
Хмельницкий Р.А.²

¹Частное учреждение «ИТЭР-Центр»

²АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,

n.rodionov@iterrf.ru, v.rodionova@iterrf.ru, trapag@triniti.ru

Высокая радиационная стойкость, возможность работать при повышенных температурах, высокая теплопроводность, миниатюрность, высокая подвижность носителей являются наиболее важными свойствами алмаза для применений, связанных с регистрацией ионизирующих излучений [1]. При изготовлении детекторов ионизирующих излучений с чувствительным элементом на основе синтетического алмаза важно электронное качество алмазных кристаллов. Наличие примесей, инородных включений, дефектов роста в кристалле значительно влияют на полный сбор носителей заряда и детекторные свойства алмазного кристалла. Основными требованиями к материалу электронного качества являются примесный состав (концентрация азота и бора) и кристаллическое совершенство. В настоящее время задача получения концентрации азота до 10 ppb и менее решена основными производителями синтетического алмазного материала. Однако, чтобы достигнуть кристаллического совершенства синтетического алмаза с малым числом дефектов требуется уникальная технология.

В работе представлен сравнительный анализ качества алмазного материала различных производителей оптическими

методами и измерением спектров отклика при облучении нейтронами, альфа-частицами, рентгеновским излучением, а также спектров фотопроводимости. Анализ кристаллической дефектности алмаза проводился на следующих приборах: люминесцентный микроскоп «OLYMPUS BX 43», электронный микроскоп «TESCAN VEGA 3LMH», оптический профилометр «ProFilm 3D 205-0835», спектрометры ИК-Фурье «Spectrum Two» и УФ и видимого диапазона «Lambda 265».

Все наблюдаемые в оптический микроскоп особенности алмазных образцов можно разделить на две группы: 1) поверхностные структуры и 2) объёмные дефекты. Для исследования поверхности использовались следующие режимы на люминесцентном микроскопе: наблюдение в проходящем свете методами светлое поле, темное поле, поляризация, дифференциально-интерференционный контраст и в отраженном свете методами светлое поле, темное поле, поляризация, дифференциально-интерференционный контраст, флуоресценция (люминесценция). Для исследования объема прозрачных образцов использовались режимы наблюдения в проходящем свете в светлом поле и наблюдение двулучепреломления.

После спектрометрических и оптических исследований были измерены вольт-амперные характеристики и проведены исследования детекторных свойств алмазных кристаллов. Для этого на алмазный кристалл были нанесены платиновые контакты толщиной 35 нм и чувствительный элемент смонтирован в коаксиальный корпус. Радиационные измерения детекторов проводились на нейтронном генераторе ИНГ-07Т2 и радиоактивных источниках. Были получены спектры отклика кристаллов на рентгеновское, нейтронное и альфа-облучение, а также спектры фотопроводимости. Проведено сравнение результатов оптических и радиационных измерений, проанализировано детекторное качество в зависимости от уровня дефектности кристаллов.

Исследования алмазного материала для детекторов ионизирующего излучения показали разный уровень дефектности (дислокации, механические напряжения, включения) кристаллов у

различных производителей. Как показали измерения спектров отклика детекторов на ионизирующее излучение, наилучшее детекторное качество достигнуто на материале с минимальной дефектностью компании Element Six (a De Beers Group Company).

Литература.

- [1]. В. Н. Амосов, С. А. Мещанинов, Н. Б. Родионов, Прикладная физика 2001, № 4, стр. 104-108.

РАЗРАБОТКА АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ВНК ИТЭР

Р.Р. Хафизов, В.Н. Амосов, К.К. Артемьев, С.А. Мещанинов,
Г.Е. Немцев, В.П. Родионова, Н.Б. Родионов, А.Г. Трапезников

Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва

Работа посвящена разработке макета алмазного детектора малых габаритных размеров, проводимой в рамках выполнения проекта вертикальной нейтронной камеры (ВНК) ИТЭР. Уменьшение габаритных размеров алмазного детектора является частью процесса по оптимизации конструкции элементов ВНК, проводимого с целью улучшения метрологических характеристик блоков детектирования, входящих в состав ВНК, облегчения условий их эксплуатации и упрощения конструкции ВНК.

Снижение габаритных размеров алмазного детектора наряду с переработкой компоновки блока детектирования, в состав которого он входит, позволяет снизить осевой габаритный размер блока детектирования ВНК. В свою очередь это позволяет увеличить длину коллиматора, что вместе с оптимизацией формы канала коллиматора ведёт к увеличению отношения сигнал-фон. При этом, также снижается тепловая нагрузка на блоки детектирования ВНК, что может позволить отказаться от их активного охлаждения и значительно упростить конструкцию ВНК.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРОЕКТ ИНТЕГРАЦИИ ВП№02 И ВП№08 ИТЭР

²Е.В. Александров, ^{1,5}А.В. Бурдаков, ³И.В. Буслаков, ¹А.И. Горбовский, Е.К. ¹Зайцев, ¹М.В. Иванцовский, ³И.Д. Кириенко, ¹А.А. Листопад, ³А.М. Лобачев, ³И.Н. Логинов, ¹Ю.А. Манаенкова, ³В.С. Модестов, ¹П.А. Селезнев, ³О.Б. Шагниев, ¹С.В. Шиянков, ^{1,4}А.А. Шошин

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

e-mail: a.a.listopad@inp.nsk.su

²*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, РФ,*

e-mail: e.alexandrov@iterrf.ru

³*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, РФ,*

e-mail: vmodestov@spbstu.ru

⁴*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, РФ,*

e-mail: a.a.shoshin@inp.nsk.su

⁵*Новосибирский государственный технический университет,*

Новосибирск, РФ, e-mail: a.v.burdakov@inp.nsk.su

Диагностические порты ИТЭР предназначены для размещения и защиты оборудования токамака. Системы установки будут эксплуатироваться в крайне неблагоприятных условиях, являющихся комбинацией различных нагрузок, таких как нейтронные, гидравлические, тепловые, вибрационные, ударные, электромагнитные и прочие.

Целью данной работы является разработка устройств для размещения диагностического оборудования в верхних портах №02 и №08 ИТЭР. За прошедший период был выполнен очередной этап эскизного проектирования устройств для размещения оборудования в данных портах. В ходе этапа были

усовершенствованы трехмерные модели порт-плагов, включающих в себя диагностическую первую стенку (ДПС), диагностический защитный модуль (ДЗМ), корпус. Модернизированы опорные конструкции для размещения оборудования в околопортовом пространстве и порт-камере.

Проведенный этап нейтронных расчетов показал эффективность внутрипортовой защиты, размещаемой позади ДЗМ. Расчетное моделирование тепловых, термогидравлических, электромагнитных и механических нагрузок на элементы конструкции диагностических портов доказывают работоспособность текущей версии дизайна.

Разработанная в ИЯФ СО РАН внутрипортовая нейтронная защита порт-плага, а также идея заполнения опорной рамы околопортового пространства защитными элементами получила одобрение в Организации ИТЭР (Франция).

В рамках подготовки к защите предварительных проектов верхних портов №02 и №08 были составлены комплекты проектной документации, в частности, написаны спецификации нагрузок на основе результатов тепловых, термогидравлических, электромагнитных и механических расчетов.

Принципиальные конструктивные решения и полученные в ходе выполнения работы результаты могут быть использованы при разработке других верхних порт-плагов ИТЭР, а также найти применение в проектировании аналогичных систем в установках с подобными режимами работы.

ИНТЕГРАЦИЯ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПОРТА №11 ИТЭР

¹Суляев Ю.С., ^{1,2}Бурдаков А.В., ^{1,2}Иванцовский М.В., ³Александров Е.В., ²Пищинский К.В., ¹Шарафеева С.Р., ¹Землянский Ю.Н.,
¹Норышев Е.А., ¹Поротников А.Б., ¹Шошин А.А., ¹Клименко М.В.,
⁴Смирнов А.Б., ⁴Пожилов А.А., ⁴Кириенко И.Д., ⁴Модестов В.С.

¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, РФ Yu.S.Sulyaev@inp.nsk.su*

²*Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, РФ*

³*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, РФ*

⁴*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого, г. Санкт-Петербург, РФ*

Доклад посвящен обзору результатов проектных работ по созданию защитных структур для интеграции диагностических систем экваториального порта №11 ИТЭР. Интеграция состоит из вакуумной части – порт-плага, сборки в околопортовом пространстве и сборки в порт-камере. Три диагностических защитных модуля (ДЗМ) в вакуумной части порта вмещает в себя наиболее нагруженные передние элементы диагностических систем, подвергающиеся интенсивным радиационным, тепловым, электромагнитным и механическим воздействиям. Новая итерация нейтронных, теплогидравлических, электромагнитных и механических расчетов показывает, что конструкция как каждого отдельного ДЗМ, так и всего порт-плага в целом удовлетворяет всем требованиям ИТЭР с точки зрения радиационной безопасности, отсутствия перегрева и механической стабильности во время наиболее опасных плазменных срывов.

Проектные работы по интеграции диагностических и служебных элементов на вакуумном фланце экваториального порт

– плаги №11 были направлены на оптимизацию обслуживания регулярно проверяемых компонентов диагностических и служебных систем, критически важных для безопасной работы ИТЭР. Разработана модульная модель нейтронной защиты прямых каналов диагностик и заглушки биозащиты, которая обеспечивает максимальную защиту для обслуживающего персонала и удовлетворяют принципам поэтапного ввода диагностических систем в эксплуатацию.

Во время защиты финального проекта интеграции экваториального порта №11, проведенной летом 2019 г. в организации ИТЭР, принимающими специалистами был отмечен высокий научно-технический уровень реализации проекта интеграции, а сути высказанных ими замечаниях нет сомнений в правильности выбранных технических решений.

Ведется подготовка производственных мощностей ИЯФ СО РАН к изготовлению и сборке оборудования для размещения диагностических систем в соответствии с правилами и требованиями французского кода RCC-MR 2007. Изготовлены прототипы полноразмерных вакуумных изделий, на которых были отработаны технологии глубокого сверления неподвижной заготовки, сварка крупногабаритных изделий, различные методы контроля сварных соединений. Завершено строительство сборочного помещения для крупногабаритных вакуумных изделий для ИТЭР с обеспечением специальных условий чистоты согласно правилам RCC-MR 2007.

ИНЖЕНЕРНАЯ ПРОРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ DC/PDC СИСТЕМЫ ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ ЗЕРКАЛ ДИАГНОСТИК “СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ” И “АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ” В ИТЭР

Ю.В. Капустин^{1,2}, А.В. Рогов^{1,2}, Д.К. Вуколов^{1,2}, А.А. Морозов^{1,2},
А.М. Козлов^{1,2}

¹*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Kapustin_YV@nrcki.ru*

²*Автономная некоммерческая организация Координационный центр "Управляемый термоядерный синтез – международные проекты", 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, dc@fc.iterru.ru*

Системы плазменной очистки первого зеркала диагностик «Спектроскопия водородных линий» (55.E2, [1]) и «Активная спектроскопия» (55.EC, [2]) основаны на ионном распылении внутренней поверхности сеточного полого катода [3] в разряде на постоянном (DC) или среднечастотном импульсном (PDC) токе. Зеркало и дополнительные сеточные электроды образуют полый катод, изолированный анод размещается внутри него. Продукты эрозии внутренних элементов полого катода осаждаются на стенках диагностического порта. В диагностике «Активная спектроскопия» используется водоохлаждаемое первое зеркало. Конструкция узла входного зеркала при закрытой шторке позволяет обеспечить замкнутую конфигурацию сеточного полого катода с расположенными внутри него зеркалом и рефлектором, очистка которых производится одновременно. Между конструктивными элементами полого катода и стенками диагностического порта обеспечивается зазор не менее 20 мм. Все

катодные элементы, зеркало и рефлектор заземлены. Локализация газового разряда внутри полого катода обеспечивается за счёт его замкнутой конфигурации («клетка Фарадея») [4]. В диагностике «Спектроскопия водородных линий» используются первое и второе зеркала без системы охлаждения. За счёт малого расстояния между этими зеркалами требуется их одновременная очистка. За счёт вырезов в полом катоде для прохода излучения, нет возможности сделать разрядную ячейку замкнутой. В этой системе для улучшения эффективности очистки элементы полого катода и зеркала изолированы от стенок диагностического порта.

В представленной работе рассматриваются функциональные особенности, заложенные в отдельные компоненты системы очистки (источник питания чистящего разряда, систему коммутации электродов, конструкцию разрядной ячейки и др.), которые позволяют добиться высокой равномерности очистки при одновременном повышении надёжности системы. Оптимизации конструкции отдельных элементов разрядной ячейки проводилась для увеличения скорости и равномерности очистки, а также снижения минимального рабочего давления. Исследована зависимость этих параметров от: 1) площади анодного электрода; 2) материала, размера и формы ячеек сеточных электродов; 3) зазора между сеточными стенками разрядной ячейки и внешними элементами конструкции.

Проведена разработка конструкции узла изоляторов: экспериментально проверены необходимые величины зазора между внешним и внутренним стаканами, а также длина «лабиринта», которые в совокупности позволяют избежать осаждения на поверхности изоляторов проводящих плёнок. Аналогичным образом для диагностики «Спектроскопия водородных линий» оптимизирована конструкция гаража шторки, на которой располагается ретрорефлектор, для защиты его от запыления.

Для диагностики «Активная спектроскопия» исследовано влияние неполного закрытия защитной шторки на эффективность процесса очистки первого зеркала. Показано, что неполное закрытие шторки приводит к уменьшению скорости очистки примерно в 10 раз.

Выполнен анализ проблемы отравления анода – снижения его эффективной поверхности при наличии диэлектрических загрязнений. На основании проведённого исследования предложен специальный режим очистки анода от загрязнений.

Принципиальные электрические схемы систем очистки зеркал рассматриваемых диагностик представлены на Рис. 1.

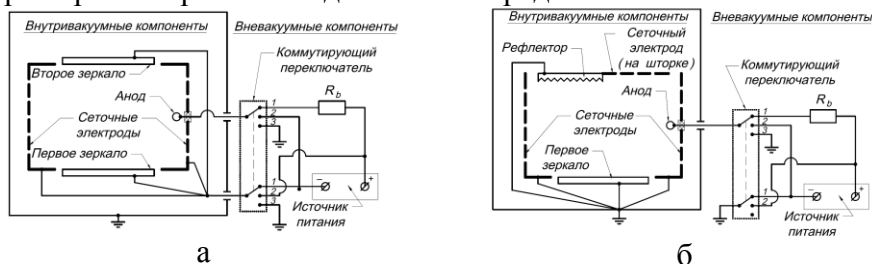


Рис. 1. Принципиальные электрические схемы системы очистки зеркал диагностик «Спектроскопия водородных линий» (а) и «Активная спектроскопия» (б). Указанные положения коммутатора соответствуют следующим режимам работы: 1 – очистка зеркал; 2 – очистка анода; 3 – нормальная работа установки (заземлённые электроды).

Литература.

- [1] Antonov N. PDR DA System Design Description (DDD) 55.E2 H-Alpha and Visible Spectroscopy. V. 1.0. 2017. 109 p. IDM UID: TWRHG4.
- [2] Zvonkov A. System Design Description (DDD) 55.EC CXRS Edge. V. 4.0. 2019. 48 p. IDM UID: 79SL6Y.
- [3] Рогов А.В., Капустин Ю.В. Разработка системы очистки диагностических зеркал в ИТЭР на основе комбинированной разрядной конфигурации "полый катод – ячейка Пеннинга". Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 3. С. 240-247.
- [4] Rogov A., Kapustin Yu., Alekseev A., Tugarinov S., Vukolov D. Progress in development of DC/PDC discharge mirror cleaning system for H-alpha and CXRS-edge diagnostics. 35th meeting of the ITPA diagnostics topical group. 2018.

<https://portal.iter.org/departments/POP/ITPA/Diag/DIAG/Document%20Library/38/Presentations/14-02-Rogov.pdf>

ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВНК

А.С. Таскаев¹, М.В. Иванцовский¹, А.В. Бурдаков^{1,3}, А.И. Горбовский¹, Е.К. Зайцев¹, А.В. Звонков², П.А. Селезнев¹, А.Г. Стешов¹, П.В. Усов¹, С.В. Шиянков¹, А.А. Шошин^{1,5}, Е.С. Хомяков¹, А.Б. Смирнов⁴, А.А. Пожилов⁴, И.Д. Кириенко⁴, В.С. Модестов⁴.

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

e-mail: A.S.Taskaev@inp.nsk.su

²*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 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 для установки ИТЭР будет состоять из двух частей (верхняя и нижняя), в каждой из которых будет располагаться по шесть детекторных узлов, объединенных в герметичные диагностические модули, снабженные откачкой и системой водяного охлаждения. Верхняя ВНК будет установлена в верхний порт (ВП) №18 и должна являться составной частью ДЗМ этого порта, нижняя ВНК будет установлена в нижний порт (НП) №14.

Для подтверждения работоспособности и выявления технологических трудностей разработанной конструкции системы водяного охлаждения блока детекторов верхней Вертикальной Нейтронной Камеры были произведены макет системы водяного охлаждения и технологические макеты элементов конструкции ВНК.

Предоставленный доклад демонстрирует изготовленный макет системы охлаждения ВНК, а также результаты ряда испытаний, проведённых с макетом системы охлаждения.

За прошедший год была переработана конструкция системы водяного охлаждения детекторного модуля Верхней Вертикальной Нейтронной Камеры, изменены 3D модели ВНК, системы водяного охлаждения, нейтронная защита, а также модернизирована электрическая коммутация детекторов.

Результаты произведенных испытания могут быть использованы при конструировании других диагностик поставляемы на установку ИТЭР, а также для больших экспериментальных термоядерных установок типа токамак.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВНК

А.С. Таскаев¹, М.В. Иванцовский¹, А.В. Бурдаков^{1,3}, А.И. Горбовский¹, Е.К. Зайцев¹, А.В. Звонков², П.А. Селезнев¹, А.Г. Стешов¹, П.В. Усов¹, С.В. Шиянков¹, А.А. Шошин^{1,5}, Е.С. Хомяков¹, А.Б. Смирнов⁴, А.А. Пожилов⁴, И.Д. Кириенко⁴, В.С. Модестов⁴.

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

e-mail: A.S.Taskaev@inp.nsk.su

²*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 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 для установки ИТЭР будет состоять из двух частей (верхняя и нижняя), в каждой из которых будет располагаться по шесть детекторных узлов, объединенных в герметичные диагностические модули, снабженные откачкой и системой водяного охлаждения. Верхняя ВНК будет установлена в верхний порт (ВП) №18 и должна являться составной частью ДЗМ этого порта, нижняя ВНК будет установлена в нижний порт (НП) №14.

Для обеспечения наилучших результатов работы системы, детекторы должны быть размещены на наибольшем возможном удалении от плазмы, для этого были предприняты ряд усовершенствований. В связи с изменениями внутри верхнего порта №18, появилась возможность разместить детекторы на большее расстояние от плазмы, за счёт отказа от водяной системы охлаждения детекторов. Был переработан коммутационный узел

блоков детекторов, в результате чего удалось спроектировать разводку электрических кабелей более компактно, что так же позволит отдалить детектор от плазмы.

Предоставленный доклад демонстрирует обновлённый дизайн коммутационного узла, а также отсутствие системы водяного охлаждения детекторов.

За прошедший год был переработан коммутационный узел детекторного модуля Вертикальной Нейтронной Камеры, изменены 3D модели ВНК, системы водяного охлаждения, нейтронная защита, а также модернизирована электрическая коммутация детекторов.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДА И СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ЗАЩИТНОЙ ШТОРКИ ДИАГНОСТИКИ СВЛА

Козлов Андрей Михайлович^{1,2}, Вуколов Дмитрий Константинович^{1,2}, Попов Иван Алексеевич³

¹ УТС-Центр, Россия, 123182 Москва, пл. Курчатова 1

² НИЦ «Курчатовский Институт», Россия, 123182 Москва, пл. Курчатова 1

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Кондиционирование обращённых к плазме поверхностей вакуумной камеры в установках токамак - важная задача, целью которой является уменьшение потока примесей и водородосодержащих элементов со стенок камеры в плазму разряда. При этом, на оптические компоненты, обращенные к плазме, такие как первое зеркало, осаждаются продукты эрозии. Для защиты первого зеркала от переосаждения примесей во время кондиционирования первой стенки используется шторка. Шторка состоит из лезвия, перекрывающего входную апертуру на время кондиционирования, передаточного механизма и привода. Защитная шторка работает в условиях высокого вакуума до 10^{-9} Па, температуры до 470°C на лезвии во время рабочего импульса, бериллиевой пыли, нейтронных/гамма потоков до 10^{13} н/см²/сек, испытывает циклические электромагнитные и инерционные нагрузки при срыве плазмы (магнитные поля до 4 Тл и изменение поля до 20 Тл/с), а также должна выдерживать проектное землетрясение с пиками до 18g на частоте 8 Гц.

Доклад посвящен выбору привода шторки и определению его параметров. Рассмотрены вопросы связанные с

проектированием, интеграцией и расчётом пневматического привода для использования в термоядерной установке ИТЭР. Показаны возможные схемы питания привода и проблемы, возникающие при проектировании и использовании таких систем. Сделан обзор нагрузок действующих на привод и пневматическую систему, показаны вопросы конечно-элементного моделирования и определения структурной прочности компонент системы в соответствии с кодом RCC-MR 2007.

В заключении кратко рассмотрены планы на проведение ресурсных и прочностных испытаний пневматического привода.

СОЗДАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ МОДУЛЕЙ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПОРТА №11

Гавриленко Д.Е.¹, Бурдаков А.В.^{1,3}, Иванцовский М.В.^{1,3},
Землянский Ю.Н.¹,
Рувинский Е.С.¹, Стешов А.Г.¹, Шиянков С.В.¹, Суляев Ю.С.^{1,2}

¹*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

³*Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск*

Диагностические защитные модули (ДЗМ) экваториального порта №11 представляют собой структуры сложного профиля с большим количеством каналов охлаждения во фронтальной, нижней и верхней частях. Пример структуры водяных каналов приведен на рисунке 1.

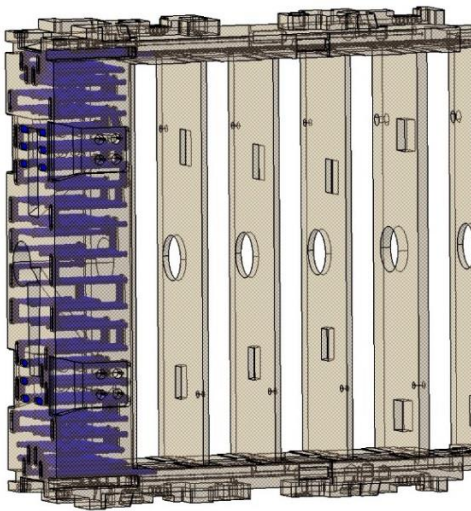


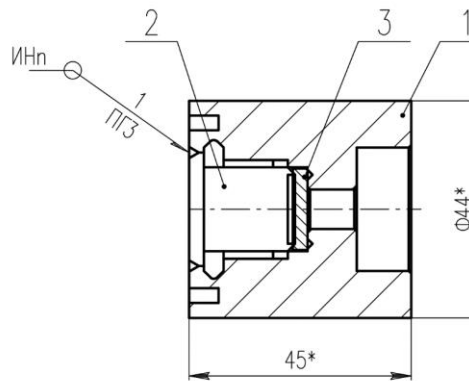
Рисунок 1. Общий вид ДЗМ экваториального порта №11

Структура каналов охлаждения формируется путем сверления перпендикулярных относительно друг друга отверстий. После формирования системы каналов все технологические отверстия должны быть заглушены - заварены и проверены при помощи методов неразрушающего контроля (рентгенография или ультразвук).

Для определения оптимальной конструкции элементов данной системы, а также для отработки технологий всех специальных процессов, в ИЯФ СО РАН было изготовлено несколько типов конструкций водяных каналов охлаждения и уплотнительных пинов. Пример конструкции одного из нескольких типов блоков проверки герметичности приведен на рисунке 2.

В рамках данной работы были проведены:

- Отработка метода ультразвукового контроля сварных соединений;
- Отработка метода рентгенографического контроля сварных соединений;
- Гидравлические испытания (до и после термоциклирования);



1. Швы сварных соединений по СТП.020–87.
2. До сварки проверить на вакуум
3. После выполнения прихваток проверить н
4. * Размеры для справок

Рисунок 2. Блок проверки герметичности

- Вакуумные испытания (до и после термоциклирования).

В результате данного исследования были выработаны технические решения, в наибольшей степени отвечающие требованиям ИТЭР.

РАДИАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ БЛОКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ВНК

Мещанинов С. А., Родионов Н.Б., Амосов В.Н., Обудовский С.А.

*АО «Государственный научный центр Российской Федерации
Троицкий институт инновационных и термоядерных
исследований», г. Москва, Россия,
mesh@triniti.ru, rodionovnb@gmail.com, amosov@triniti.ru,
s.obudovsky@iterrf.ru*

Вертикальная нейтронная камера (ВНК[1]) – подсистема нейтронной диагностики ИТЭР, предназначена для измерения нейтронного выхода в полоидальном сечении плазмы токамака с заданным временным разрешением и восстановления профиля нейтронного источника. В режимах полномасштабных пусков установки ИТЭР нейтронная диагностика ВНК должна обеспечить измерение нейтронных потоков и спектров в диапазоне плотности потоков нейтронов 10^5 — 10^{12} см⁻²с⁻¹. ВНК состоит из верхней ВНК, расположенной в верхнем диагностическом порту №18 и содержащей 6 коллиматоров, и нижней ВНК, расположенной в нижнем порту №14 и содержащей 5 коллиматоров. В конце каждого коллиматора для измерения плотности нейтронного потока устанавливается блок детектирования быстрых нейтронов (БДБН). БДБН ВНК ИТЭР включает в себя четыре нейтронных детектора: два алмазных и две ионизационных камеры деления (ИКД), расположенные на одной оси в одном корпусе. В состав двух ионизационных камер деления входят радиаторы из ²³⁸U. Алмазные детекторы и ИКД, входящие в блок детектирования, отличаются чувствительностью к быстрым нейтронам.

Радиационные испытания БДБН-В верхней и БДБН-Н нижней ВНК были выполнены на нейтронном стенде АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ». БДБН помещали в поле излучения нейтронного генератора с известными характеристиками нейтронного поля

(плотность потока нейтронов, спектральный состав, диаграмма направленности) и подключали к штатной системе регистрации сигналов. Регистрировались амплитудные спектры отклика детекторов в зависимости от режима работы генератора и положения БДБН в нейтронном поле. Определялись характеристики нейтронных детекторов, входящих в состав БДБН: чувствительности, токи утечки, спектрометрические параметры алмазных детекторов, степень взаимного влияния детекторов. В ходе работы проведены измерения чувствительности к нейтронам с энергией 14,6 МэВ алмазных детекторов в составе опытных образцов БДБН-Н и БДБН-В ВНК ИТЭР при ориентации оси БДБН-В параллельно и перпендикулярно оси генератора. Измеренные чувствительности алмазных детекторов в составе БДБН-Н и БДБН-В соответствуют значениям, заявленным в ТЗ.

В схеме измерения с расположением БДБН вдоль потока нейтронов, было выявлено частичное ослабление чувствительности детекторов, расположенных в тени других детекторов. Степень ослабления чувствительности детекторов в «тени» варьировалась в зависимости от положения детектора в блоке с коэффициентом 1-1,9. Энергетическое разрешение алмазных детекторов для нейтронов с энергией 14,1 МэВ в составе БДБН не более 3,8%.

Литература.

- [1]. В. Н. Амосов, С. А. Мещанинов, Н. Б. Родионов. Прикладная физика, №4, 2011, с. 104-108.

МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗОНДА С ЦЕЛЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕГО ЕМКОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ

Л.Б. Беграмбеков, О.А. Бидлевич, А.Н. Войтюк, А.В. Грунин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Введение

Эксперименты в современных термоядерных установках показывают, что основная часть материала, распыленного с контактирующих с плазмой элементов первой стенки и дивертора, в итоге трансформируется в пыль. Большое количество пыли, накопленное в установках, отрицательно влияет на параметры разряда и накапливает значительное количество трития.

Для диагностики пыли в ITER предполагается использование специально разработанных электростатических зондов, задачей которых является сбор пыли и извлечение ее из установки для последующего анализа.

В работе была создана модель движения частиц пыли в электростатическом зонде. На основании анализа полученных траекторий предложены модификации электростатического зонда, улучшающие его эффективность.

Электростатический зонд и расчетная модель

Концепция электростатического зонда подробно описана в работе [1]. Основным элементом зонда является резервуар из тонкой листовой нержавеющей стали, передняя стенка которого представляет собой решетку (Рис 1). В процессе работы между зондом и стартовой пластиной, покрытой пылью, создается разность потенциалов, достаточная для того, чтобы пылевые частицы под действием электростатического поля преодолели силу тяжести и силы адгезии к поверхности, покинули стартовую

пластину и попали в резервуар зонда сквозь входную решетку. К верхней стороне решетки прикреплена отражательная пластина, которая ограничивает разлет частиц, отраженных от решетки в сторону от резервуара

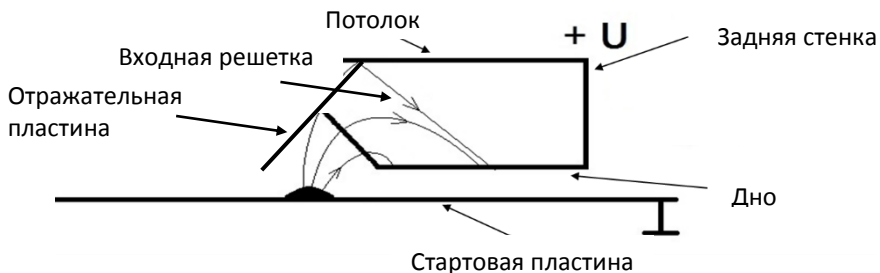


Рис 1. Схема работы электростатического зонда

Моделировались траектории движения частиц вольфрамовой пыли. Частицы пыли были разделены на четыре основные группы по форме и размерам, для каждой из которых использовались усредненные значения массы и заряда, приобретаемого в электростатическом поле между зондом и стартовой пластиной.

Для описания движения частиц и характера их взаимодействия со стенками зонда и стартовой пластиной были экспериментально определены такие параметры, как сила адгезии частиц к стартовой пластине и коэффициент энергетических потерь входе соударения со стенками. Также было численно получено угловое распределение рассеянных пылевых частиц различной формы при различных углах падения, была определена доля частиц, отражающихся зеркально, и доля частиц, отражающихся диффузно по закону косинуса Кнудсена.

Моделирование проводилось в универсальной среде численного моделирования Comsol. Comsol-модель состояла из двух блоков. В первом решалась стационарная задача расчета электрических полей, во втором рассчитывались траектории движения зарядившихся вольфрамовых частиц в электрическом поле, конфигурация которого получена в первом блоке.

Моделирование движения частиц и обсуждение результатов

Моделирование движения частиц в поле электростатического зонда показало, что часть частиц, которые уже попали в эквипотенциальное пространство зонда, из-за невысокого коэффициента энергетических потерь при соударении со стенками зонда после нескольких соударений вылетают обратно (рис.2). Для того чтобы уменьшить долю «сбежавших» частиц было предложено установить на внутренние стенки зонда решетки, состоящие из вертикальных ламелей, выполненных из тонких прямоугольных металлических пластин, расположенных параллельно друг другу в плоскостях, параллельных плоскости задней стенки резервуара зонда. Частица пыли попадает в зазор между соседними ламелями, теряет энергию в результате множественных соударений с ними, обладает недостаточной энергией, чтобы вылететь из резервуара, и в результате остается в зонде (рис 3).

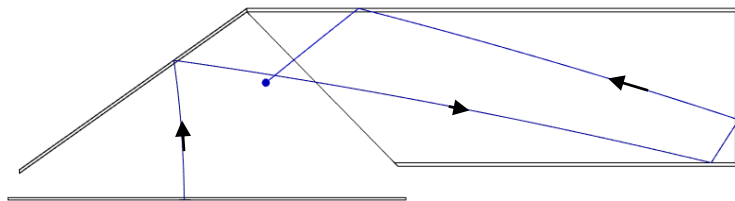


Рис 2. Траектория «убегающей» частицы

Моделирование движения частиц в резервуарах, с различными положениями решеток позволило определить их оптимальное местоположение и параметры. Так, если эффективность сбора зонда с гладкими стенками составляла 68%, для зонда с решеткой на дне- 72%, а для зонда с решетками на дне, на задней стенке и на потолке -73%. Наилучшая эффективность зонда с решетками достигается при высоте ламелей 1-1.5мм, толщине не более 0.1мм и расстоянии между ламелями менее 0.5 мм.

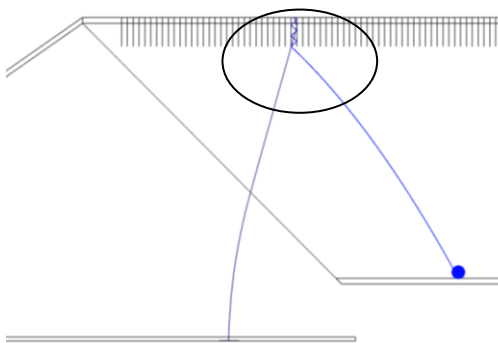


Рис 3. Частица, попавшая в зазор между ламелями

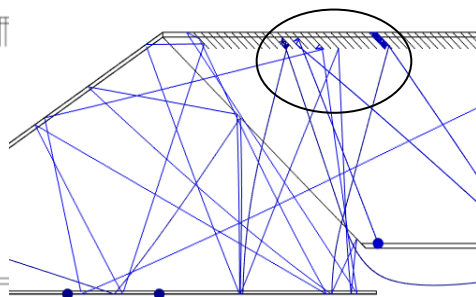


Рис 4. Частицы, вылетающие из зазора между наклоненными ламелями.

При анализе распределения захваченных частиц на дне зонда (конфигурация с вертикальной решеткой на дне и потолке зонда) было выявлено, что основная часть пылинок аккумулируется около входной решетки. При большом количестве собранной пыли это затруднит попадание новых частиц в резервуар, а также может приводить к высыпанию пыли из зонда при транспортировке.

Как видно на рис. 4, после вылета из решетки отклонение направления скорости частиц от угла наклона ламелей решетки лежит в небольшом угловом диапазоне. Поэтому для того, чтобы распределение захваченных частиц сместить в глубину зонда, а также уменьшить число частиц, вылетающих из зонда, было предложено на потолок зонда установить решетку, ламели которой наклонены в сторону задней стенки зонда. Моделирование подтвердило это предположение и позволило определить оптимальные параметры решетки (угол наклона ламелей, шаг, высота).

Моделирование показало, что установка на потолок резервуара решетки с ламелями, наклоненными в сторону задней стенки, а на дно решетки с вертикальными ламелями позволяет получить более равномерное распределения частиц в зонде, что обеспечит возможность накопить в зонде большее количество

частиц за один цикл работы, а также увеличивает эффективность зонда до 83%.

Заключение

С целью повышения эффективности сбора вольфрамовой пыли электростатическим зондом, который предполагается использовать среди прочих систем диагностики пыли в ITER, была создана его численная модель в расчётной среде COMSOL и получены траектории движения частиц в электрическом поле.

Анализ траекторий движения частиц пыли в зонде позволил определить наиболее эффективную конфигурацию электростатического зонда. Выявлено, что установка на потолок резервуара зонда решётки с ламелями, выполненными в виде тонких прямоугольных металлических пластин, расположенными перпендикулярно боковым стенкам резервуара и наклоненными в сторону задней стенки, а на дно такой же решетки с вертикальными ламелями позволяет получить более равномерное распределение собранных частиц по дну резервуара зонда, что обеспечит возможность накопить в зонде большее количество частиц за один цикл работы, а также увеличивает эффективность зонда до 83%.

Литература:

- [1] Begrambekov L.B., Voityuk A.N., Zakharov A.M. The development and the tests of the electrostatic probe for dust particle collection in thermonuclear reactors. // J. of Physics. Conference Series 741(1):012004 September 2016.
- [2] Begrambekov, L.B., Voityuk, A.N., Zakharov, A.M. et al. Phys. Atom. Nuclei (2017) 80: 1642.

**СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ НА
СОВРЕМЕННЫХ ТОКАМАКАХ**

Вуколов Константин Юрьевич

¹НИЦ «Курчатовский Институт», Россия, 123182 Москва, пл.
Курчатова 1

²Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана, Россия, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

Доклад посвящен обзору современного состояния спектральной диагностики плазмы. Спектроскопия является одним из наиболее востребованных инструментов для изучения плазмы и используется практически на каждом токамаке. Описаны задачи и методы спектроскопии в видимой области как наиболее широко применяемой для измерений на практике. Спектроскопия используется для получения первой плазмы, для отладки требуемых режимов плазменного разряда, для управления разрядом и для физических исследований широкого круга задач. В спектральных диагностиках применяются как пассивные, так и активные методы. Рассмотрено построение пассивной и активной спектроскопии плазмы в видимой области на токамаках Т-10, JET и ИТЭР, обсуждаются проблемы и их решения. Проведен сравнительный анализ возможностей диагностических систем, их достоинств и недостатков.

Системы для пассивной спектроскопии достаточно просты в разработке и создании, особенно если речь идет о качественных (относительных) измерениях. Пассивные спектральные диагностики регистрируют излучение плазмы вдоль хорды наблюдения и могут решать такие классические задачи как:

измерение интенсивности линий изотопов водорода (получение информации о рециклинге водорода), оценки плотности и потоков атомов водорода, измерение интенсивности линий примесей (в частности, для получения информации о транспорте бериллия и вольфрама). В свободной от линий области спектра (обычно – в районе 523 нм) проводятся абсолютные измерения тормозного излучения для определения среднего по объему эффективного заряда плазмы как индикатора общего уровня содержания примесей в плазме.

Активная спектроскопия (Charge Exchange Recombination Spectroscopy - CXRS) – это диагностика, которая анализирует результаты взаимодействия плазмы с пучком атомов водорода с энергией более 10 кэВ, инжектируемого в плазму. Большая энергия атомов в пучке необходима для их проникновения вглубь плотной плазмы. Для решения проблем фоновой засветки используют модуляцию пучка с частотой от 10 до 100 Гц. Диагностика основана на регистрации излучения возбужденных частиц, возникших за счет перезарядки ионов плазмы на атомах диагностического пучка в процессе взаимодействия. CXRS-диагностика позволяет провести локальные измерения плотности и температуры протонов и легких примесей на основе анализа спектра излучения, полученного от ионов (ядер), перезаряженных на атомах пучка. Такие измерения очень актуальны в термоядерной плазме, в которой частицы полностью ионизованы в центральной области шнура. Использование перезарядки – практически единственная возможность для их оптической диагностики. Аппаратура, требующаяся для реализации CXRS-диагностики – сложная и дорогостоящая, но это плата за возможность получения данных о плазме с высокой точностью и хорошим пространственным разрешением.

В заключении кратко рассмотрены планы использования спектроскопии на токамаке Т-15 и ИТЭР.

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДА В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА

А.В. Горбунов¹, К.Ю. Вуколов¹, Е.Е. Мухин², С.Ю. Толстяков²,
Г.С. Курскиев², В.С. Лисица¹, Н.А. Бабинов², М.Г. Левашова¹,
М.А. Мелькумов³, А.П. Чернаков², Д.Д. Криворучко⁴,
А.В. Скрылев⁴

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 123182, пл. Академика
Курчатова, 1

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, ул.
Политехническая, 26

³НЦВО РАН, Москва, 119333, ул. Вавилова, 38к5

⁴МФТИ (ГУ), г. Долгопрудный, 141701, Институтский пер., 9

Методы лазерной спектроскопии широко применяются для диагностики плазмы токамаков и стеллараторов [1,2,3]. Основное преимущество зондирования плазмы лазером заключается в локализации области измерения, что особенно актуально для установок с диверторной конфигурацией магнитного поля. Используемые методы локальной диагностики концентрации атомов водорода: резонансная лазерная флуоресценция [4,5] и фотоионизация [6,7] – в основном из-за сложности технической реализации так и не получили широкое распространение и применяются эпизодически при исследовании физики плазмы.

Представленная в работе диагностика лазерного индуцированного тушения [8,9,10] для измерения концентрации атомов водорода объединяет преимущества лазерной флуоресценции и фотоионизации. Метод основан на эффекте частичного уменьшения светимости линии $H\alpha$ (656,3 нм, переход $n = 3 \rightarrow 2$) за счёт возбуждения лазерным излучением на одной из спектральных линий пашеновской серии. Лазерная накачка на переходе $n = 3 \rightarrow n_{Ur}$ (где $n_{Ur} \geq 4$) уменьшает населённость на

$n = 3$ группе уровней, одновременно увеличивая её на n_{Up} . Регистрируя амплитуду сигнала тушения можно рассчитать локальную концентрацию атомов водорода с помощью столкновительно-излучательной модели. В том случае, если лазерное возбуждение идёт на линии 1875,1 нм (переход $n = 3 \rightarrow 4$), одновременно с тушением линии $H\alpha$, также можно наблюдать флуоресценцию на линии $H\beta$ (486,1 нм).

С помощью столкновительно-излучательной модели выполнены расчёты сигналов тушения для диапазона n_e и T_e диверторной и SOL плазмы токамака для разных спектральных линий лазерной накачки. Расчёты показывают, что для насыщения сигнала тушения при накачке на переходе $n = 3 \rightarrow 4$ (1875,1 нм) требуется минимальная мощность лазерного излучения ($P_{Sat} < 10 \text{ Вт/см}^2$) по сравнению с остальными линиями пашеновской серии. Низкий порог насыщения позволяет перейти от импульсных лазеров со сравнительно высокой пиковой мощностью ($P_l \sim 1 \text{ МВт}$) к использованию модулированных во времени квазинепрерывных лазеров с мощностью $P_l < 100 \text{ Вт}$. Такой подход значительно увеличивает точность измерения за счёт возможности большего усреднения сигнала по лазерным импульсам.

В первых экспериментах на токамаке по лазерному индуцированному тушению линии $H\alpha$ использовался импульсный 100 Гц лазер на основе оптического параметрического генератора [9]. Эксперименты подтвердили возможность реализации диагностики в условиях токамака, а амплитуда регистрируемых сигналов хорошо соотносилась с расчётной, полученной из столкновительно-излучательной модели атома водорода.

Перестраиваемый в диапазоне 1873-1877 нм тулиевый волоконный лазер с частотой генерации импульсов 0,5-2 МГц и пиковой мощностью до 5 Вт позволил экспериментально проверить методику измерения модулированным во времени источником излучения. После тестирования на водородной газоразрядной лампе, лазер был установлен на токамаке Глобус-М2. Первые результаты экспериментов с новым лазером получены в омических

разрядах при лазерном зондировании SOL плазмы в экваториальном сечении около центрального столба.

В докладе представлена методика диагностики атомов водорода на основе тушения линии $H\alpha$, приведены результаты численного моделирования сигналов и ожидаемых ошибок измерения $n_a(H)$ для условий диверторной плазмы ИТЭР. Значительная часть работы содержит результаты проведенных на токамаке экспериментов, в том числе сравнение двух подходов: использование импульсного и модулированного во времени лазера. Заканчивается доклад планами работ по дальнейшему развитию диагностики.

Литература.

- [1]. P. Bogen et al., J. Nucl. Mater., 1982, 111&112, 75-80
- [2]. N.J. Peacock et al., Nature, 1969, 224, 488-490
- [3]. Q. Xiao et al., J. Nucl. Mater., 2015, 463, 911-914
- [4]. G. Razdobarin et al., Nucl. Fusion, 1979, 19, 1439
- [5]. T. Kubach et al., 31st EPS Conference on Plasma Phys., ECA 28G, P-4.138 (2004)
- [6]. V. Gladushchak, Nucl. Fusion, 1995, 35, 1385
- [7]. M. Kantor, JINST, 2012, 7, C02017
- [8]. A. Gorbunov et al., Fusion Eng. Des., 2017, 123, pp. 695-698
- [9]. E. Mukhin et al., Nucl. Fusion, 2019, 59, 086052
- [10]. A. Gorbunov et al., Fusion Eng. Des., 2019, doi:10.1016/j.fusengdes.2019.04.091

СХRS-ДИАГНОСТИКА ТОКАМАКА Т-15МД

В.А. Крупин¹, Л.А. Ключников¹, И.А. Земцов¹, А.Р. Немец¹, М.Р. Нургалиев¹, С.Н. Тугаринов¹, Н.Н. Науменко², Н.В. Ступишин³, А.А. Иванов³

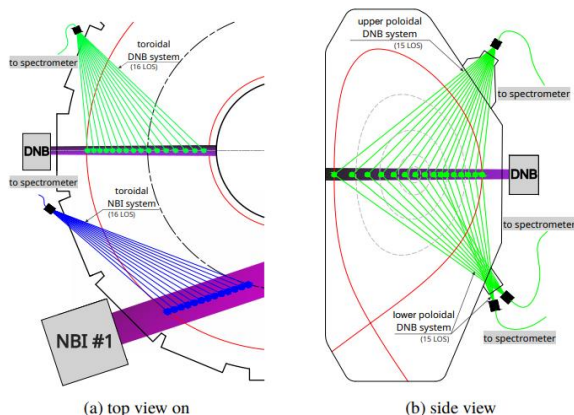
¹НИЦ «Курчатовский институт»б Kluchnikov_la@nrcki.ru

²ИФ НАН РБ, Минск, Республика Беларусь

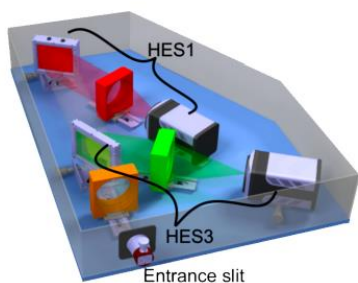
³Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН

В 2020 году в НИЦ «Курчатовский институт» будет запущен модернизированный токамак Т-15МД со следующими параметрами: $R = 1,5$ м, $a = 0,67$ м, $k = 1,8$, $I_{pl} \leq 2$ МА, $V_t \leq 2$ Т, длительность разряда ≤ 10 с, $P_{aux} \leq 24$ МВт. Для этой установки была разработана современная СХRS-диагностика (Charge eXchange Recombination Spectroscopy), которая может работать как на специально изготовленном диагностическом инжекторе ДИНА-КИ60 с энергией атомов 60 кэВ, так и на нагревных нейтральных инжекторах с энергией 80 кэВ. СХRS-диагностика обеспечивает измерения локальных значений следующих параметров плазмы с высоким пространственным (≈ 1 см) и временным (≈ 1 мс) разрешением: ионная температура (T_i), плотность ядер дейтерия и легких примесей (n_z), скорости полоидального и тороидального вращения (V_{pol} , V_{tor}), а также плотность и энергия быстрых ионов.

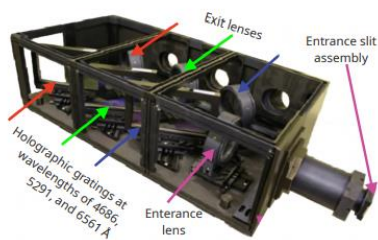
Диагностический инжектор ДИНА-КИ60, созданный в институте ядерной физики имени Г.И. Будкера, основан на дуговом плазменном источнике и обеспечивает формирование пучка нейтралов шириной около 6см с малой угловой расходимостью (0.6°) и преобладанием основной энергетической компоненты $E_0=60$ кэВ на уровне 90% от общего тока атомов пучка. Инжектор может работать в импульсном режиме со скважностью от 1:10 до 1:1 при стандартной длительности импульсов на уровне 1 - 5 мс в течение всего разряда установки Т-15МД.



Системы сбора света для регистрации CXRS-излучения в тороидальном и полоидальном направлениях содержат по 30 хорд наблюдения, обеспечивая пространственное разрешение до 1 см. Хорды наблюдения расположены так чтобы минимизировать возможное влияние паразитного света с внутренней стенки камеры. Световое излучение, индуцированное прохождением пучка через плазму, передаётся по многоканальным оптоволоконным коллекторам в пультовую спектроскопической диагностики. В составе диагностики будут применяться хорошо зарекомендовавшие себя на Т-10 светосильные спектрометры HES (high etendue spectrometer), два из которых объединены в единую сборку, что обеспечивает высокую точность измерения профилей концентраций примесей.



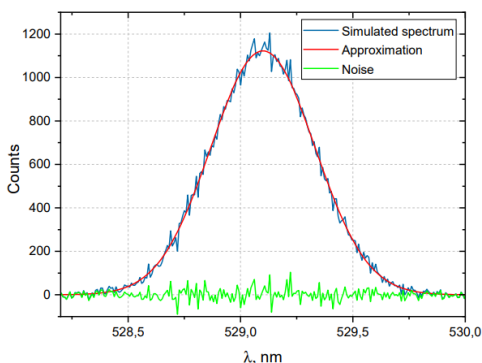
(a) HES13



(b) three-slot spectrometer

Кроме того будет задействован трёхсекционный спектрометр разработанный специально для CXRS измерений на установке ИТЭР. В спектрометре используются 3 голографические дифракционные решётки, каждая из которых выделяет свет в диапазоне $\pm 100 \text{ \AA}$ от заданной CXRS линии, например – линии углерода C5+ 5291 \AA . В качестве детекторов будут задействованы CCD камеры PIXIS1300B (матрица 1340×1300 , 20 мкм пиксель, 2 МГц, 16 бит) а также EMCCD камеры PhotonMAX 512B с матрицей 512×512 и пикселями 16 мкм, скорость считывания 10 МГц, оцифровка 16 бит.

Для оценки точности измерений было проведено моделирование CXRS спектров линии углерода 5291 \AA . При моделировании в омическом разряде с $B_t = 2 \text{ Тл}$, $I_{pl} = 2 \text{ МА}$ и $Z_{eff} \approx 3$, учитывалось ослабление пучка в плазме, эффективность сбора света и оцифровки сигнала детектором. Промоделированный спектр обрабатывался стандартными программами для определения величин T_i , n_z и скорости вращения. В результате было получено что относительная ошибка измерений температуры и концентрации составит около 0.5%, а скорости вращения будут измеряться с точностью $\pm 0.1-0.3 \text{ км/с}$.



Таким образом CXRS диагностика на установке Т-15МД обеспечит проведение современных актуальных научных исследований в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00100. Моделирование спектров выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №19-12-00312).

СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ В МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ

В.М. Градов, А.М. Зимин, В.И. Тройнов, С.В. Серушкин

*Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, E-mail:
zimin@power.bmstu.ru*

В докладе представлены методики и результаты экспериментального исследования магнетронных разрядов с электро- и постоянными магнитами спектральными методами по эмиссионному излучению аргоновой плазмы. Для исследований магнетронной распылительной системы (МРС) с электромагнитами использовался диагностический комплекс, позволяющий осуществлять автоматическую регистрацию спектра излучения плазмы из различных областей разряда, а также его компьютерную обработку и анализ (рис. 1). Методика спектральной диагностики основана на регистрации спектров при двухкоординатном перемещении оптической головки с системой кольцевых диафрагм в плоскости, перпендикулярной оси МРС, что позволяет исключить запыление элементов оптической системы [1].

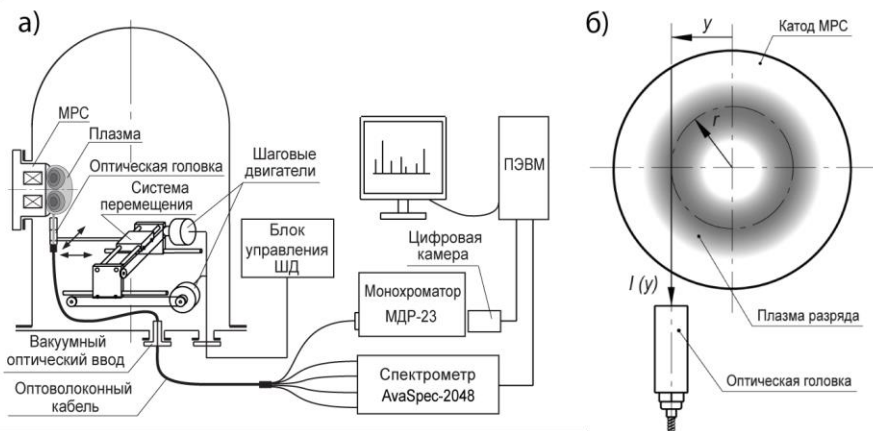


Рис. 1. Автоматизированный диагностический комплекс (а) и схема регистрации излучения (б)

Исследования плазмы разряда проводились при давлении газа в камере 2...4 Па, напряжении разряда 300...350 В, токе разряда 0,45...1,5 А, индукции магнитного поля у поверхности катода – 0,03 Тл.

Однако пространственное разрешение (~ 1 мм) при использовании указанной методики оказалось недостаточным для исследования разряда в планарном магнетроне с постоянными магнитами с большей плотностью тока и существенно меньшими размерами кольцевого плазменного образования.

Для увеличения разрешающей способности спектральный измерительный комплекс дополнен набором интерференционных светофильтров. С их помощью из линейчатого спектра разряда выделяются отдельно стоящие яркие спектральные линии, эмитированные из различных областей разряда. Для регистрации излучения плазмы, прошедшего сквозь интерференционные фильтры, использована камера с CMOS-матрицей. Выбор подходящих спектральных линий и соответствующих им светофильтров проведен на основе анализа спектра, полученного с помощью спектрометра AvaSpec-2048. Разработана методика обработки цифровых данных, получаемых из первичных гауф-файлов спектральных изображений разряда.

С учетом цилиндрической симметрии разряда с помощью преобразования Абеля выполнен переход от зафиксированных матрицей камеры хордовых интенсивностей излучения к радиальным распределениям излучательной способности $\varepsilon(r)$ для различных расстояний z от поверхности катода. Показанное на рис. 2 пространственное распределение этой величины иллюстрирует ее существенную зависимость (а, следовательно, и параметров плазмы) от координат. После калибровки приемника излучения с помощью эталонного источника проведен количественный анализ результатов.

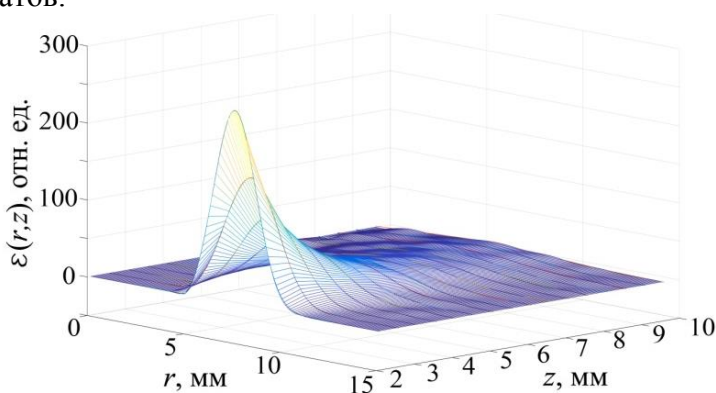


Рис. 2. Пространственное распределение излучательной способности плазмы осесимметричного магнетронного разряда с постоянными магнитами на длине волны 706,7 нм (Ar I). Давление аргона - 2 Па, материал катода - мишени – Cu. Напряжение разряда - 400 В, ток - 0,14 А

Методика определения температуры T_e и концентрации электронов не в разряде с постоянными магнитами в общем случае основана на предположении об отсутствии равновесного распределения заселенностей энергетических уровней плазмообразующего газа. В результате для некоторых режимов получены пространственные распределения T_e и n_e , значения которых отличаются от соответствующих равновесных величин.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-21039.

Литература.

- [1]. *V.M. GRADOV, A.M. ZIMIN, S.E. KRIVITSKY ET AL. PLASMA PHYSICS REPORTS. 2012. VOL. 38. № 13. P. 1099–1104.*

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ МНОГОКАНАЛЬНОГО СПЕКТРОМЕТРА-ПОЛИХРОМАТОРА ПО ДЛИНАМ ВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭТАЛОНА ФАБРИ-ПЕРО

Мионов А.Ю., Серов В.В., Серов С.В., Тугаринов С.Н.,
Шабашов А.Ю., Ярцев В.П.

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

Диагностика «Активная спектроскопия» разрабатывается в рамках проекта ИТЭР и обеспечивает регистрацию спектров излучения синхронно с работой диагностического пучка и последующий расчёт физических параметров.

Специально для диагностики «Активная спектроскопия» на ИТЭР был разработан трёхдиапазонный спектрометр-полихроматор высокого разрешения. Одновременно с высоким спектральным разрешением, спектрометр-полихроматор обладает высокой светосилой и имеет три выходных канала. Центры рабочих спектральных диапазонов этих каналов лежат в районе следующих длин волн: 468, 530 и 656 нм. Это позволяет проводить регистрацию линий излучения из плазмы, находящихся в трёх спектральных диапазонах.

CXRS диагностика позволяет измерять скорость вращения плазмы по доплеровскому сдвигу спектральной линии, возникающей за счет перезарядки атомов диагностического пучка на ионах плазмы. Согласно требованиям ИТЭР [4], эта скорость должна определяться с точностью 5 км/с. А это значит, что спектрометр необходимо прокалибровать по длинам волн с точностью 0,01 нм. К сожалению, такой точности не удаётся достичь во всем рабочем спектральном диапазоне при использовании газоразрядных ламп (например, неоновой или дейтериевой), которые обычно применяются для калибровки по длинам волн. Это связано с тем, что в исследуемом диапазоне длин волн спектр лампы содержит недостаточное количество линий и они расположены слишком редко и неравномерно.

В данном докладе рассматривается методика калибровки по длинам волн, позволяющая решить упомянутые выше проблемы. Для этого в дополнение к спектру газоразрядной лампы используется интерференционная картина, сформированная эталоном Фабри-Перо. При правильном выборе параметров эталона Фабри-Перо, пики интерференционной картины, созданной эталоном, будут равномерно заполнять необходимый диапазон длин волн. Описывается алгоритм проведения этой калибровки, а также метод обработки экспериментальных данных, полученных в ходе калибровки.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

Литература

- [1]. Тугаринов С. Н. и др. // Физика плазмы, 2004, т. 30, № 2, р. 147—154.
- [2]. Зайдель А. Н. и др. // Техника и практика спектроскопии, изд-во «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М., 1972.
- [3]. Тугаринов С. Н. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 1. с. 102—107.
- [4]. Donné A. J. H. et al. // Nucl. Fusion, 2007, 47, p. S343

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА УСТАНОВКЕ ГДЛ

Е.А. Пурьга², С.В. Иваненко², А.Н. Квашнин², А.Д. Хильченко², П.
В. Зубарев^{1,2}, Д. В. Моисеев²

¹ Новосибирский государственный технический университет,
Россия, 630092, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20

² 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

Рассеяние электромагнитного излучения на электронах (томсоновское рассеяние) наиболее распространённый метод для определения параметров плазмы на большинстве термоядерных установок. Существующий диагностический комплекс томсоновского рассеяния на установке ГДЛ Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия) измеряет плотность или температуру электронной компоненты плазмы только в один момент времени в одной точке пространства. Измерение радиальных профилей температуры и плотности плазмы производится в серии воспроизводимых рабочих импульсов путем настройки оптико-механической системы томсоновского рассеяния на различные точки вдоль радиуса плазмы в разных выстрелах. Данное свойство этой системы существенно усложняет проведение экспериментальных исследований. В связи с этим было принято решение о модернизации данного комплекса, который позволит фиксировать динамику радиальных профилей электронной температуры и плотности плазмы в каждом рабочем импульсе.

Диагностический комплекс в настоящее время находится в финальной стадии тестирования. Источником излучения является лазер Nd:YAG работающий в импульсно-периодическом режиме работы с частотой 10 Гц на длине волны 1064 нм, с энергией в импульсе 1.7 Дж и длительностью 10 нс. Оптическая система сбора света рассчитана на измерение температуры и плотности электронов в шести точках в плазме, расположенных вдоль лазерного пучка. Система регистрации оптических сигналов рассеяния имеет модульную структуру, где одной пространственной точке соответствует отдельный спектрометр. Каждый спектрометр построен на основе интерференционных фильтров и включает в себя шесть спектральных каналов регистрации. В качестве детекторов излучения используются лавинные фотодиоды в комбинации с токовыми усилителями. Для фиксации сигналов рассеяния с детекторов используется 16-канальный регистратор, обеспечивающий регистрацию как высокочастотных (ВЧ) компонент сигналов, так и низкочастотных(НЧ).

Этот регистратор построен на основе SCA технологии и позволяет фиксировать ВЧ компоненты сигналов рассеяния с частотой ~ 4.9 ГГц, и амплитудным разрешением 14 бит и НЧ компоненты с частотой дискретизации 25 МГц и амплитудным разрешением 14 бит. SCA технология – это масштабно-временное преобразование формы импульсных сигналов, в рамках которого производится фиксация текущих амплитудных значений сигналов в аналоговой форме большим количеством элементарных ячеек выборки и хранения. Эти значения в дальнейшем считываются и преобразуются в цифровой эквивалент с помощью АЦП мегагерцового диапазона. Усложняет использование этого метода необходимость проведения трудоемких калибровочных процедур, связанных с большой апертурной неопределенности выборочных значений сигнала, разбросом напряжений смещений нуля и коэффициентов передачи элементарных ячеек, обеспечивающих фиксацию сигнала. Для их проведения используется программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) со встроенным микропроцессором Cyclone V.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №17-79-10200.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ, ТРАНСПОРТА И ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ В ЧИСТЯЩЕМ ВЧ-РАЗРЯДЕ ИТЭР

Н. А. Бабинов^{1,2}, Л. А. Варшавчик^{1,2}, П. А. Затылкин^{1,2},
А. М. Дмитриев^{1,2}, Е. Е. Мухин¹, А. Г. Раздобарин¹,
Д. С. Самсонов¹, А. А. Чиронova²

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

²*ЗАО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург*

Одной из важнейших задач обеспечения длительной работоспособности оптических диагностик в термоядерных установках следующего поколения, таких как ИТЭР, является защита внутривакуумных оптических элементов от воздействия внешней среды, прежде всего, от загрязнения продуктами эрозии первой стенки. Для защиты первых зеркал оптических диагностик ИТЭР предусматривается система чистки ВЧ-разрядом, инициируемым подаваемым на зеркало ВЧ-напряжением [1, 2].

Система чистки должна обеспечивать удаление продуктов эрозии со всей рабочей поверхности зеркала при минимальном воздействии на отражающую поверхность [3]. Для этого необходимо обеспечить высокую селективность (отношение скоростей распыления загрязнения и материала зеркала) и достаточную равномерность распыления. Критически важным является отсутствие «мертвых зон», в которых в процессе чистки загрязнение не удаляется ввиду доминирования переосаждения (вещества, распыленного с соседних участков зеркала или окружающих конструкций) над распылением. В связи с этим, для разработки эффективной системы чистки оптических элементов ИТЭР необходимо моделирование распыления, транспорта и осаждения частиц в чистящем ВЧ-разряде.

В работе представлен Монте-Карло код KTe, разработанный для расчета этих процессах в условиях ИТЭР. Для обеспечения требуемой точности расчета и предсказательных возможностей моделирования при разработке кода использовались следующие основные подходы:

- использование реалистичной модели взаимодействия частиц в газе, включающей притяжение и отталкивание. Это позволяет корректно описать изменение полных и дифференциальных сечений упругого рассеяния в широком диапазоне энергий от нескольких эВ (энергии распыленных частиц) до тепловой энергии газа;

- прямой учет тепловой скорости движения частиц газа, что позволяет описать термализацию частиц, покидающих поверхность и их дальнейшее квазидиффузионное распространение;

- учет процессов взаимодействия частиц с поверхностью (отражения, распыления) на базе расчетов в приближении бинарных столкновений. При этом учитывается зависимость процесса от энергии и угла к нормали, как падающей, так и покидающей поверхность частицы, что необходимо при малых энергиях частиц;

- трехмерное моделирование в произвольной геометрии, загружаемой из CAD-файла;

- высокая производительность и возможность параллельного исполнения, что позволяет отследить траекторию 107-109 частиц для сбора достаточной статистики;

- возможность импорта внешних данных (распределение потока частиц на поверхности, параметров плазмы в объеме) из сторонних расчетов или эксперимента.

Корректность использованных в коде подходов подтверждается хорошим совпадением с экспериментами по распылению и осаждению золота в атмосфере неона [4], проведенными на экспериментальном оборудовании ФТИ им. А. Ф. Иоффе, а также с экспериментом по напылению продуктов эрозии алюминиевой мишени на установке Magnum-PSI.

В работе представлены результаты валидации кода, а также расчеты осаждения примеси в узле первого зеркала диагностики ИК-термографии ИТЭР.

Литература

- [1] A Litnovsky et al // 2019 Nuclear Fus., V. 59, I. 6, № 066029, DOI: 10.1088/1741-4326/ab1446
- [2] A G Razdobarin et al // 2015 Nuclear Fus., V. 55, I. 9, № 093022, DOI: 10.1088/0029-5515/55/9/093022
- [3] A M Dmitriev et al // 2017 Phys. Scr., V. 170, № 014072, DOI: 10.1088/1402-4896/aa95e5
- [4] L. Varshavchik et al, Three-dimensional simulation of neutral transport in gases and weakly ionized plasmas, submitted for publication in Plasma Physics and Controlled Fusion

УЗЕЛ ПЕРВОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ ИТЭР: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

А.М.Дмитриев^{1,2}, Н.А.Бабинов^{1,2}, Д.С.Самсонов¹, А.Г.Раздобарин¹,
И.М.Букреев¹, Л.А.Варшавчик¹, П.А.Затылкин^{1,2}, Г.С.Курскиеv¹,
С.В.Масюкевич¹, Е.Е.Мухин¹, В.А.Сенниченков¹, С.Ю.Толстяков¹,
И.Б.Терещенко¹, Ал.П.Чернаков^{1,2}, Ан.П. Чернаков², П.В.
Чернаков², L. Moser³, R. Reichle³, M. Walsh³, П.А. Шигин³

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

²ЗАО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург

³Международная Организация ИТЭР, Кадараш, Франция

Более двадцати оптических диагностик токамака ИТЭР имеют внутри-вакуумные компоненты и нуждаются в разработке способов чистки от напыленных на оптические поверхности продуктов эрозии первой вакуумной стенки [1]. В первую очередь это относится к диагностическим зеркалам и окнам, расположенным в непосредственной близости от плазмы токамака. Поверхности диагностических зеркал будут подвержены осаждению пленок, состоящих преимущественно из Ве с примесями O, N, D, W, а также их соединений [2,3]. Для восстановления оптических характеристик первых зеркал предполагается использовать систему плазменной чистки, в которой очищаемое зеркало играет роль одного из электродов.

Система очистки должна обеспечивать возможность удаления металлических и диэлектрических пленочных осадений с поверхности зеркальной оптики внутри вакуумной камеры токамака ИТЭР за время не превышающее время, отведенное для данной процедуры [4]. При этом чистка не должна приводить к деградации поверхности зеркал и значительному падению коэффициента отражения. Система чистки должна эффективно работать, как в отсутствие магнитного поля, так и в условиях

высокого магнитного поля, направленного под произвольным углом к поверхности зеркала, обеспечивая однородное удаление примеси с поверхности.

В качестве основного инструмента для реализации системы очистки, интегрированной в узел первого диагностического зеркала в ИТЭР, на сегодняшний день рассматривается высокочастотный емкостной (ВЧЕ) разряд в благородном газе. Предполагается, что очищаемое зеркало в такой системе играет роль нагруженного электрода. Ионы, ускоренные в приэлектродном слое ВЧЕ разряда, бомбардируют поверхность зеркала, приводя к травлению осаждений, в основном за счет эффекта физического распыления.

Многие диагностические зеркала будут подвержены нагреву за счет интенсивного нейтронного и гамма излучения термоядерной плазмы [5, 6]. Для предотвращения деформации поверхности зеркал, обусловленных температурными градиентами, планируется оборудовать их системой водяного охлаждения. Для совмещения системы охлаждения зеркала с системой ВЧ чистки предложено выполнять трубки водяного охлаждения по принципу коаксиального четвертьволнового короткозамкнутого фильтра [7], имеющего бесконечный импеданс и не влияющего на S-параметры зеркала, как элемента ВЧ тракта.

В работе представлены результаты экспериментального исследования поведения параметров ВЧЕ разряда в условиях, близких к условиям ИТЭР. Исследование основных характеристик разряда и их зависимостей от геометрических параметров, типа газа и давления проводились на круглом зеркале с электрической моделью четвертьволновой линии, выполненной из гибкого коаксиального кабеля [8]. На основании полученных данных был разработан и протестирован макет узла первого зеркала диагностики edge CXRS с активной системой охлаждения [9]. Исследована неоднородность распыления металлических пленок с поверхности прямоугольного зеркала для схемы с заземленным и изолированным ВЧ электродом. Исследовано влияние внешнего магнитного поля на неоднородности травления [10].

Основываясь на результатах данной работы, сформулированы требования к единому подходу к разработке узла первого зеркала для токамака ИТЭР.

Литература.

- [1] A. Litnovsky et al., *Development of in situ cleaning techniques for diagnostic mirrors in ITER*, Fusion Eng. Des. 86 1780 (2011)
- [2] D. Ivanova et al., *An overview of the comprehensive First Mirror Test in JET with ITER-like wall*, PhysicaScripta 2014(T159):014011
- [3] M. Rubel et al., *Overview of the second stage in the comprehensive mirrors test in JET*, Phys. Scr. T145 (2011) 014070
- [4] P. Shigin et al., *RF discharge mirror cleaning system development for ITER diagnostics* to be published in Fusion Eng. Des.
- [5] E.E. Mukhin et al., *First mirrors in ITER: material choice and deposition prevention/cleaning techniques*, Nucl. Fusion 52 (2012) 013017
- [6] M. Joanny et al., *Achievements on Engineering and Manufacturing of ITER First-Mirror Mock-ups*, IEEE Trans. Plasma Sci. 40 (2012) 692
- [7] F. Leipold et al., *Cleaning of first mirrors in ITER by means of radio frequency discharges*, Rev. Sci. Instrum. 87 (2016) 11D439
- [8] A.M. Dmitriev et al., *In-situ plasma cleaning of ITER diagnostic mirrors in noble-gas RF discharge*, Phys. Scr. T170 (2017) 014072
- [9] A.M. Dmitriev et al., *RF plasma cleaning of water-cooled mirror equipped with notch filter based on shorted $\lambda/4$ line*, Fusion Eng. Des. 146PA (2019) 1390
- [10] A.G. Razdobarin et al., *RF discharge for in situ mirror surface recovery in ITER*, Nucl. Fusion 55 (2015) 093022

СТАТУС РЕАЛИЗАЦИИ УЗЛА ПЕРВЫХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ ITER

Д.С. Самсонов¹, А.М. Дмитриев^{1,2}, Н.А. Бабинов^{1,2}, А.Г. Раздобарин¹, С.В. Масюкевич¹, Е.Е. Мухин¹, Д.В. Терентьев³, Г.В. Маринин³, А.А. Камшилин⁴, Д.Е. Алфимов⁵, А.В. Веретенников⁵, L. Moser⁶, R. Reichle⁶, M. Walsh⁶, П.А. Шигин⁶

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург,

²ЗАО «Спектрал-Тех», г. Санкт-Петербург

³ООО «РУССКИЕ ТЕХНОЛОГИИ», г. Санкт-Петербург,

⁴ООО «ИЦ «РАДИОТЕЛЕФОН», г. Воронеж,

⁵ООО «НПО «ГКМП», г. Брянск

⁶Международная Организация ИТЭР, Кадараш, Франция

При создании ИТЭР особое внимание уделяется работоспособности диагностических систем в условиях продолжительной эксплуатации без обслуживания. Для диагностик, имеющих в составе внутривакуумные оптические элементы, одной из основных проблем является интенсивное осаждение распыленных материалов первой стенки (Ве, W) и других окружающих конструкций. Обеспечение надежной работы таких диагностик требует разработки методов защиты и очистки без вскрытия вакуумного объема. На сегодняшний день, МО ИТЭР в качестве основного способа очистки оптических элементов в токамаке рассматривает использование емкостного высокочастотного (ВЧ) разряда [1, 2], где очищаемое зеркало играет роль нагруженного электрода. Емкостный ВЧ разряд является источником ионов, которые, ускоряясь в приэлектродном слое, распыляют вещество с обрабатываемых поверхностей. Первые диагностические зеркала будут подвержены нагреву до высоких температур за счет интенсивного нейтронного и гамма-излучения термоядерной плазмы [1, 3]. Для предотвращения

деформаций поверхности первых зеркал, вызванных температурными градиентами, требуется оборудовать их системой охлаждения [4].

В работе представлен системный подход к разработке узла первых зеркал (УПЗ) оптических диагностик ИТЭР. Разработана эскизная конструкция УПЗ для одной из диагностических систем, снабженная системой охлаждения и очистки от осадений с применением ВЧ емкостного разряда. Конструкция УПЗ состоит из несущего корпуса и двух сборок зеркал, закрепленных на нем. На корпусе предусмотрены интерфейсные панели для крепления в диагностическом модуле ИТЭР, а также место для установки электрического разъема и защитной шторки с приводом. Предполагается, что установка УПЗ и соединение разъема будут осуществляться за одну операцию дистанционного манипулятора. Каждая сборка зеркала включает в себя охлаждаемый водой оптический элемент, служащий одновременно ВЧ электродом, схему предварительного согласования и измерения ВЧ мощности, а также режекторный фильтр, обеспечивающий ВЧ-развязку охлаждаемого электрода от корпуса. Схемы распределения ВЧ мощности выполнены на планарных элементах с использованием AlN в качестве подложки. Режекторный фильтр реализован в виде четвертьволнового короткозамкнутого отрезка коаксиальной линии с сечением сложной формы, в которой внутренним проводником являются трубки охлаждения зеркала.

Исследования коаксиальных кабелей с минеральной изоляцией и нормированным волновым сопротивлением (двух – производства Thermosoax с диэлектриком из SiO₂ с наружными диаметрами оболочки 3 и 6 мм, а также кабеля производства завода «Кирскабель» с диэлектриком из MgO и наружным диаметром 5 мм) показали, что с их помощью на частоте 81,36 МГц при предельно допустимой температуре внешней оболочки не более 350 °С и коэффициенте стоячей волны по напряжению нагрузки не хуже 3 возможно подвести к нагрузке, находящейся на удалении 5 м от вакуумной стенки, предельную мощность около 150, 650 и 200 Вт соответственно.

В настоящее время в качестве основной рассматривается схема разряда с электродом, заземленным по постоянному току и отвязанным от заземления по ВЧ с помощью режекторного фильтра [2]. Такой подход позволяет существенно упростить конструкцию крепления зеркала и повысить его надежность. При этом из-за отсутствия постоянного автосмещения на зеркале, энергия ионов, достаточная для травления Ве, достигается при плотности мощности $\sim 3 \text{ Вт/см}^2$ [5], что существенно больше по сравнению с $\sim 1 \text{ Вт/см}^2$ в случае изолированного электрода.

Исследования ВЧ-разряда с модуляцией питания на частотах 1...10 кГц показали возможность снижения средней вкладываемой мощности в 3...5 раз при сохранении скорости очистки. При этом для данной геометрии и условий разряда существуют оптимальные частота и скважность модуляции, при которых достигается максимальная скорость очистки. Подбор оптимального режима требуется проводить для каждого случая индивидуально.

Предлагаемый унифицированный подход к разработке УПЗ для ИТЭР предполагает оптимизацию разработанной конструкции на основе прочностных расчетов, численного расчета транспорта загрязняющего вещества и параметров ВЧ разряда, а также с учетом требований оптической схемы. В докладе представлено описание конструкции полномасштабного макета УПЗ и его предварительных испытаний. Дальнейшие экспериментальные исследования макета УПЗ предполагается производить с использованием стенда, моделирующего условия диагностических каналов ИТЭР (габариты исследуемых объектов до 800x800x800 мм, магнитное поле до 3 Тл, предельный вакуум до 10⁻⁵ Па), подготовка которого в настоящее время ведется в ФТИ.

Литература.

- [1] E.E. Mukhin et al., First mirrors in ITER: material choice and deposition prevention/cleaning techniques, Nucl. Fusion, 2012, 52 013017
- [2] F. Leipold, et al Cleaning of first mirrors in ITER by means of radio frequency discharges, Review of Scientific Instruments, 87, no. 11, 11D439. doi.org/10.1063/1.4962055

- [3] A. Litnovsky et al., Development of in situ cleaning techniques for diagnostic mirrors in ITER, Fusion Eng. Des. 2011 86 1780
- [4] M. Joanny et al., Achievements on Engineering and Manufacturing of ITER First-Mirror Mock-ups IEEE Trans. Plasma Sci. 2012, 40, 692
- [5] A.M. Dmitriev et al., RF plasma cleaning of water-cooled mirror equipped with notch filter based on shorted $\lambda/4$ line Fusion Eng. Des. 2019, 146 Part A 1390
doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.02.090

МАКЕТИРОВАНИЕ УЗЛА ВХОДНОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СВЛ В ИТЭР

И.И. Орловский^{1,2}, А.Г. Алексеев^{1,2}, Д.К. Вуколов^{1,2}

¹НИИЦ «Курчатовский Институт», 123182 Москва, пл. Ак.
Курчатова 1, Orlovskiy_I@nrcki.ru

²УТС-Центр, 123182 Москва, пл. Ак. Курчатова 1

Диагностика «Спектроскопия водородных линий» (СВЛ) в ИТЭР включает три оптических канала, расположенных в экваториальных портах ЭП11 и ЭП12 и построенных на одной оптической схеме [1]. Излучение из плазмы через конусообразные вырезы в защите первой стенки поступает в узкий зрачок узла входного зеркала (УВЗ), который с помощью пары молибденовых зеркал (сферического и плоского) преобразует сходящийся световой пучок в квазипараллельный и транслирует его далее внутрь порт-плага на перископическую систему, передающую свет на вакуумное окно. Корпус УВЗ также изготавливается из молибдена, что обеспечивает оптическую стабильность при нагреве свыше 400°C. Помимо зеркал, в УВЗ устанавливаются система очистки зеркал (СОЗ), основанная на тлеющем разряде в сеточном катоде, а также система защитной шторки, перекрывающей зрачок во режиме кондиционирования камеры установки для защиты зеркал от осаждения примесей, распыленных с первой стенки [2].

Макетирование такого ключевого элемента, как УВЗ, критично необходимо для успешной и своевременной поставки диагностики СВЛ на ИТЭР. Начавшись еще на стадии концептуальной проработки 10 лет назад, в настоящее время оно подошло к изготовлению полномасштабного массогабаритного макета, включающего все системы и материалы, предполагаемые для использования в ИТЭР. Большинство технических задач были

решены ранее, и теперь настала очередь оптимизации производственных процессов и проверки конструкторских решений на технологичность и экономичность. Данный доклад представляет краткий обзор таких проблем, а также методов их решения.

УВЗ текущего дизайна включает в себя около 630 деталей, изготавливаемых из недешевых и нестандартных для обычных металлообрабатывающих предприятий материалов, таких как молибден, инконель, нитрид алюминия и др., причем 65% деталей имеют индивидуальный дизайн. В результате заказы на изготовление деталей надо распределять среди нескольких предприятий, при этом объем заказа в натуральном выражении становится небольшим, а удельная стоимость каждой детали растет. Еще одним фактором, существенно влияющим на стоимость УВЗ, является необходимость закупки сырья в очень небольшом количестве. Например, стоимость молибденовых заготовок марки TZM для одного макета УВЗ всего на 15% меньше стоимости молибдена, достаточного для изготовления двух макетов.

Поскольку УВЗ разрабатывался в отрыве от производства, то следующей проблемой стало отсутствие экспертизы КД со стороны инженеров-технологов, как это происходит на металлургических и металлообрабатывающих предприятиях. В некоторых случаях габариты деталей превышали размеры стандартных заготовок, а увеличение габарита заготовки даже на 1 мм приводил к кратному увеличению стоимости заказа. Зачастую допуски, устанавливаемые на чертежах деталей, могли быть заметно увеличены без ухудшения эксплуатационных характеристик, при этом стоимость их изготовления существенно уменьшалась.

На этапе макетирования был решен и ряд технологических вопросов. В частности, увеличение коэффициента серости молибденовых деталей, необходимое для эффективного охлаждения УВЗ [3], было решено производить с помощью сверления глухих отверстий. Этот метод на практике оказался более технологичным, чем фрезерование канавок. Еще одной

неожиданностью стала вынужденная замена технологии лазерной резки, предполагавшейся для изготовления сеточного катода СОЗ, на технологию гидроабразивной резки. Тестовая перфорация тонких молибденовых листов лазером вызвала их коробление, существенно превышающее конструктивные допуски.

Последним пунктом доклада стало описание процесса квалификации горячего изостатического прессования (ГИП), применяющегося для изготовления зеркал УВЗ. Зеркала имеют трехслойную конструкцию: верхняя пластина из монокристаллического молибдена толщиной от 3 до 14 мм с помощью ГИП крепится к основанию из поликристаллического Мо через прослойку Ti фольги толщиной 0,1 мм. Многочисленные эксперименты продемонстрировали устойчивость таких зеркал не только к нагреву до эксплуатационных температур ИТЭР [4], но и к физическому распылению поверхности потоками высокоэнергетических нейтральных частиц из плазмы [5, 6]. Показано, что процесс квалификации требует разработки и предварительного согласования с МО ИТЭР большого объема документации (описание процесса, спецификации материалов, программы тестирования и пр.) и на практике занимает более года, поэтому разработчикам диагностик крайне желательно начинать его заблаговременно.

Литература.

- [1] A.V. Gorshkov, A.G. Alekseev, E.N. Andreenko et al. Testing of the optical chain mockup of H-alpha and Visible Spectroscopy for ITER, Fusion Engineering and Design, 2018 (in press)
- [2] A. Rogov, Yu. Kapustin, A. Alekseev, Application of penning discharge for cleaning mirrors in optical diagnostics of the ITER, Instruments and Experimental Techniques, 2015, Vol. 58, Issue 1, pp 161-166
- [3] Andrey Alekseev, Evgeny Andreenko, Ilya Orlovskiy et al, A study of methods to enhance infrared emissivity of Molybdenum surfaces, Fusion Engineering and Design, 2018 (in press).

- [4] Ilya Orlovskiy, Andrey Alekseev, Evgeniy Andreenko et al, Testing of sandwich molybdenum mirrors with radiative cooling for H-alpha and visible spectroscopy in ITER, Fusion Engineering and Design, 123 (2017) 1011-1014
- [5] A. Litnovsky et al, Progress in research and development of mirrors for ITER diagnostics, Nuclear Fusion, 2009, Vol. 49, 075014
- [6] A.F. Bardamid et al, The test of Mo and W mirrors under the long-term bombardment by ions of deuterium plasma, Plasma Devices and Operation, Vol. 12, Iss. 3, 2004

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ДИАГНОСТИКИ ЛАЗЕРНОЙ ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР

Е.Е. Мухин¹, А.В. Горбунов², Н.А. Бабинов¹, А.С. Кукушкин^{2,3},
С.Ю. Толстяков¹, Г.С. Курскиев¹, Ал.П. Чернаков¹, К.Ю. Вуколов²,
В.С. Лисица², М.Г. Левашова², Е.Б. Берик⁴, М.А. Мелькумов⁵,
Д.Д. Криворучко⁶, А.В. Скрылев⁶, А.Н. Мокеев⁷

*1*ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021,
ул.Политехническая, 26

*2*НИЦ "Курчатовский институт", Москва, 123182, пл Академика
Курчатова 1

*3*НИЯУ МИФИ, Москва, 115409, Каширское шоссе 31,

*4*ESTLA Ltd., Tartu, 51014, Riia 185, Estonia

*5*НЦВО РАН, Москва, 119333, ул.Вавилова, 38, к 5

*6*МФТИ Московская обл., 141701, г. Долгопрудный, Институтский
пер., 9

*7*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, 123182, пл
Академика Курчатова 1

Диагностика диверторного томсоновского рассеяния (DTS) и лазерной индуцированной флуоресценции (LIF) – лазерные диагностики, обеспечивающие измерение параметров плазмы в наружной “ноге” дивертора ИТЭР. Если диагностика томсоновского рассеяния, использующая рассеяние лазерного излучения на свободных электронах, – стандартная для современных токамаков, то в диагностике LIF используется линейчатое излучение соответствующее переходам между энергетическими состояниями атомов или ионов. Основными задачами диагностики LIF в диверторе ИТЭР на данном этапе являются: измерение ионной температуры (T_i), с использованием доплеровского уширенного излучения водородо-подобного иона HeII, и атомарной и ионной концентрации гелия (n_{HeI} , n_{HeII}) [1,2]. Так как спектральные линии видимого диапазона, соответствуют

переходам между возбужденными уровнями, измерение атомной (ионной) концентрации основано на использовании столкновительно-излучательной модели (CRM), определяющей соответствие между полной концентрацией и населенностью возбужденных состояний. В CRM расчетах используются данные по T_e и n_e измеряемые диагностикой DTS. Дополнительным преимуществом совмещения диагностик DTS и LIF является возможность проводить абсолютную калибровку пропускания оптической системы сбора, используя зависимость временной формы сигнала флуоресценции HeI от n_e , T_e . LIF может измерять n_e в диапазоне 10^{18} - 10^{20} м⁻³ с использованием анализа длительности и временной формы флуоресцентных сигналов опираясь на данные CRM для HeI и известной T_e .

Недавно нами предложено применение диагностики LIF также для измерения плотности основной компоненты (H/D/T) (см. [3, 4]) с использованием новой разновидности LIF – лазерного индуцированного тушения (LIQ), основанного на гашении излучения Da накачкой перехода между уровнем $n = 3$ и одним из вышележащих уровней. Таким образом, комбинированная диагностика DTS / LIF / LIQ обеспечит одновременное измерение электронных, ионных и атомных параметров (T_e , n_e , T_i , n_i и $n_{He/H/D/T}$) локализованных в 24 пространственных точках вдоль лазерного пучка и примерно вдоль магнитных поверхностей с пространственным разрешением порядка 25 мм. Набор плазменных параметров, измеряемых совмещенной диагностикой DTS / LIF / LIQ, незаменим при изучении режима “detachment”. В режиме “detachment” плазменные потоки на входе в дивертор (свободное течение) должны замедляться, переходя к диффузионному режиму распространения; охлаждаться до температуры ниже 1 эВ и рекомбинировать. Эффективная объемная рекомбинация возможна при температуре ниже 1 эВ. В отсутствие рекомбинации, каждый из ионов изотопов водорода, достигая диверторных пластин, будет передавать им, кроме кинетической энергии, также энергию рекомбинации 13,6 эВ.

Предложенная диагностика позволит определить скоростные параметры основных процессов, включая скорости

ионизации, рекомбинации и излучательных переходов, которые играют важную роль в охлаждении плазменных потоков, рекомбинации и скоростях ион-нейтральных столкновений. Ион-нейтральные столкновения, будучи не вовлеченными напрямую в ослабление потоков плазмы на диверторные пластины, участвуют в решении трех важных задач:

(1) управлять распределением давления плазмы вдоль диверторной “ноги”, за счет ион-нейтральных столкновений, влияние которых особенно сильно в области определяемой рециклингом с диверторных пластин;

(2) охлаждать плазму от нескольких эВ до ~ 1 эВ (в области где процессы радиационного охлаждения работают не эффективно) и инициировать процессы рекомбинации;

(3) трансформировать потоковый режим плазмы на входе в дивертор в диффузионный режим за счет сил трения, увеличивая вероятность рекомбинации, за счет увеличения времени взаимодействия электронной и ионной компоненты [5].

Все три явления: замедление, охлаждение и рекомбинация – необходимы для эффективного уменьшения тепловой нагрузки на диверторные пластины.

Одновременное измерение T_e , n_e , T_i , n_i , $n_{He/H/D/T}$ позволит рассчитать следующие параметры в диверторе ИТЭР:

- Ионизационный баланс: скорости ионизации и рекомбинации (T_e , n_e , T_i , n_i , $n_{He/H/D/T}$);
- Интенсивность излучения (T_e , n_e , n_i , $n_{He/H/D/T}$);
- Силы трения плазменного потока при взаимодействии с нейтральной компонентой (T_i , n_i , T_0 , $n_{He/H/D/T}$);
- Профиль давления в диверторной ноге (T_e , n_e , T_i , n_i).

Литература.

- [1] Gorbunov A. et al Laser-induced fluorescence for ITER divertor plasma Fus. Eng. Design 2017 123 695
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.05.129>
- [2] Gorbunov A. et al Laser-induced fluorescence helium ions in ITER divertor Fus. Eng. Design 2019 May
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.04.091>

- [3] Mukhin E et al Integration of Thomson scattering and laser-induced fluorescence in ITER divertor Nucl. Fusion 2019 59 #086052 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1cd5>
- [4] Горбунов А. и др., Лазерная спектроскопия водорода в плазме токамака, ДВП 2019
- [5] Krasheninnikov S. and Kukushkin A. REVIEW Physics of ultimate detachment of a tokamak divertor plasma J. Plasma Phys. 2017 83 1. <https://doi.org/10.1017/S0022377817000654>

ОДНОКАНАЛЬНЫЙ МАКЕТ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ НА БАЗЕ sCMOS КАМЕРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Нагорный Н.В., Лопатко В.Б., Тугаринов С.Н., Серов С.В.,
Миронов А.Ю., Миронова Е.Ю., Портоне С.С.

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

Диагностика Активная спектроскопия разрабатывается в рамках проекта ИТЭР и обеспечивает регистрацию спектров излучения синхронно с работой диагностического пучка и последующий расчёт физических параметров.

Свет, порожденный плазмой при взаимодействии с диагностическим пучком, собирается оптическим коллектором (системой зеркал, оптики, световодов) и регистрируется спектрометрами с высокой разрешающей способностью. Каждый спектрометр содержит три дифракционные решётки, с помощью которых из светового сигнала выделяются три спектральных диапазона. На выходе каждого из трех каналов спектрометра строится два либо четыре профиля излучения плазмы в соответствующем спектральном интервале.

Сбор спектров излучения со спектрометров осуществляется с помощью sCMOS камер во время импульсов плазмы синхронно с работой диагностического пучка (3 секунды работы с последующей паузой в 20 секунд).

Поиск sCMOS камеры, удовлетворяющей требованиям диагностики Активная Спектроскопия, является сложной задачей из-за отсутствия готовых решений на рынке. Научная высокопроизводительная компактная камера XIMEA CB042MG-GP-BSI с сенсором Scientific sCMOS Gpixel GSENSE2020 BSI, оборудованная скоростным интерфейсом PCI Express Gen2 X4,

была представлена в 2018 году в виде инженерного образца и имеет характеристики, близкие к необходимым.

В докладе описывается одноканальный макет системы регистрации диагностики Активная Спектроскопия и его программное обеспечение. Макет создавался для управления параметрами камеры (экспозиция, разрядность пиксела и др.) и определения их предельных значений, проверки возможности получения заданного количества кадров в течении выбранного временного интервала, проверки функции представления изображения, получаемого с матрицы в виде двух либо четырёх строк (после операции биннинга), а также графического представления полученных спектров и построения временного хода интенсивности спектральных линий.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

4-Х КАДРОВЫЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ РЕГИСТРАТОР ПОВЫШЕННОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Д.С. Корниенко, Д.Н. Литвин, А.Г. Кравченко, В.В. Мисько, В.М. Тараканов

Российский федеральный ядерный центр ВНИИЭФ 607190, г. Саров, Нижегородской обл., kravchenko@otd13.vniief.ru

Для совершенствования фотохронографических методов регистрации [1,2], используемых на лазерных установках, разработан новый кадровый регистратор повышенного временного и пространственного разрешения. Прибор имеет следующие характеристики:

- Диапазон спектральной чувствительности, нм – от 400 до 900;
- Количество кадров за один цикл регистрации – 4;
- Пространственное разрешение (при поле зрения 3мм), мкм – 20;
- Время регистрации, мкс – от 0,4 до 500;
- Длительность экспозиции кадра, мкс – от 0,05 до 16;
- Частота кадров, МГц – до 10;
- Регулируемая задержка запуска, мкс – от 0.2 до 150;
- Внутренний коэффициент усиления – от 1 до 1000;
- Динамический диапазон линейной регистрации– 2000;

Регистратор прошел успешную апробацию в модельных экспериментах и в экспериментах на лазерной установке.

Литература.

- [1] Л. А. Душина, Д. С. Корниенко, А. Г. Кравченко и др. «Многокадровый оптический фотохронограф микросекундного диапазона СЭР-7 и методики регистрации быстропротекающих процессов на его основе». Сборник докладов 13 научно-технической конференции «Молодежь в науке». Саров 2015г. с.187-193.
- [2] Д. С. Корниенко, А. Г. Кравченко, Д. Н. Литвин, В. В. Мисько, А. Н. Рукавишников, А. В. Сеник, К. В. Стародубцев, В. М. Тараканов, А. Е. Чаунин. «Фотохронографические регистраторы для лазерного термоядерного синтеза». Приборы и Техника Эксперимента, 2014, № 2, с.78–89.

Корпускулярные методы диагностики

ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕРЖАНИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ В КОМПАКТНОМ ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ НЕЙТРОНОВ

В.А. Корнев, Г.И. Абдуллина, Л.Г. Аскинази, А.А. Белокуров, С.В. Лебедев, Д.В. Разуменко, А.С. Тукачинский, Н.А. Жубр

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук, 194021, Политехническая 26, Санкт-Петербург,
РФ, Vladimir.Kornev@mail.ioffe.ru*

Основными задачами, решаемыми в исследованиях по магнитному удержанию плазмы, являются обеспечение равновесия и устойчивости плазмы, ее нагрев, удержание энергии и частиц. Однако, как показывают расчеты и эксперименты, нагреть плазму в токамаке до температуры зажигания термоядерной реакции (~ 20 кэВ) с помощью исключительно омического нагрева невозможно. В связи с этим, одной из центральных проблем физики систем с магнитным удержанием является оптимизация дополнительного нагрева плазмы. Инжекционный нагрев плазмы будет основным и в сооружаемом в настоящее время экспериментальном токамаке-реакторе ИТЭР[1]. Одним из наиболее информативных методов изучения захвата, удержания и

дальнейшего торможения быстрых частиц инжектируемого пучка в плазме является нейтронная диагностика. Источником нейтронов в термоядерных установках являются термоядерные реакции, в которых одним из продуктов являются нейтроны МэВ диапазона энергий. Обсуждаемые в последнее время проекты сооружения компактных термоядерных источников нейтронов для гибридных «синтез-деление» реакторов дополнительно усилили интерес к изучению закономерностей поведения потоков нейтронов в токамаке[2].

Работа была выполнена на токамаке ТУМАН-3М[3]. В экспериментах изучались основные закономерности удержания быстрых ионов с помощью исследования зависимости потока нейтронов от ряда инженерных параметров установки, параметров плазмы и инжектируемого пучка. С этой целью были проведены измерения интегрального нейтронного выхода, образующегося при инжекции атомарного дейтериевого пучка в дейтериевую плазму, а также времени спада нейтронного потока после выключения инжекции, позволяющего оценить эффективность удержания быстрых ионов и их время жизни при различных параметрах плазмы и пучка. Измерение интенсивности нейтронного потока проводилось с помощью нейтронных детекторов, состоящих из ^3He -газоразрядного счетчиков и полиэтиленовых замедлителей, в которых нейтроны с энергией 2,45 МэВ тормозятся до тепловых энергий. Данный тип детектора позволяет регистрировать нейтроны с энергией от 1 до 10 МэВ.

Были проведены численные исследования удержания быстрых ионов при инжекции пучка в плазму компактного токамака с целью оптимизации условий экспериментов. На основании полученных расчетных данных были оптимизированы параметры плазмы-мишени и магнитной конфигурации для обеспечения наиболее эффективного захвата пучка в плазме. С помощью моделирования было показано, что при максимальных параметрах разряда ($I_p = 180$ кА, $B_t = 1$ Тл) можно обеспечить эффективный захват инжектируемого пучка с энергией вплоть до $E_b = 25$ кэВ. Была определена минимальная плотность плазмы (2 –

$2.5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, при которой потери мощности пучка на пролет становятся пренебрежимо малыми.

В ходе экспериментов с помощью нейтронной диагностики было показано, что удержание быстрых ионов и их торможение в плазме зависят от таких параметров плазмы и нейтрального пучка как величина плазменного тока и тороидального магнитного поля, плотность и электронная температура плазмы, энергия быстрых ионов. Даны рекомендации по оптимизации параметров плазмы и инжектируемого пучка для получения максимального выхода нейтронного потока, которые могут быть применены не только в экспериментах на ТУМАНе-3М, но и на других термоядерных установках. В результате проведенных нейтронных измерений было показано, что торможение быстрых ионов в условиях компактного токамака проходит в соответствии с теорией кулоновских столкновений.

Описаны исследования влияния смещения плазменного шнура по большому радиусу на величину нейтронного выхода. Обнаружено, что смещение плазмы внутрь на 1 см приводит к 20%-ному увеличению нейтронного потока. Увеличение нейтронного потока происходит благодаря улучшению условий захвата быстрых частиц инжектируемого пучка, ослаблению торможения на электронах (из-за роста электронной температуры) и снижению содержания примесей.

На основании собранной базы экспериментальных данных был построен скейлинг (степенная зависимость) интегрального нейтронного потока R_n от плотности плазмы n_e , тороидального магнитного поля B_t , плазменного тока I_p , энергии инжектируемого пучка E_b и мощности инжекции P_b . В результате была получена следующая зависимость интегрального нейтронного потока от параметров эксперимента:

$R_n = 6.4 \cdot 10^5 \cdot n_e^{0.37 \pm 0.14} \cdot B_t^{1.33 \pm 0.33} \cdot I_p^{1.42 \pm 0.50} \cdot E_b^{2.52 \pm 0.17} \cdot P_b^{1.0 \pm 0.1}$ [4]. Построенная на базе экспериментальных данных нейтронных измерений на токамаке ТУМАН-3М эмпирическая зависимость (скейлинг) величины интегрального нейтронного потока от основных параметров установки, плазмы и инжектируемого пучка позволяет прогнозировать величину

нейтронного выхода при модернизации существующих компактных токамаков и при создании новых установок данного типа.

Эксперименты были поддержаны Российским Научным Фондом (проект #16-12-10285-П). Моделирование нейтронного потока было поддержано Институтом им. А.Ф. Иоффе.

Литература.

- [1]. Ikeda K. Progress in the ITER Physics Basis // Nucl. Fusion – 2007. - V. 27 - P.S1-S414.
- [2]. Peng Y.-K.M., Cheng E.T. Magnetic fusion driven transmutation and power production in fusion reactor // Fusion Technol. - 1996. - V.30 - P.1654.
- [3]. Воробьев Г.М., Голант В.Е., Горностаев С.В. и др. Эксперименты по омическому нагреву и сжатию плазмы на токамаке ТУМАН-3М // Физика Плазмы - 1983. – т. 9 - вып. 1 - С 105.
- [4]. V.A. Kornev, L.G. Askinazi, A.A. Belokurov, et al. Study of neutron generation in the compact tokamak TUMAN-3M in support of a tokamak-based fusion neutron source // Nucl. Fusion **57** (2017) 126005 (6pp).

ДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ ГОМОЭПИТАКСИАЛЬНОЙ АЛМАЗНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ АЛМАЗНОГО СПЕКТРОМЕТРА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Артемьев К.К.¹, Родионов Н. Б.¹, Мещанинов С.А.², Амосов В.Н.²,
Родионова В.П.¹

¹Частное учреждение «ИТЭР-Центр», *k.artemev@iterrf.ru*
²АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», *mesh@trinititi.ru*

Диагностика потока нейтральных атомов является важным источником информации о ионах в плазме токамака [1]. Одним из перспективных материалов для чувствительных элементов детекторов является синтетический алмаз, благодаря таким его свойствам как высокие чувствительность к регистрации частиц, радиационная стойкость и температуропроводность. Диагностика потоков атомов детектором на основе синтетического алмаза проводилась на токамаке JET [2-3]. В работах [4,5] предложен детектор для избирательной регистрации частиц и ионов на основе тонкого гомоэпитаксиального слоя синтетического алмаза. Для регистрации частиц термоядерной плазмы такой детектор имеет ряд преимуществ. Плазма термоядерного реактора — это источник смешанных радиационных полей, поэтому при ее диагностике существует необходимость избирательной регистрации частиц. Например, при выходе потока частиц из плазмы, детектор будет регистрировать также нейтронное и γ -излучения. Вклад фонового нейтронного и гамма-излучения в сигнал детектора частиц можно существенно снизить за счет использования тонкой гомоэпитаксиальной пленки с толщиной равной длине пробега частиц в алмазе. Длины пробега атомов и ионов в алмазе МэВ диапазона энергий не превышают двух-трех десятков мкм. Например, пробег альфа-частиц в алмазе с энергией 5 МэВ

составляет всего 13 мкм, в то же время регистрация нейтронов и гамма излучения пропорциональна объему кристалла. Важно отметить, что при таких толщинах алмазной пленки снижаются требования к качеству электронного материала, а радиационная стойкость детекторов на порядок выше, чем для образцов толщиной 500 мкм [6]. Кроме того, чувствительный элемент алмаза имеет миниатюрные габаритные размеры.

В данной работе изготовлены и протестированы макеты детекторов и ионов на основе гомоэпитаксиального слоя синтетического алмаза ((p-i) - структуры). (p-i) - структура представляет собой проводящую подложку из НРНТ алмаза р-типа легированную бором, на которую нанесена алмазная CVD-пленка типа Па (ФГБНУ «ТИСНУМ»). Для изготовления макетов (p-i) – структур использовались НРНТ подложки Вг40 (3.95 x 4 x 0.528 мм), Вг41 (4 x 4.07 x 0,522 мм), Вг42 (4,02 x 4 x 0,506 мм). Толщины выращенных CVD – Вг40 (50 мкм), Вг41 (50 мкм), Вг42 (63 мкм). На CVD пленку, через маску размером 2.1 x 2.1 мм, наносились платиновые контакты. Макет детектора монтировался в коаксиальный корпус с диаметром входного окна ~ 2 мм. В отличие от работ [4,5], где толщина CVD-пленки составляла 10 мкм и поэтому в ней поглощалась только часть энергии 5 МэВ альфа-частиц, в данной работе в CVD-пленке толщиной 50 мкм вся энергия альфа-частиц поглощается в теле детектора, при этом расширяется энергетический диапазон частиц, которые может регистрировать детектор.

В работе проведены измерения спектров поглощения гомоэпитаксиальных образцов УФ и видимого диапазона, исследована структура кристаллов на люминесцентном микроскопе. Выполнено тестирование на альфа-источнике, источниках ОСИКЭ и нейтронном генераторе. Определена чувствительность к нейтронам. Продемонстрирована высокая чувствительность к альфа излучению образцов детекторов. Средняя чувствительность к нейтронам образцов составляет $1 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$. Разрабатываемые детекторы ионизирующего излучения на основе тонких гомоэпитаксиальных пленок синтетического алмаза найдут

применения, также, в ядерной энергетике, радиационной медицине и др.

Работа выполнена в рамках реализации государственного контракта №Н.4а.241.19.18.1027 от 19 апреля 2018 г.

Литература.

- [1]. Афанасьев В.И. Исследование тепловых и сверхтепловых ионов по потокам атомов из плазмы крупных токамаков — Дисс. на соискание ученой степени д. ф.-м. н. — ФТИ им. Иоффе, Санкт-Петербург, 2010.
- [2]. Красильников В.А. Исследование особенностей функций распределения быстрых ионов плазмы токамака при ионно-циклотронном нагреве и инжекции нейтралов — Дисс. на соискание ученой степени к. ф.-м. н. — ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, 2013.
- [3]. Амосов В.Н., Красильников В.А., Скопинцев Д.А. и др. Система спектрометрии быстрых атомов на токамаке JET на базе алмазного детектора. Приборы и техника эксперимента, 2008, № 2, с. 108–112.
- [4]. Родионов Н.Б., Амосов В.Н., Артемьев К.К., и др. Детектор для избирательной регистрации частиц и ионов на основе эпитаксиального слоя синтетического алмаза. Атомная энергия, 2016, т.121, вып.2, стр. 98-103.
- [5]. Родионов Н.Б., Паль А.Ф., Большаков А.П. и др. Диодные алмазные структуры на основе гомоэпитаксиальных пленок. Радиотехника и электроника, 2018, т.63, №7, с.750-757.
- [6]. G. Verona Rinati. Radiation hard Diamond Detectors in Schottky diode configuration. *Diamond Detectors Development Work, 2018, Kadarash*

ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРОВ НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА АНЧ ИТЭР

Кормилицын Т.М., Обудовский С.Ю., Джурик А.С., Мещанинов
С.А., Ковалев А.О., Родионов Р.Н., Кашук Ю.А.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной
энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия, e-
mail: T.Kormilitsyn@iterrf.ru*

В данной работе представлены результаты разработки диагностики «Нейтронный спектрометр». Диагностика «Нейтронный спектрометр» (НС) является подсистемой диагностики «Анализатор нейтральных частиц» (АНЧ), использует её коллиматор и предназначена для определения параметров плазмы путем регистрации потока нейтронов с высоким временным и энергетическим разрешением. В числе параметров - ионная температура и относительная концентрация трития и дейтерия в плазме (топливное отношение). В диагностике НС используются детекторы нейтронов, основанные на кристаллах алмаза и стильбена [1]. По измерениям плотности потока нейтронов в зоне расположения детекторов НС и результатам расчёта транспорта нейтронов можно так же оценить величину плотности потока нейтронов в зоне расположения детекторов АНЧ.

В ходе подготовки предварительного проекта НС проведёны эксперименты по облучению прототипов детекторов потоком нейтронов с энергиями ~ 14 МэВ, а также калибровочные измерения с использованием источников $^{241}\text{Am-Be}$ и ^{22}Na . В работе представлено сравнение экспериментальных данных и рассчитанных с помощью ПО GEANT4 [2] функций отклика стильбенового и алмазного детекторов.

Полученные функции отклика позволяют рассчитывать загрузку измерительного тракта в различных режимах работы

ИТЭР, дают возможность восстанавливать исходный энергетический спектр нейтронов и оценивать погрешность определения параметров плазмы.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

Литература.

- [1]. КОВАЛЕВ А.О., И ДР. – ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ ДИАГНОСТИКИ «НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР» АНАЛИЗАТОРА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ТОКАМАКА-РЕАКТОРА ИТЭР – XLVI МЕЖДУНАРОДНАЯ (ЗВЕНИГОРОДСКАЯ) КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И УТС, 18 – 22 МАРТА 2019 Г.
- [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.

ПРИМЕНИМОСТЬ КАЛИБРОВКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ФОТОХРОНОГРАФА НА СТАТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКАХ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ К АБСОЛЮТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ С ПИКОСЕКУНДНЫМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Мунтян А.Н., Петров С.И.

*Российский федеральный ядерный центр ВНИИЭФ, 607190, г.
Саров, Нижегородская обл., Россия, e-mail:
kravchenko@otd13.vniief.ru*

подавляющая часть экспериментов, проводимых на установке «Искра-5», проводится при облучении составных мишеней, в которых сначала лазерное излучение конвертируется в боксах конверторах в рентгеновское, которое и облучает исследуемую мишень [1]. В таких мишенях для изучения динамики происходящих процессов требуется проводить измерения абсолютных потоков рентгеновского излучения с временным и пространственным разрешением. На установке «Искра-5» такие измерения проводятся на рентгеновских фотохронографах РФР-4 [2]. Разработана методика абсолютной калибровки фотохронографа на статическом излучении рентгеновских трубок стенда «РЭС» [3]. Характерное время экспозиции при калибровке составляет ~1 сек, в экспериментах измерения ведутся с временным разрешением ~20-50 пс, т.е. величины потоков излучения в эксперименте на 10-12 порядков превышают потоки при калибровке.

Для проверки того, что статической калибровкой можно пользоваться при измерениях в динамике, было проведено сравнение величин сигналов зарегистрированных в одном эксперименте на фотохронографе и абсолютно калиброванной

фотопленке УФ-4. В первом случае измерения проводились в спектральном канале шириной $h\nu/dh\nu \sim 5$ в области К-окна углерода ($h\nu \sim 0.265$ кэВ) вырезаемом зеркалом скользящего падения и краевым фильтром [4], во втором проводилась регистрация линейчатого излучения гелиеподобного Fe (линия $He_{\alpha} \approx 6.7$ кэВ). Развертка в спектр осуществлялась при помощи спектрографов калиброванных на линии K_{α} Co (6,93 кэВ) вогнутых кристаллах кварца и выпуклом кристалле слюды [5].

В пределах погрешностей измерений результаты измерения потоков квантов из мишени совпали по всем каналам регистрации в обоих случаях. Таким образом, показано, что, по меньшей мере, в пределах погрешности измерений $\pm 25\%$ результаты статической калибровки применимы к измерениям в опытах.

Литература.

- [1]. Ф.М. Абзаев, С.А. Бельков, А.В. Бессараб и др., ЖЭТФ, 1998, том 114, вып. 6(12), стр.1993-2003.
- [2]. В.П. Лазарчук, Д.Н. Литвин, Д.Н. А.Г. Кравченко и др., ПТЭ, 2004, том 7, №2, стр.128-133.
- [3]. В.П. Лазарчук, Д.Н. Литвин Д.Н., А.Г. Кравченко и др., ПТЭ, 2004, том 47, №2, стр.133-138.
- [4]. В.П. Лазарчук, В.М. Муругов, С.И. Петров, А.В. Сенник. Физика плазмы, 1994, том.20, №1, стр.101-106.
- [5]. В.П. Лазарчук, А.Н. Мунтян, В.М. Муругов и др., ПТЭ, 2006, том 49, №2, стр.121-127.

РАДИАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДМНП ПРИ РАСПОЛОЖЕНИИ ПОД ДИВЕРТОРОНОЙ КАССЕТОЙ ИТЭР

Портнов Д.В., Ковалев А.О., Кумпилов Д.А., Родионов Р.Н.,
Высоких Ю.Г., Кашук Ю.А., Обудовский С.Ю.

Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

Диагностика Диверторный Монитор Нейтронных Поток (ДМНП) [1] предназначена для измерения полного нейтронного выхода и выделяемой термоядерной мощности. Основным отличием ДМНП от других нейтронных диагностик на установке ИТЭР является расположение ее детекторов. Они расположены максимально близко к плазме, что дает возможно провести калибровку ДМНП *in-situ* с помощью нейтронного генератора [2] перемещаемого внутри камеры токамака.

Первоначально планировалось разместить детекторы на опоре диверторной кассеты, так что между детекторами и плазмой оказывалась только крыша дивертора (dome), а некоторые участки плазмы оказывались практически в прямой видимости от детекторов. Такое расположение потребовало сложных конструктивных решений. Во-первых, необходимо охлаждать детекторы и, соответственно, обеспечить мощным потоком воды. Во-вторых, необходимо экранировать детекторы, использующие ^{238}U , от нейтронов нижних энергий с помощью карбида бора, поскольку в противном случае, в этих детекторах будет наработан плутоний в количестве достаточным для того, чтобы полностью исказить показания этих детекторов. Такой экран также является мощным источником тепла и требует еще больше охлаждения.

Данная конструкция вызвала нарекания со стороны разработчиков вакуумной системы ИТЭР. Для разрешения конфликта, было принято решение перенести детекторы ДМНП

ниже – на дно вакуумной камеры. В этом положении тепловые и нейтронные нагрузки на порядок ниже, что дает возможность отказаться от охлаждения. Кроме того, оказывается что потоки в области нижних энергий уменьшаются еще больше – почти на два порядка. Это дает возможность отказаться и от борного экрана на детекторах с ^{238}U . Конструкция становится значительно проще, а снижение потоков нейтронов компенсируется увеличением массы чувствительного вещества в детекторах. В работе выполнен анализ необходимых коррекций в разрабатываемой диагностике.

В работе были использованы расчеты MCNP [3], а также расчет активации и наработки плутония с помощью FISPACT[4].

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

Литература.

- [1]. DESIGN DESCRIPTION DOCUMENT ON 55.BC.00 DNFМ SYSTEM, ITER_D_47LJLH
- [2]. КИРЬЯНОВ Г.И. «ГЕНЕРАТОРЫ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ». М. ИЗДАТЕЛЬСТВО ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1990 Г., 223 С.
- [3]. MCNP USER'S MANUAL CODE VERSION 6.2, LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY REPORT LA-UR-1729981
- [4]. M. FLEMMING, ET AL, THE FISPACT-II USER MANUAL, UKAEA-R(18)001 ISSUE JANUARY 2018

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НГ-24М

Родионов Р.Н., Ковалев А.О., Кормилицын Т.М., Кашук Ю.А.,
Обудовский С.Ю. Портнов Д.В.

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

Нейтронные генераторы широко используются в различных областях науки и техники в качестве источников быстрых нейтронов. Их применяют для нейтронного каротажа скважин, в аналитических приложениях для нейтронно-активационного анализа, в системах безопасности. Одним из перспективных направлений является калибровка нейтронных диагностик на термоядерных установках. Чтобы обеспечить высокую точность калибровки необходимо точно знать спектральный состав нейтронов и иметь адекватную численную модель нейтронного источника.

В качестве источника нейтронов в НГ-24М используется запаянная нейтронная трубка, внутри которой расположена секция ускорения ионов, источник ионов Пеннинга, тритиевая мишень, система наполнения и хранения дейтерий-тритиевой смеси [1]. Ионный пучок имеет сложный состав – в нем присутствуют как атомарные, так и молекулярные ионы: D^+ , D_2^+ , T^+ , T_2^+ , DT^+ . Это приводит к тому, что налетающие ядра дейтерия имеют различную энергию при входе в мишень, а также, помимо $d+t$ реакции протекает $t+d$ реакция. Все это приводит к расщеплению спектра генерируемых нейтронов.

В данной работе проведено численное моделирование углового и энергетического распределения нейтронов для нейтронного генератора НГ-24М. Модель учитывает дифференциальные сечения $d-t$ реакции, а также торможение

налетающих ионов в мишени нейтронного генератора. Исследовано влияние профиля распределения ядер дейтерия и трития в титановой мишени на угловые и энергетические распределения нейтронов.

Проведено измерение спектров нейтронов алмазным спектрометром под различными углами по отношению к оси нейтронного генератора для двух ускоряющих напряжений – 130 и 200 кВ. По измеренным данным подобран состав компонент ионного пучка, минимизирующий отклонение экспериментальных спектров от численно смоделированных. По результатам расчетов сконструирован источник нейтронов для MCNP модели нейтронного генератора НГ-24М.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

Литература.

- [1]. *КИРЬЯНОВ Г.И. «ГЕНЕРАТОРЫ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ». М. ИЗДАТЕЛЬСТВО ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1990 Г., 223 С.*

АКТИВАЦИЯ БЛОКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДИАГНОСТИКИ ИТЭР «ДИВЕРТОРНЫЙ МОНИТОР НЕЙТРОННОГО ПОТОКА» НА РЕАКТОРЕ ИБР-2

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

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

Диагностика «Диверторный Монитор Нейтронного Потoka» (ДМНП) предназначена для измерения полного нейтронного выхода и определения термоядерной мощности токамака-реактора ИТЭР. Чувствительными элементами диагностики служат ионизационные камеры деления на основе изотопов урана 235 и 238 [1].

На базе Лаборатории Нейтронной Физики им. И.М. Франка ОИЯИ, г. Дубна, проведён эксперимент по испытанию блока детектирования ДМНП совместно с системой регистрации на исследовательском реакторе ИБР-2. Цель эксперимента – подтвердить характеристики диагностики в широком диапазоне мощности полей нейтронного и гамма-излучения.

В данной работе представлены результаты расчёта активации материалов блока детектирования в условиях проведённого эксперимента [2]. Получено пространственно-временное распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения при помощи разработанной программной системы r2s-rfda, реализующей методику расчёта rigorous-2-step (R2S) [3].

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 19.04.2018 № Н.4а.241.19.18.1027 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке

специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2018 году».

Литература.

- [1]. *YU.A. KASCHUCK, A.V. BATYUNIN, O.G. EGOROV ET AL., “DIVERTOR NEUTRON FLUX MONITOR: CONCEPTUAL DESIGN AND CALIBRATION”, AIP CONFERENCE PROCEEDINGS 988, 303 (2008)*

- [2]. *Е.П. ШАБАЛИН, А.Е. ВЕРХОГЛЯДОВ И ДР., «СПЕКТР И ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ В ОБУЧАТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ ПУЧКА №3 РЕАКТОРА ИБР-2», ПИСЬМА В ЭЧАЯ, Т.12, №2(193), С.505-516 (2015)*

- [3]. *Y. CHEN, U. FISCHER, RIGOROUS MCNP BASED SHUTDOWN DOSE RATE CALCULATIONS COMPUTATIONAL SCHEME VERIFICATION CALCULATIONS AND APPLICATION TO ITER, FUSION ENG. DES. 63–64 (2002) 107–114.*

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ СПЕКТРОМЕТРИИ DD НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ТОКАМАКА-РЕАКТОРА ИТЭР

Кормилицын Т.М., Обудовский С.Ю., Джурик А.С., Кашук Ю.А.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия, e-mail:
T.Kormilitsyn@iterrf.ru*

В данной работе представлен обзор текущих средств спектрометрии DD нейтронов, применяющихся в измерениях на современных термоядерных установках и нейтронных генераторах. Рассмотрены примеры использования различных сцинтилляционных кристаллов, позволяющих осуществлять n-γ разделение сигналов по форме импульса.

Проведено моделирование функций отклика детекторов с помощью ПО GEANT4 [1] для следующих сцинтилляционных кристаллов $\text{LaCl}_3(\text{:Ce})$, $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6(\text{:Ce})$ (CLYC), $\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_{4.8}\text{Cl}_{1.2}(\text{:Ce})$ (CLLBC) и стильбен. Для проверки методики моделирования выполнен расчет функции отклика He_3 -счетчика, используемого в качестве монитора выхода нейтронного генератора. Проведены эксперименты с регистрацией DD нейтронов, излучаемых нейтронным генератором ИНГ-07Д. Экспериментальные данные использованы для проверки расчётной функции отклика детектора.

Рассчитанные функции отклика дают возможность восстанавливать исходный энергетический спектр DD нейтронов, оценивать загрузку измерительного тракта в различных режимах работы термоядерных установок и определять параметры плазмы. Полученные результаты позволяют говорить о перспективности использования сцинтилляционных детекторов в целях спектрометрии DD нейтронов на термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

Литература.

- [1]. *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.*

КАЛИБРОВКА НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА ВС- 501А

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

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Россия,
194021, С.-Петербург,
Политехническая ул., 26, margaritavdimovna@gmail.com*

Для диагностики эффективности нагрева и вводимой мощности инжектируемого пучка нейтральных частиц в токамаке Глобус-М2 в ФТИ им. А.Ф. Иоффе была разработана система нейтронной диагностики плазмы токамака, предназначенная для спектрометрического анализа потока нейтронного излучения, генерируемого в результате взаимодействия быстрых ионов в камере токамака. Система состоит из двух спектрометров нейтронного излучения на основе жидкого сцинтиллятора ВС-501А производства Saint-Gobain размерами $\text{Ø}50.8 \times 50.8$ мм с присоединенными ФЭУ Hamamatsu R329-02. Время высвечивания сцинтиллятора ВС501А составляет около 3 нс. Сигнал со спектрометров передавался и записывался в память ПК с помощью устройства цифрового ввода сигнала «National Instruments» PXIe-1082/ PXIe-5164/ PXIe-8301, подключенного через интерфейс Thunderbolt 3, которое обеспечивает оцифровку сигнала с частотой не менее 500 МГц.

Нейтронные спектрометры на основе жидкого сцинтиллятора ВС501А были протестированы в измерениях спектров излучения эталонных источников ^{22}Na и Am-Be. По измерениям спектра Am-Be была оценена эффективность регистрации нейтронного излучения детекторами ВС501А,

значение которой составляет 0,27 для обоих детекторов на расстоянии 50 см от источника нейтронного излучения.

Кроме того, нейтронные спектрометры были проверены в измерениях нейтронного излучения на пучке циклотрона ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Нейтронное излучение с дискретным энергетическим распределением было получено в результате протекания ядерных реакций ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ и ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ при облучении протонами и альфа-частицами, ускоренными в циклотроне, бериллиевой мишени. В результате проведения данных измерений были получены функции отклика нейтронных спектрометров на моноэнергетическое нейтронное излучение в диапазоне энергий от 2 до 10 МэВ. В качестве моноэнергетического нейтронного излучения измерялись нейтроны группы n1, рождающиеся в реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ и соответствующие образованию ядра ${}^{12}\text{C}$ в первом возбужденном состоянии, которое характеризуется гамма-переходом в основное состояние с испусканием гамма-кванта с энергией 4.44 МэВ. Для выделения этой группы нейтронов из общего спектра нейтронного излучения применялась схема нейтрон-гамма совпадений с использованием гамма-спектрометра на основе быстрого сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$.

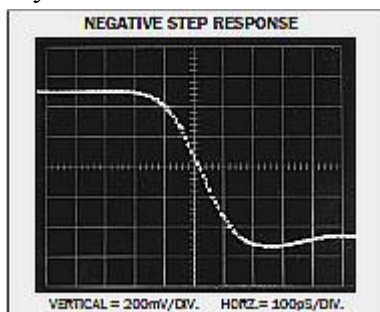
Работа частично финансировалась в рамках Государственного контракта № Н.4а.241.19.19.1009 от 26.12.2018 г.

АНАЛОГОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА С АЛМАЗНЫМ ДЕТЕКТОРОМ ДЛЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Марченко Н.П., Родионов Н. Б., Амосов В.Н., Мещанинов С.А.

Частное учреждение «ИТЭР-Центр», rodionovnb@gmail.com,
amosov@triniti.ru, mesh@triniti.ru

Благодаря таким свойствам как радиационная стойкость, способность работать при высоких температурах (вплоть до 300 0С), высокое энергетическое разрешение и быстродействие не хуже 1.0 нс, синтетический алмаз может быть применен в качестве чувствительного элемента детектора для времяпролетной спектрометрии импульсного ионизирующего излучения. В данной работе представлена аналоговая часть аппаратуры для регистрации импульсного ионизирующего излучения. При поведении измерений методами времяпролетной спектрометрии с использованием алмазных детекторов аналоговая часть аппаратуры имеет свои особенности. Прежде всего это условия в месте установки детектора. Если радиационные и температурные условия позволяют установить детектор вместе с предусилителем, то в этом случае возможно использование стандартных технических



решений - широкополосных, маломушящих усилителей тока. В полосе рабочих частот – 0,05...1,5 ГГц предусилитель должен иметь $K_{пр}$ (усиления) не ниже 10^3 А/В, а собственные шумы, приведенные ко входу предусилителя, не хуже 10нА во всей полосе частот. Эти технические решения осуществимы с

применением таких микросхем,

как MGA-635P8, PSA4-5043+ и их аналогов. Примерный результат изображен на рисунке. $f_n \dots f_v - 0,05 \text{ МГц} \dots 1,5 \text{ ГГц}$, $K_{пр} - 10^5 \text{ А/В}$, $I_{ш. \text{собств.}} - 8 \text{ нА}$. Тестирование проводилось по генератору ($T_{п.ф.} - 0,1 \text{ нс}$, Амплитуда – 100мВ, на входе предусилителя резистор – 100Мом, к которому параллельно присоединена емкость 0,2пкФ). Это решение предпочтительно в случае возможности постановки электроники предусилителя в поле ионизирующего излучения и при отсутствии заметных электромагнитных импульсных помех. При наличии критических радиационных полей, высокой температуры и в условиях сильных электромагнитных помех, в месте установки алмазного детектора, более целесообразно применять технические решения выноса детектора или детектора и головной части предусилителя.

При выносе детектора с головной частью предусилителя (как правило это головной элемент и несколько резисторов и конденсатор), при этом общая аналоговая часть удовлетворяет требованиям, приведенным выше, а именно в полосе рабочих частот – 0,05...1,5 ГГц предусилитель должен иметь $K_{пр}$ (усиления) не ниже 10^3 А/В , а собственные шумы, приведенные ко входу, не хуже 10нА во всей полосе частот. Тем ни менее такое решение позволяет резко сократить объем (детектор + головная часть предусилителя) устройства помещаемого в агрессивные условия, тем самым обеспечивая повышенную радиационную стойкость и максимальную помехозащищенность. В качестве входного полупроводникового элемента головной части предусилителя возможно использовать радиационно-стойкий, способный работать до 250 °С, транзистор 2N4957UB или аналог, при этом пассивные элементы (резисторы и конденсатор) выбираются также из перечня деталей, способных работать в условиях повышенной радиации и высоких температур.

В случае выбора решения с выносом только детектора из за необходимости расширения полосы частот ниже 50кГц, применение предлагаемых на рынке токовых предусилителей может быть проблематичным. В этом случае возможно применение разработки ИТЭР Центр РФ \ «Квант» ТРУ3м3. Применение этого

решения позволяет получить, при выносе детектора на двухпроводной или триаксиальной линии на расстояние до 10м., следующие параметры : . $f_n \dots f_v$ - 0Гц...1ГГц, $K_{пр}$ -104А\В, $I_{ш.}$ собств. - 12нА.

Все предложенные варианты головной аналоговой электроники работают в токовом режиме детектора и позволяют проводить измерения импульсов тока со скоростью переднего фронта от 700 пкс до 5 мс. В случае использования технического решения ИТЭР Центр РФ \ «Квант» ТРУ3т3 время измерения расширяется до минут.

Работа выполнена в рамках договора «Разработка инновационных средств диагностики высокотемпературной плазмы, потоков частиц и излучения» ЕОТП-УТП-51, 2019 г.

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ НЕЙТРОН-ГАММА СПЕКТРОМЕТР С РАЗДЕЛЕНИЕМ СИГНАЛОВ ПО ФОРМЕ ИМПУЛЬСА

Зубарев П.В.², Квашнин А.Н.², Моисеев Д.В.², Пинженин Е.И.²,
Хильченко А.Д.², Мейстер А.К.², Семенов И.Б.¹

¹Проектный центр ИТЭР, Россия, 123182, Москва, площадь ак.
Курчатова 1, стр. 3

²Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090, г.
Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

В докладе будут представлены результаты разработки и калибровки прототипа спектрометра нейтронов и гамма квантов на основе стильбенорвого сцинтиллятора и ФЭУ, а также данные полученные в первых плазменных экспериментах на установке Газодинамическая ловушка (ГДЛ) в ИЯФ СО РАН.

Спектрометр представляет собой компактный прибор длиной 400 мм и диаметром 70 мм, в котором размещены: сцинтиллятор из монокристаллического стильбена $D=30$ мм, $L=30$ мм; ФЭУ 9266В; предусилитель с АЦП (12 бит, 500 МГц) и электронный модуль обработки сигналов на основе ПЛИС. Управление прибором осуществляется по протоколу Ethernet.

В спектрометре реализован алгоритм разделения нейтронов и гамма квантов, основанный на частотно градиентном анализе. Суть метода заключается в том, что, так как форма импульса для нейтронов и гамма квантов различается, то и Фурье представление сигналов будут различаться. При этом, высокочастотные гармоники для нейтронов и гамма квантов совпадают (определяются быстрым временем нарастания импульса, практически одинаковым для нейтронов и гамма квантов). Различаются низкочастотные гармоники (определяются тем, что

нейтрон высвечивается медленнее, чем гамма квант). Для каждого события, по соотношению низкочастотных и высокочастотных гармоник, определяется вид исходной частицы и регистрируется ее энергия. В процессе набора статистики спектры нейтронов и гамма квантов записываются отдельно.

Вся обработка выполняется с помощью ПЛИС в режиме реального времени. Получена скорость счета до 2 105/сек при регистрации смешанного нейтронного и гамма потока в плазменных экспериментах на ГДЛ. Для энергетической калибровки гамма канала спектрометра использовались радионуклидные источники ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{60}Co . Для калибровки нейтронного канала использовались ускорительные источники DD (ING-07DM) и DT (ING-07T) нейтронов. Для отработки алгоритма разделения и проверки его эффективности применялись источники смешанного нейтронного и гамма излучения на ^{252}Cf и AmBe. Энергетическое разрешение спектрометра при регистрации 2.45 МэВ нейтронов составляет 180 кэВ, при регистрации 14 МэВ нейтронов – 400 кэВ. Показана возможность одновременной регистрации нейтронов от 1 МэВ до 15 МэВ (в экспериментах с совместной работой ускорительных источников DD и DT нейтронов).

Спектрометр на основе стильбена использовался на ГДЛ в экспериментах по инъекции в плазму мощных атомарных пучков дейтерия. При этом спектр протонов отдачи (в нейтронном канале спектрометра) соответствует энергии нейтронов 2.45 МэВ. В экспериментах с дополнительным СВЧ нагревом в плазме может формироваться популяция электронов с энергией более 100 кэВ. Такие электроны являются источником тормозных фотонов соответствующих энергий. Спектр рентгеновских квантов с энергией от 100 кэВ до 500 кэВ был зарегистрирован стильбеновым спектрометром (в гамма канале). Эти данные будут приведены в докладе.

ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ И КОПУСКУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Красильников А.В., Родионов Н.Б., Амосов В.Н., Мещанинов С.А.,
Марченко Н.П., Трапезников А.Г.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», A.Krasilnikov@iter.rf,
n.rodionov@iterrf.ru, amosov@triniti.ru, Mesh@triniti.ru*

Одним из актуальных направлений реализации управляемого термоядерного синтеза (УТС) является осуществление контролируемой термоядерной реакции в плазме, инициируемой импульсным лазерным излучением высокой мощности [1]. Особенно важно исследовать динамику процессов в плазме, возникающих на этапе зажигания термоядерной реакции. В сжатом и нагретом до температуры 10 кэВ горючем происходят реакции синтеза изотопов водорода и образование новых элементов. Физические процессы в термоядерной «вспышке» происходят в условиях, когда пробеги нейтронов, частиц и излучения больше размеров сжатой области, поэтому нейтроны, альфа-частицы и жесткое рентгеновское излучение равномерно прогревают всю массу горючего, причем большая часть энергии выносится из плазмы. Данная работа посвящена разработке времяпролетного спектрометра импульсных нейтронных и корпускулярных потоков на основе алмазного детектора для исследования физических процессов в лазерном термоядерном синтезе (ЛТС).

Характерные времена процессов в установках ЛТС порядка 10^{-9} - 10^{-8} с с импульсной мощностью 10^{13} - 10^{14} Вт и более. Для исследования динамики излучения плазмы необходимо иметь

детекторы и аппаратуру обработки сигнала с высоким временным разрешением 10^{-9} - 10^{-8} с и менее. В таких случаях детектор на синтетическом алмазе может иметь преимущества. Детектор является радиационно-стойким, способным работать при высоких температурах (вплоть до 300 0С), имеет высокое энергетическое разрешение и отличается высоким быстродействием не хуже 1.0 нс. Алмазный детектор регистрирует широкий спектр ионизирующих излучений: фотоны, нейтроны, альфа частицы, атомы и ионы. Основное преимущество алмазного детектора, это регистрация потоков продуктов термоядерных реакций на фоне сопутствующего нейтронного и фотонного излучений. Благодаря различной скорости вылета частиц, нейтронов и гамма-излучения из термоядерной «вспышки», алмазный детектор, установленный на некотором расстоянии от термоядерной мишени, облученной мощным лазерным излучением будет работать как времяпролетный спектрометр импульсных нейтронных и корпускулярных потоков с длиной пролетной базы около 10 м. Это позволит исследовать временную динамику термоядерной плазмы, инициируемой импульсным лазерным излучением, проанализировать структуру термоядерного источника ЛТС.

В качестве детектора для времяпролетной спектрометрии предлагается использовать алмазную гомоэпитаксиальную структуру [2]. Это легированная бором НРНТ подложка с нанесенной тонкой CVD-пленкой алмаза типа IIa толщиной 40-50 мкм. Малая толщина пленки позволит регистрировать сигнал, длительностью сравнимой с характерным временем термоядерного горения в ЛТС. Важно отметить, что для данного применения снижаются требования к качеству электронного материала, а радиационная стойкость тонких детекторов выше, чем для образцов толщиной существенно превышающих 40-50 мкм [3].

Работа выполнена в рамках реализации государственного контракта №51 теме: «Разработка инновационных средств диагностики высокотемпературной плазмы, потоков частиц и излучения», 2019 г.

Литература.

- [1]. Р.И. Илькаев, С.Г. Гаранин. Исследования по термоядерному синтезу на мощных лазерных установках. Плазма и термоядерный синтез. Сайт safov.ru
- [2]. Родионов Н.Б., Амосов В.Н., Артемьев К.К., и др. Детектор для избирательной регистрации частиц и ионов на основе эпитаксиального слоя синтетического алмаза. Атомная энергия, 2016, т.121, вып.2, стр. 98-103.
- [3]. G.Verona Rinati. Radiation hard Diamond Detectors in Schottky diode configuration. Diamond Detectors Development Work, 2018, Kadarash

МОНИТОР МОЩНОСТИ ДОЗЫ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА

Красильников А.В., Родионов Н.Б., Кашук Ю.А, Амосов В.Н.,
Мещанинов С.А. Портнов Д.А., Родионов Р.Н., Кормилицын Т.М.,
Ковалев А.О.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», A.Krasilnikov@iterrf.ru,
N.Rodionov@iterrf.ru, Y.Kashchuk@iterrf.ru*

В настоящее время активно развиваются ядерные медицинские технологии. До 70% онкологических больных нуждаются в том или ином виде лучевой терапии, причем для 25% больных целесообразно использовать так называемые плотно ионизирующие излучения – нейтроны, протоны, тяжелые ионы. Такие воздействия по своим характеристикам обладают более высокой биологической эффективностью на некоторые виды опухолей, которые плохо поддаются лечению традиционными для онкологии электронным, гамма- и рентгеновским излучением. В настоящее время имеется повышенный интерес к использованию нейтронов в клинической практике[1].

При воздействии нейтронного излучения возможность повышения дозы на опухоль ограничена допустимой лучевой нагрузкой на окружающие здоровые ткани и органы. Отсюда вытекает необходимость развития методов контроля дозы и пространственного распределения мощности ионизирующего излучения. Монитор мощности дозы (дозиметр) быстрых нейтронов на основе синтетического алмаза имеет явные преимущества для задач в лучевой терапии. Уникальные свойства высококачественных CVD алмазных детекторов, таких как радиационная стойкость, стабильность чувствительности, тканеэквивалентность, миниатюрность, быстрая реакция сигнала

делает их привлекательными для медицинских применений в лучевой терапии.

В данной работе обсуждается система измерения мощности дозы быстрых нейтронов на основе алмазного детектора, проведены измерения нейтронных спектров в макете фантома. Монитор мощности дозы состоит из компактного герметичного алмазного детектора, предусилителя, кабеля, блока обеспечения, АЦП, блока обработки данных, системы визуализации измерений. Типичный диапазон измерения мощности поглощенной дозы нейтронов дозиметра (в алмазе) - 0.01 -10 сГр/с. Динамический диапазон может быть увеличен с помощью применения нескольких детекторов и увеличения времени экспозиции в областях со слабым нейтронным потоком. Положение центра области облучения и распределение мощности дозы в нейтронном пучке можно измерять с пространственным разрешением ~ 1 мм.

Блок обработки данных монитора мощности быстрых нейтронов включает в себя алгоритм восстановления нейтронного спектра и расчета поглощенной дозы и позволяет анализировать трансформацию нейтронного спектра по глубине фантома. Расчет усредненной эффективной дозы по спектрам отклика алмазного детектора проводится численными методами. В качестве основы численной модели выбран алгоритм машинного обучения «линейная регрессия». Для этого алгоритма были оценены различные группировки спектров отклика алмазного детектора в зависимости от энергии регистрируемых нейтронов. Интенсивности сигналов, измеренные в группах, представляют собой характеристики данных, которые в дальнейшем используются при обучении и тестировании модели, и, в конечном счете, для вычисления мощности дозы. Следует отметить, что приближение расчета усредненной мощности эффективной дозы может оказаться достаточно грубым, так как дозы для здоровой и пораженной ткани могут существенно отличаться. Следующим развитием модели будет адаптация этого метода для индивидуальной оценки эффективной мощности дозы для каждого вида ткани.

В данной работе проведены измерения и расчеты нейтронных спектров в макете фантома. Фантом представлял собой цилиндр в дно которого вставлена трубка и в нее помещен детектор. Фантом помещался под трубкой нейтронного генератора. В цилиндр наливалась вода и проводились измерения нейтронных спектров НГ-24М алмазным детектором при различных уровнях воды в фантоме.

В работе продемонстрировано изменение спектра нейтронов детектора по глубине фантома. Получены характеристики изменения скорости счета в разных энергетических интервалах при увеличении слоя воды перед детектором.

Показано, что изменения спектрального отклика алмазного детектора в интервале энергий от 2МэВ до 10МэВ обусловлены нейтронами с энергией порядка 14МэВ. Изменения в интервале энергий от 0,5МэВ до 2МэВ обусловлены вкладом рассеянных нейтронов.

Оценена эффективная глубина проникновения нейтронов в виде средневзвешенной скорости счета в канале реакции (n, α).

Работа выполнена в рамках реализации государственного контракта №51 теме: «Разработка инновационных средств диагностики высокотемпературной плазмы, потоков частиц и излучения», 2019 г.

Литература.

- [1]. А.А. Лычагин. Портативные нейтронные генераторы в медицине. Медицинская техника, 2014, №1(283), стр.7-10.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР МОЩНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ: ПАРАМЕТРЫ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ

Барыков И.А.^{1,4}, Вичев И.Ю.², Зайцев В.И.¹, Федоров В.А.³.

¹АО "Государственный научный центр РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»,
Москва, Троицк, 108840

²Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН,
Москва, 125047

³Институт кристаллографии РАН, Москва, 119333,

⁴Российский университет дружбы народов, Москва, 117198

Одними из основных параметров, характеризующих процессы в инерциальном термоядерном синтезе, являются динамика и интенсивность импульсного рентгеновского излучения плазмы, где мощность излучения достигает ($10^{14} \div 10^{15}$) Ватт, длительность ($10^{-8} \div 10^{-9}$) с. Применение традиционных рентгеновских детекторов (сцинтилляционных, полупроводниковых), расположенных на разумном расстоянии от мишени, исключается вследствие их высокой чувствительности. Зависимость вторично-эмиссионных детекторов, которые в настоящее время используются для таких измерений, от состояния эмиссионной поверхности искажает результаты измерений и заставляет исследователей разрабатывать альтернативные методы. В данном случае приводятся результаты, полученные с детекторами, где в качестве чувствительных элементов используются диэлектрики, имеющие гораздо большую ширину запрещенной зоны по сравнению с полупроводниками, именно кварц и сапфир (ширина запрещенной зоны (8-9) эВ).

Измерения проводились на импульсной термоядерной установке Ангара-5-1 на расстоянии 2 метра от мишени, где при

достижении плазмой температуры (50-60) эВ мощность падающего на детектор излучения достигала $\sim 10^6$ Ватт/см², формируя потенциал подложки детектора ~ 10 В. Толщина диэлектрика 0,5 мм при данной температуре плазмы исключает сквозные токи образовавшихся под действием излучения электронов, которые, диффундируя на корпус детектора, оставляют в области поглощения заряженные ионы, поле которых формирует отрицательный потенциал на подложке детектора. На начальной и конечной стадиях динамики мишени температура плазмы понижается, формируя в спектре излучения сквозные кванты в ультрафиолетовой части спектра, что приводит к формированию отклику детектора положительной полярности. Данный эффект устраняется путем организации на детекторе потенциала смещения.

В процессе измерений обнаружено, что нет необходимости в проводящем покрытии входной поверхности детектора, т.е. растекание электронов на корпус детектора происходит непосредственно по поверхности кристалла, что значительно упрощает конструкцию детектора. Данный эффект мы объясняем предсказанным И.В.Таммом возникновением на границе диэлектрика уровней в запрещенной зоне и соответственно поверхностной проводимости.

*Микроволновые и
субмиллиметровые методы
диагностики*

**ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В РЕЖИМЕ
НА ПРОСВЕТ НА ТОКАМАКЕ Т-10**

Вершков В.А.^{1,2}, Петров В.Г.^{2,3}, Шелухин Д.А.^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт» (123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1)

²УТС-центр (123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1)

³АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ (108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12), vpetrov@triniti.ru

Описаны эксперименты, проводившиеся на токамаке Т-10 в рамках разработки концепции рефлектометрии со стороны сильного поля (РСП) в ИТЭР [1].

Как известно, РСП ИТЭР будет использоваться для измерений профиля плотности, для исследования флуктуаций электронной плотности, а также для измерений средней плотности плазмы [2]. Причем предполагается зондирование плазмы как обыкновенной волной (в диапазоне $\sim 15-140$ ГГц), так и необыкновенной волной (в диапазоне $\sim 10-90$ ГГц). Известно, что при измерениях на просвет на X_1 - моде (нижней частоте отсечки для необыкновенной волны), в области окна прозрачности плазмы ИТЭР (в режиме рефрактометра), возможно определять среднюю электронную плотность (свободную от «перескоков» фазы) в плазме за счет измерений времени распространения микроволнового сигнала в плазме [2, 3]. Время задержки сигнала в

плазме τ_{gr} дает информацию о линейной плотности зондируемой плазмы.

С помощью прототипа РСП на Т-10 проводились эксперименты по зондированию плазмы со стороны сильного магнитного поля на нижней частоте отсечки. Основная цель этих экспериментов состояла в измерении турбулентности плазмы в режиме рефлектометра, тем не менее, были получены также весьма интересные результаты и в режиме работы на просвет.

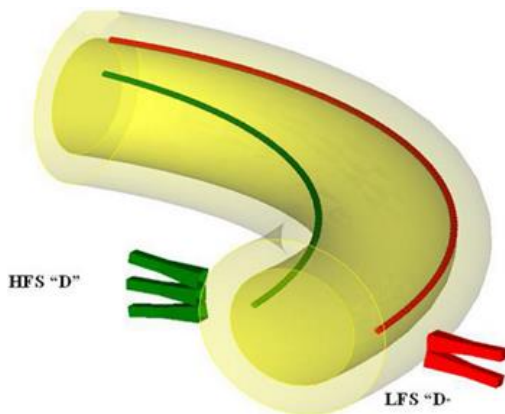


Рисунок 1. Схема расположения антенн рефлектометра на токамаке Т-10

В данной работе описываются результаты экспериментов в режиме рефрактометра, когда зондирующая волна проходила через плазму насквозь, что позволило определять интегральную плотность плазмы по хорде. На рисунке 1 приведена схема расположения антенн рефлектометра на Т-10.

Зондирование плазмы в этих экспериментах проводилось на XI-моду, а приемная антенна располагалась со стороны слабого магнитного поля, т. е. геометрия экспериментов была аналогична предполагаемой геометрии измерений средней плотности с помощью рефрактометра в ИТЭР. Эксперименты проводились в режимах с достаточно низкой плотностью с типичными параметрами: $I_p=200\dots260$ кА $V_T=2.4$ Т; $\langle Ne \rangle = (1.4\dots3)\times 10^{13}$ см $^{-3}$; частота зондирующей волны равнялась 37 ГГц, в одном разряде (с более низкой плотностью) зондирование плазмы проводилось на частоте 32 ГГц. Измерения средней плотностью в режиме рефрактометра проводились как в омическом режиме, так и в режиме с ЭЦ-нагревом. На рисунке 2 в качестве иллюстрации приведены результаты, полученные в режиме омического нагрева с параметрами разряда: $I_p=240$ кА; $V_T=2.4$ Т; $\langle Ne \rangle=1.4\times 10^{13}$ см $^{-3}$; частота зондирующей волны $F=37$ ГГц.

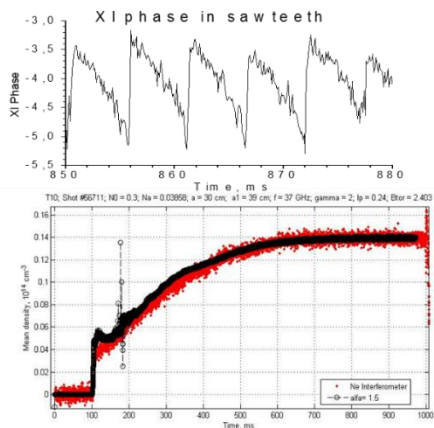
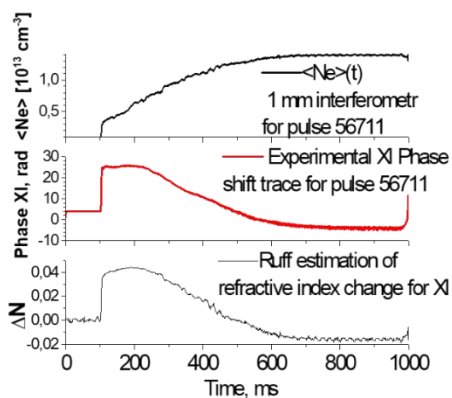


Рисунок 2. Разряд № 56711. Слева сверху вниз: плотность плазмы, измеренная СВЧ-интерферометром; изменение фазы зондирующей волны в течение разряда; изменение показателя преломления плазмы на XI-волне; справа сверху вниз: изменение фазы XI-волны во время пилообразных колебаний; динамика изменения средней плотности из данных СВЧ-интерферометра и рефрактометра.

Интегральный сигнал (рефрактометра) оказался весьма полезен для измерений средней плотности и наблюдения MHD мод – такую возможность предполагается использовать и на ITER. В отличие от T-10, на ИТЭР будут диагностироваться также и TAE-моды. В случае рефрактометра, этот сигнал содержит информацию о плазме вдоль всей хорды зондирования, включая и LFS и HFS [4].

Показано достаточно хорошее соответствие данных плотности, полученных в режиме рефрактометра, со значениями плотности, полученными с помощью СВЧ-интерферометра, представлены Фурье-спектры сигнала рефрактометра на X1-волне. В работе подробно описана схема экспериментов, проведен анализ полученных результатов.

Литература.

- [1] V. A. Vershkov, S. V. Soldatov, D. A. Shelukhin, and A. O. Urazbaev // Instruments and Experimental Techniques. 2004. V. 47. No. 2. P. 182-190.
- [2] Петров А. А., Петров В. Г., Малышев А. Ю. и др. // Физика Плазмы. 2002. Т. 28. № 10. С. 877–885.
- [3] Petrov A. A., Petrov V. G. // Rev. Sci. Instrum. 2003. V. 74. P. 1465–1468.
- [4] Hacquin, S., et al. Plasma Physics and Controlled Fusion. V. 49. P. 1371.

ТЕСТИРОВАНИЕ ДВУХЧАСТОТНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РЕФРАКТОМЕТРА НА ТОКАМАКЕ T-11M

Афонин А. Ю.^{1,2}, Петров В. Г.^{1,2}, Джурик А. С.^{1,3}

¹АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ"

²УТС-Центр

³Частное учреждение «ИТЭР-Центр»

В работе описан макет дифференциального рефрактометра для измерения электронной плотности плазмы в ИТЕР. В данном макете используется дифференциальный метод определения времени распространения микроволнового сигнала в плазме, описанный ранее в работе [1]. В данном способе применяется зондирование плазмы на двух близких частотах микроволнового диапазона f_1 и f_2 , и проводятся измерения разности фаз $\Delta\varphi_{12}$ на частоте биений $f_{\text{IF}} = f_1 - f_2$, при этом измеряемый фазовый сдвиг $\Delta\varphi_{12}$ будет примерно в f_1/f_{IF} раз меньше фазового сдвига обычного интерферометра с зондирующей частотой f_1 . При условии $\Delta\varphi_{12} < 2\pi$ измерения фазы будут однозначными — не будет перескоков фазы на 2π , свойственных обычным интерферометрам при повышенной МГД-активности, быстром нарастании плотности и т. д. Такой способ измерений фазы на промежуточной частоте (в данном случае на частоте $f_{\text{IF}} = 0.9$ ГГц) позволяет также проводить фильтрацию сигнала, обеспечивая существенное увеличение соотношения сигнал-шум по сравнению с импульсным рефрактометром [2].

Особенностью прибора (по сравнению с обычным микроволновым интерферометром) является также весьма простая оптическая схема, в которой опорный канал получается простым

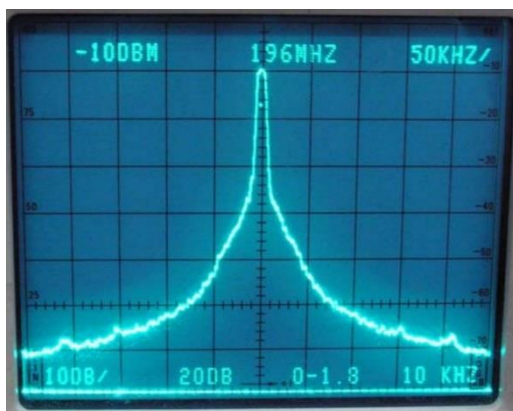


Рисунок 1. Спектральная характеристика микроволнового генератора с частотой 95 ГГц

ответвлением части мощности зондирующего излучения (сразу после смешения излучения двух микроволновых генераторов в щелевом мосту) на опорный детектор с помощью волноводного ответвителя, без организации дополнительного громоздкого волноводного опорного плеча вокруг всей установки.

В отличие от прибора, описанного в работе [1], в новом приборе частоты зондирующего излучения находятся в диапазоне окна прозрачности плазмы ИТЕР для необыкновенной волны (94.1 и 95 ГГц). Также в приборе используются более мощные генераторы микроволнового излучения, обладающие к тому же, лучшими спектральными характеристиками (см. рисунок 1, на котором представлен спектр излучения генератора).

Подробно описана схема прибора, методика проведения калибровки и измерений на токамаке Т-11 М. Проведены первые измерения средней плотности с помощью нового прибора на установке Т-11 М при зондировании по вертикальной хорде -5 см на обыкновенной волне. Данные рефрактометра сравнивались с

данными штатного Коттон-Мутон поляриметра установки Т-11 М, который измерял среднюю плотность плазмы по вертикальной хорде -1 см. В результате проведенных экспериментов продемонстрировано достаточно хорошее соответствие этих данных (см. рисунок 2). В настоящее время макет дифференциального рефрактометра стал практически штатной диагностикой, рутинно измеряющей среднюю плотность плазмы на установке Т-11М.

В работе также описаны результаты, полученные при частотном анализе сигналов рефрактометра, проведен сравнительный анализ частотного спектра сигнала рефрактометра и частотного спектра сигналов других диагностик Т-11 М.

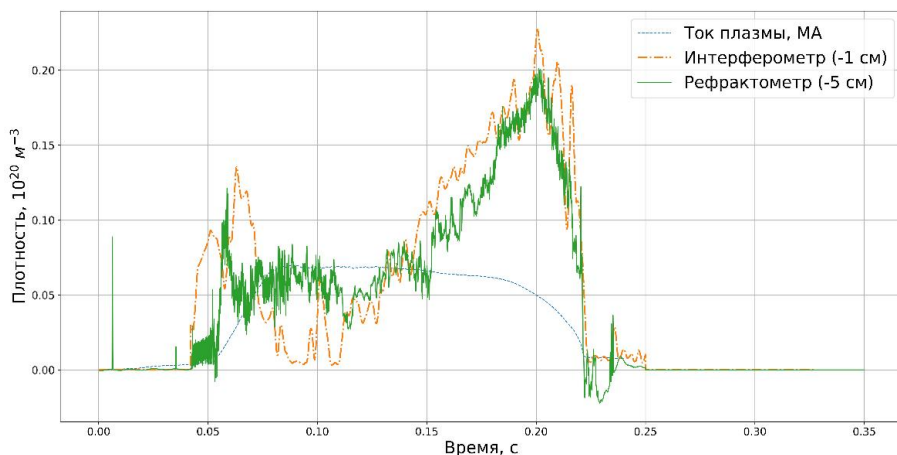


Рисунок 2. Ток плазмы и электронная плотность плазмы в разряде №47801

Литература

- [1] Петров В. Г., Петров А. А., Малышев А. Ю., Марков В. К., Бабарыкин А. В. «Времяпролетные измерения плотности плазмы на токамаке Т-11 М» — Физика плазмы, 2006, том 32, №4, с. 346-351.

- [2] А. А. Петров, В. Г. Петров, А. Ю. Малышев, В. К. Марков, А. В. Бабарькин. «Измерения электронной плотности на токамаке Т-11М с помощью импульсной времяпролетной рефрактометрии плазмы». Физика Плазмы, № 10, том 28, 2002 г. – С. 877–885.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В РЕФРАКТОМЕТРИИ ИТЭР

Афонин К. Ю.^{1,2,3}, Петров В. Г.^{1,2}

¹АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ

²УТС-Центр

³Московский физико-технический институт (государственный университет)

Как известно, для измерений средней плотности плазмы в ИТЭР предполагается использовать дополнительный канал рефлектометра, расположенный в экваториальной патрубке – канал рефлектометра с зондированием плазмы на просвет [1]. При этом, измерения средней электронной плотности плазмы в токамаке ИТЭР должны проводиться с погрешностью не более 1%. Поэтому, при измерениях средней электронной плотности плазмы в ИТЭР необходимо учесть влияние высокотемпературных эффектов на измерения [2]. Наиболее простым способом учета высокотемпературных эффектов в плазме является использование т.н. “модифицированной холодной” модели плазмы [3] (приближения Маззукато), в которой высокотемпературные эффекты учитываются путём замены в дисперсионном уравнении массы электрона m_e релятивистской массой:

$$m_{rel} = m_e(1 + 5/\mu), \mu = m_e c^2 / T_e,$$

где m_e — масса электрона, T_e — электронная температура.

В случае ИТЭР анализ, проведенный Маззукато [3], недостаточен, так как ограничивается электронной температурой до 15 кэВ, в то время как в ИТЭР электронная температура превышает 20 кэВ в центральной части плазменного шнура [4].

В данной работе проведены расчеты показателя преломления плазмы с применением релятивистского

диэлектрического тензора Трубникова [5] в для сценария с током 15 МА [4] для различных зондирующих частот в рабочем диапазоне частот рефрактометра, в области прозрачности плазмы. Также проведены расчеты зависимости времени задержки зондирующего излучения от частоты в рассматриваемом сценарии в диапазоне частот 55-90 ГГц. Все полученные при этом результаты сравнивались с результатами расчетов по приближению «холодной плазмы» и по «модифицированной холодной» модели плазмы (приближение Маззукато).

При проведении исследования показано, что существуют конфигурации плазмы, при которых относительная ошибка приближения Маззукато от решения тензора Трубникова на всем диапазоне рабочих частот, например, при индукции магнитного поля 5 Тесла превышает необходимую точность 1 % (рисунок 1).

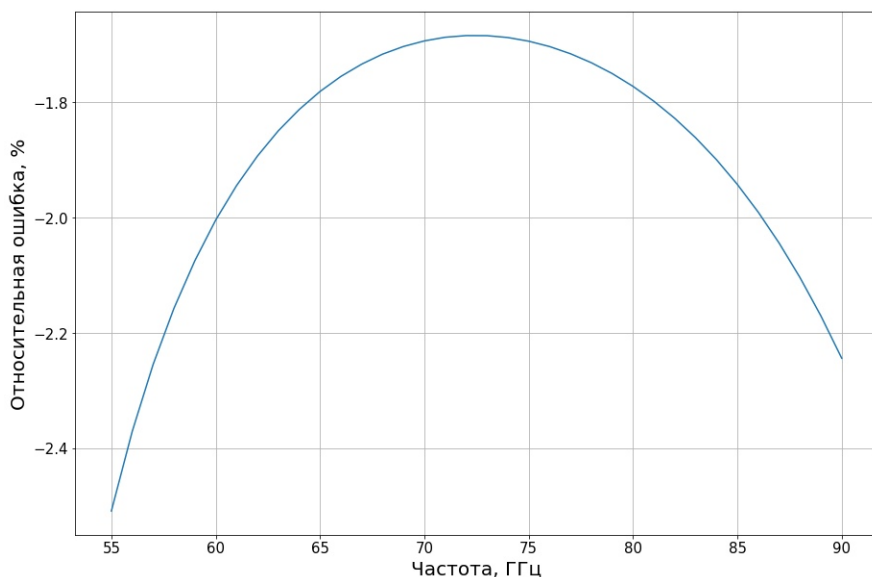


Рисунок 1. Зависимость относительной ошибки в коэффициенте преломления плазмы (приближение Маззукато) от зондирующей частоты.

Для повышения точности измерения средней электронной плотности плазмы предлагается проводить расчеты калибровочных кривых для рефрактометрии с использованием тензора Трубникова

с предварительным расчетом значений коэффициента преломления от переменных ω/ω_p , ω/ω_c , T_e в границах, полученных из анализа расчетных сценариев ИТЭР и построением калибровочной кривой зависимости времени задержки зондирующего сигнала рефрактометра от средней плотности плазмы ИТЭР методами интерполяции. Такой метод позволит достичь более высокой точности (по сравнению с приближением Маззукато), отвечая при этом требованиям ИТЭР о быстродействии диагностик в режиме реального времени (требуемая время измерения— не более 0,25 мс [2]).

Литература.

- [1] A.V. Krasilnikov, Y.A. Kaschuck, V.A. Vershkov, A.A. Petrov, V.G. Petrov, S.N. Tugarinov. International Conference on Fusion Reactor Diagnostics, Varenna, Italy September 9–13, 2013.
- [2] Design Description Document on 55.F9 HFSR system. ITER_D_3WD9DT
- [3] E. Mazzucato. Relativistic effects on microwave reflectometry. Physics of Fluids B: Plasma Physics, 4, p. 3460 (1992).
- [4] Sun Hee KIM. Corsica scenarios to Diagnostics group. ITER_D_QVJTTK, <https://user.iter.org/?uid=R4FT8D>
- [5] Shkarofsky I.P. New representations of dielectric tensor elements in magnetized plasma. J. Plasma Physics (1986), vol. 35, part 2, pp. 319-331.

ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД. ПЕРСПЕКТИВЫ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Н. А. Соловьёв, Д. В. Сарычев

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Solovev_NA@nrcki.ru

В настоящее время готовится к пуску токамак Т-15МД[1]. Для этой установки разрабатывается крупномасштабный диагностический комплекс, в состав которого планируется включить радиометрию электронно-циклотронного излучения (ЭЦИ). Эта диагностика предназначена для измерения электронной температуры T_e плазмы с хорошим временным (~ 10 мкс) и пространственным (~ 1 см) разрешением и является стандартной для установок типа токамак и стелларатор. Радиометрия ЭЦИ необходима для исследования широкого круга вопросов физики плазмы: МГД-неустойчивостей, транспортных барьеров, турбулентного переноса и т.д.

Цель настоящего доклада — представить текущее видение системы, предназначенной для диагностики ЭЦИ на установке Т-15МД и оценить возможности этой системы для физических измерений.

Систему радиометрии ЭЦИ на Т-15МД планируется реализовать в виде четырёх подсистем: 1) подсистемы для измерения профиля T_e в экваториальной плоскости со стороны слабого поля (LFS), 2) подсистемы для измерения профиля T_e в экваториальной плоскости со стороны сильного поля (HFS), 3) подсистемы для томографии (ECEI) T_e в полоидальном сечении с LFS, 4) подсистемы для измерения электронной функции распределения вдоль вертикальных хорд (VECE).

В настоящем докладе внимание уделено преимущественно экваториальным подсистемам 1) и 2), так как именно эти подсистемы предполагается реализовать в первую очередь.

Профильные измерения T_e планируется осуществлять на 2-й гармонике циклотронной частоты в необыкновенной (X) поляризации.

Для оптимизации поперечного (полоидального и торидального) пространственного разрешения предполагается снабдить диагностику квазиоптической фокусирующей системой. В работе оценены оптимальные параметры фокусирующих элементов, достижимые значения поперечного разрешения и потери мощности в тракте.

В качестве схемы приёма выбрана гетеродинная схема с двойным понижением частоты, подразумевающая использование понижающего конвертора в качестве первой ступени и многоканального анализатора спектра в качестве второй ступени. В работе оценены параметры приёмного оборудования, а также его ожидаемая стоимость.

По сравнению с системой, реализованной на токамаке T-10[2], приёмную систему на T-15МД планируется усовершенствовать с учётом полученного на T-10 опыта. Основное планируемое улучшение — обеспечение абсолютной калибровки системы вместе с повышением надёжности относительной калибровки. Для контроля калибровки предполагается 1) оборудовать понижающие конверторы эталонными генераторами шума, 2) оборудовать конверторы и многоканальные анализаторы спектра системой термостабилизации на базе элементов Пельтье с обратной связью по температуре, 3) использовать свипирующий эталонный генератор сигналов и, возможно, 4) чёрное тело (например SiC).

Дополнительно планируется оборудовать многоканальные анализаторы специальными модулями с двумя смежными полосовыми фильтрами и двумя детекторами мощности, что должно предоставить возможность измерять среднеквадратичную амплитуду флуктуаций T_e на уровне $\sim 0,5\%$ методом спектральной декорреляции.

С помощью предсказательного моделирования спектров радиационной температуры T_{rad} определены диапазоны частот, отвечающие областям плазмы с несущественным наложением гармоник. Оценена область применимости диагностики в пространстве инженерных параметров разряда: среднехордовых плотностей $\langle n_e \rangle$, магнитных полей на оси камеры B_0 , пиковых значений электронной температуры T_{e0} . Также оценены достижимые пространственное и временное разрешение для предполагаемой конфигурации приёмного оборудования.

Работа поддержана грантом РФФИ №18-32-00100.

Литература.

- [1] Хвостенко П.П., Анашкин И.О., Бондарчук Э.Н. и др. Экспериментальная установка токамак Т-15МД. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 15-38.
- [2] Соловьёв Н.А., Вершков В.А., Земцов И.А. и др. Поведение профилей электронной температуры плазмы в экспериментах с вольфрамовым и литиевым лимитерами на токамаке Т-10. // Сборник тезисов докладов XLV Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Москва, 2018, с. 111.

ФАЗОМЕТР ДИСПЕРСИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ СО₂-ЛАЗЕРА

К.А. Гринемайер^{1,2}, А.Д. Хильченко², А.Л. Соломахин², А.Н.
Квашнин², П.В. Зубарев^{1,2}

¹Новосибирский государственный технический университет,
Россия, 630092, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Россия,
630090, г. Новосибирск, пр-т. Акад. Лаврентьева, 11, e-mail:
kgrinemayer@gmail.com

Создан фазометр для дисперсионного интерферометра на основе СО₂-лазера с искусственной фазовой модуляцией. Фазометр представляет из себя электронный модуль, способный в режиме реального времени рассчитывать линейную плотность плазмы $\langle nl \rangle$ из сигнала фотодетектора интерферометра.

Ключевым достоинством прибора является использование устойчивого к шуму алгоритма извлечения фазы, который базируется на преобразовании Фурье сигнала фотодетектора. За счет коррекции гармоник значениями функций Бесселя, алгоритм способен реагировать на изменения глубины модуляции. Алгоритм реализован в программируемой логической матрице (FPGA).

Фазометр имеет удаленное управление из панели оператора в персональном компьютере и способен передавать значения линейной плотности плазмы в режиме реального времени по каналу связи Ethernet.

Достигнутое разрешение по $\langle nl \rangle$ для фазометра составляет $4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ с временным разрешением 4 мкс. Прибор может быть использован в диагностиках по измерению плотности плазмы, а также в контурах управления плотностью плазмы на современных плазменных установках.

Разработка фазометра стала частью проекта по созданию дисперсионного интерферометра для токамака Глобус-М (Санкт-Петербург).

ПРИМЕНЕНИЕ АЦП ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗЫ В ЛАЗЕРНОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ НА ТОКАМАКЕ Т-10

М.Н. Неруш^{1,2}, Д.С. Сергеев²

¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, E-mail: 1340116@gmail.com

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1, E-mail: 1340116@gmail.com

В проводимых на токамаках исследованиях высокотемпературной плазмы очень важной характеристикой является распределение плотности по сечению шнура. Одним из основных методов его определения является интерферометрия плазмы. Этот метод основан на зондировании плазмы электромагнитной волной (λ – длина волны), которая приобретает дополнительный фазовый сдвиг φ , зависящий от плотности плазмы на пути распространения излучения $n_e(x)$ следующим образом:

$$\varphi = \frac{\lambda e^2}{4\pi m_e \varepsilon_0 c^2} \cdot \int_A^B n_e(x) dx.$$

В НИЦ «Курчатовский институт» на установке Т-10 используется многоканальный HCN-лазерный интерферометр. Зондирование плазмы осуществляется излучением с длиной волны 337 мкм, источником которого служит газоразрядный HCN-лазер мощностью 30 мВт. Для получения промежуточной частоты 100 кГц в измерительном плече интерферометра помещен

механический сдвигатель частоты доплеровского типа. Сигналы промежуточной частоты в каждом измерительном канале образуются в низкотемпературных детекторах (4.2 К), погружаемых в транспортные гелиевые сосуды СТГ-40.

Важной частью диагностики является система сбора данных. Она предназначена для сбора и обработки информации, полученной в ходе проведения эксперимента.

В настоящее время система сбора данных диагностики «HCN-лазерный интерферометр» на установке Т-10 реализована с помощью блоков цифровых фазометров (ПФК – преобразователи фаза-код) с оперативной памятью, устанавливаемых в крейты стандарта САМАС. Эта система является специальной разработкой 90-х годов, и в настоящее время является устаревшей. Так, например, для ее работы необходимо использовать ПК с разъемом ISA, в который устанавливается плата расширения. Стандарт разъема ISA не поддерживается современной аппаратной частью ПК и операционными системами старше Windows 98. Также при ремонте этой системы сбора данных нахождение необходимых компонентов затруднительно. В связи с этим возникла необходимость использования другой системы сбора данных, основанной на современном, по возможности серийном оборудовании.

Было предложено осуществлять сбор данных с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а сдвиг фаз в оцифрованных сигналах вычислять в процессе постобработки.

Выходными данными, при применении АЦП, являются оцифрованные синусоидальные сигналы с опорного и измерительного детекторов для одной из зондирующих хорд. Затем проводилась их обработка с использованием пакета MatLab, с целью определения фазового сдвига между каналами. Для определения фазового сдвига проводилось отслеживание точек пересечения синусоид с нулем. Такой метод показал большую работоспособность.

Во время экспериментальной кампании 2017-2018 гг на токамаке Т-10 сигналы HCN-лазерного интерферометра регистрировались одновременно двумя системами сбора – на базе

ПФК в кейте САМАС и с использованием АЦП. Результаты измерений показали практически полное совпадение данных в обоих случаях. Также было проведено сравнение уровней фазовых шумов этих систем сбора, и оценен фазовый шум HCN-лазерного интерферометра. Показано, что фазовые шумы системы сбора данных с использованием АЦП меньше, чем у системы на базе ПФК. Однако в реальных экспериментах разницы практически не видно из-за шума интерферометра.

Работа выполнена при финансировании Госкорпорации Росатом.

ДВУХЦВЕТНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОТНОЙ СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ МИШЕННОЙ ПЛАЗМЫ

В.В. Данилов¹, Д.И. Сковородин¹, С.С. Попов¹, А.В. Бурдаков¹,
Ю.А. Трунев¹, В.В. Куркучек¹, М.А. Анিকেев¹, М.Г. Атлуханов¹,
П.А. Колесников², Е.С. Ли², В.Ю. Политов²

¹ИЯФ СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. академика М.А.
Лаврентьева, 11

E-mail inp@inp.nsk.su

²РФЯЦ-ВНИИТФ, 456770, Челябинская область, г. Снежинск, ул.
Васильева, 13, а/я 24, E-mail: vniitf@vniitf.ru

Принцип действия радиографических комплексов на основе многоимпульсного линейного ускорителя заключается в конверсии сильноточного электронного пучка (ток более кА) в жёсткое рентгеновское и гамма-излучение на мишени из тяжёлого металла (тантал)[1, 2]. Для обеспечения наилучшей разрешающей способности комплекса необходима качественная фокусировка пучка на мишень. Так же необходимо реализовать многоимпульсный режим работы, с задержками между импульсами в десятки мкс. При этом значительная величина плотности энергии, выделяющейся на мишени, обуславливает её частичное испарение и образование мишенной плазмы. Возможны следующие механизмы взаимодействия этой плазмы с пучком: зарядовая и токовая нейтрализация пучка, различные неустойчивости в плазме. Это взаимодействие приводит к ухудшению фокусировки пучка в течение импульса ускорителя. Пучки последующих импульсов проходят через облако уже расширившейся плазмы, что так же приводит к нарушению фокусировки. Представляет интерес определение параметров мишенной плазмы – динамики плотности

и степени ионизации на временном интервале в десятки мкс после импульса.

Для решения поставленной задачи на установке ЛИУ предложена диагностика на основе двухцветного интерферометра, которая описывается в данной работе. Для независимого измерения плотностей нейтральной и электронной компонент необходимо зондирование на двух длинах волн. Значения длин волн должны быть такими, чтобы они находились вдали от линий атомных переходов тантала, при этом значительно отличались друг от друга. В предложенном интерферометре используются длины волн 1,064 мкм и 10,6 мкм. Оба луча совмещены и проходят через плазму по одному пути, параллельно мишени на расстоянии от 20 мм до 40. Для подавления рефракции луча используется схема из сферических зеркал, фокусирующих зондирующие лучи в области плазмы. Для калибровки сигнала используется подвижное зеркало, установленное на пьезоэлементе, в предметном плече интерферометра. В ходе эксперимента на него подаётся синусоидальное напряжение, что приводит к колебаниям положения зеркала с амплитудой, превышающей обе используемые длины волн. Сигналы регистрируются при помощи инфракрасных детекторов и записываются осциллографом. Применяется контроль мощности предметного луча, прошедшего через плазму. Описан процесс обработки данных, представлены полученные результаты. Параметры эксперимента: энергия пучка 4,6 МэВ, ток пучка 1,6 кА, длительность импульса 100 нс, начальное пятно фокусировки на мишени 1 мм. В ходе эксперимента зарегистрирована плазменная корона разлетающегося мишенного факела. Измеренная плотность вещества короны $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, плотность электронов $\sim 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, степень ионизации $\sim 0,5\%$, скорость разлёта короны 4 км/с.

Литература.

- [1] J. McCarrick, G. Caporaso et al. Electron Beam/Converter Target Interactions in Radiographic Accelerators. Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference

- [2] Merle, E. et al. (2019). High Current and High Energy AIRIX Induction Accelerator Development.

ДИНАМИКА ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ СТЕЛЛАРАТОРА Л-2М В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЦР-НАГРЕВА

А.А. Летунов, Е.В. Воронова, С.Е. Гребенщиков, В.П. Логвиненко,
А.В. Князев

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

В стеллараторе Л-2М исследовались моноимпульсные режимы центрального ЭЦР нагрева при разных мощностях от 0,1 до 0,6 МВт, режим нецентрального нагрева при мощности 0,5 МВт, а также режимы с двумя и четырьмя импульсами центрального нагрева.

Для контроля профиля плотности в Л-2М используется субмиллиметровый интерферометр Майкельсона на основе HCN-лазера (337 мкм) с семью сферическими зеркалами, размещёнными в вакуумной камере [1]. Поворотом внешнего зеркала любое из этих зеркал может быть включено в оптическую схему интерферометра, позволяя осуществлять измерение фазового набега по определяемой им измерительной хорде. Угловое расстояние между соседними хордами составляет 5 – 7 градусов. Три первых хорды проходят вблизи магнитной оси, а седьмая углубляется в плазму до эффективного радиуса $r/a \approx 0,8$. Кроме того, в каждом импульсе установки проводится измерение фазового набега на длине волны ≈ 2 мм по вертикальной хорде интерферометром Маха-Цандера на основе лампы обратной волны. В рамках данной диагностики эти данные используются для контроля и коррекции небольших различий между отдельными импульсами в одном режиме. Можно использовать этот интерферометр и как восьмую хорду, однако центральная область и

без того насыщена близко проходящими хордами. Различие данных получаемых по всем четырем проходящим вблизи центра хордам, включая вертикальную, не велико и, как правило, близко к погрешности измерений.

Магнитные поверхности стелларатора Л-2М достаточно хорошо рассчитаны. Поскольку они являются изолиниями плотности плазмы, для оценки профиля плотности использовались одномерные модельные зависимости плотности от эффективного радиуса. Подгонка проводится подбором параметров аппроксимирующих функций из некоторого семейства методом наименьших квадратов.

При стандартных для стелларатора Л-2М значениях средней плотности плазмы $1,5 - 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, при мощности ЭЦР-нагрева $100 - 150 \text{ кВт}$, что соответствует удельным энергокладам $0,4 - 0,6 \text{ МВт/м}^3$, фазовые набегги по трем последним хордам быстро спадают с увеличением номера хорды. Монотонно спадают и средние по хордам плотности. В этом диапазоне режимов работы можно считать, что плотность является монотонно спадающей функцией эффективного радиуса. Но, в то время как средняя плотность на периферийных хордах, особенно на самой последней, после окончания импульса ЭЦР-нагрева начинает заметно спадать, на центральных хордах она некоторое время продолжает расти. Это говорит о том, что уже в этих режимах ЭЦР-нагрев приводит к заметному выносу частиц из центральной области – “density pump out” эффекту [2 – 5], прекращающемуся после окончания импульса нагрева. Это явление наблюдается как на стеллараторах, так и на токамаках, где ЭЦР-нагрев является дополнительным.

При увеличении мощности нагрева начинает заметно меняться поведение средней плотности на разных хордах. С ростом энергоклада средние плотности по периферийным хордам постепенно приближаются к значениям для центральных хорд. А при мощности ЭЦР нагрева $\sim 0,5 \text{ МВт}$ и плотностях $\sim 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ к концу импульса нагрева средняя плотность по 7-ой хорде начинает превышать среднюю плотность по центральной хорде на $\sim 20\%$. Факт такого превышения является достаточным признаком немонотонности профиля плотности, т.е. провала в центре, и

однозначно указывает на сильно выраженный “density pump-out” эффект.

Для выяснения влияния положения области нагрева на характер профиля плотности проведены измерения в режиме, в котором резонансное поле создается не в центре шнура, а смещается внутрь тора на $1/3$ радиуса шнура уменьшением тока в обмотках. Эксперименты, проведенные при мощности нецентрального ЭЦР нагрева $\sim 0,5$ МВт, показали, что если при центральном нагреве таким мощностям соответствовали профили со значительным провалом плотности плазмы в центре, то здесь средние плотности по периферийным хордам остаются заметно меньше чем для центральных хорд.

Работа в многоимпульсном режиме велась при мощностях ЭЦР нагрева $0,3 - 0,4$ МВт с длительностью импульсов нагрева $2 - 4$ мс и с такими же интервалами между импульсами. Работа имела поисковый характер, поэтому HCN интерферометр был, как правило, настроен на периферийную 7 хорду, и ход средней плотности на ней сопоставлялся с аналогичными данными 2-мм интерферометра (центральная хорда). На обеих регистрограммах хорошо прослеживается характерная модуляция, синхронная с импульсами ЭЦР нагрева. При этом по центральной хорде рост плотности соответствует СВЧ импульсам, а на периферийной их выключению. Это хорошо согласуется с результатами по “density pump-out” эффекту в этом диапазоне мощностей при моноимпульсном режиме.

Одним из результатов работы является демонстрация того, что на достаточно скромной по параметрам установке при значительных плотностях наблюдается сильный “density pump-out” эффект со значительным провалом плотности, что можно объяснить высокими значениями удельной мощности нагрева, как объемной, так и приходящейся на одну частицу.

Литература.

- [1] Князев А.В., Летунов А.А., Логвиненко В.П., HCN-интерферометр для измерения распределения концентрации

электронов в плазме стелларатора Л-2М, ПТЭ, 2004, вып. 2, с. 105.

- [2] Yamada H. et al., Response of Bootstrap Current and Electron Thermal Conductivity to Shaping in an ECRH Plasma in the CHS Heliotron/Torsatron, Nucl. Fusion, 1994, v. 34, p. 641 – 647.
- [3] Касьянова Н.В., Андреев В.Ф., Исследование выноса частиц из центра плазмы после включения центрального ЭЦР-нагрева в токамаке Т-10, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 2, стр. 73 – 83.
- [4] Ryohei Makino et al., Local and Fast Density Pump-Out by ECRH in the LHD, Plasma and Fusion Research: Regular Articles, 2013, v. 8, 2402115, p. 1 – 5.
- [5] Takahashi H. et al., Extension of High Te Regime in the Large Helical Device, NIFS Annual Report, 2015 – 2016, p. 53.

СЕКЦИЯ

6

*Системы сбора и обработка
экспериментальных данных,
диагностические средства и
метрологическое обеспечение
измерений*

**РАСЧЕТ СИГНАЛОВ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ
НА УСТАНОВКЕ JET, ОЖИДАЕМЫХ В ITER-
РЕЛЕВАНТНЫХ DT РАЗРЯДАХ**

Мельник А.Д., Афанасьев В.И., Миронов М.И., Несеневич В.Г.,
Петров М.П.

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия, 194021,
amelnik@mail.ioffe.ru*

В 2020 году на установке JET (Великобритания) планируется проведение серии экспериментов в дейтериево-третевой плазме с высоким выходом термоядерной энергии. Эти эксперименты представляют особый интерес, так как основные параметры (плотность и температура) получаемой в JET плазмы будут близки к ожидаемым параметрам плазмы ITER. Для диагностических систем такие эксперименты дают уникальную возможность проверки их работоспособности в ITER-релевантных условиях. В частности, подобная проверка крайне важна для диагностики по потокам нейтральных частиц, с помощью которой будет определяться изотопный состав в центре плазмы ITER.

Для анализаторов ISEP и GEMMA, установленных на токамаке JET, в докладе приведены результаты расчета полезного сигнала нейтрализованных ионов высокой энергии, ускоренных в результате лобовых столкновений термоядерных альфа-частиц с тепловыми ионами основной плазмы. Дана оценка фона, возникающего в детекторах под воздействием нейтронного излучения плазмы. Проведен анализ основных источников фона, на основе чего сформулированы предложения по усилению радиационной защиты анализаторов с целью улучшения сигнал-фон. Сделан вывод о возможности наблюдения сигнала нейтральных частиц высокой энергии из центра токамака JET в ITER-релевантных DT разрядах.

Финансирование работы: работа выполнена в рамках госзадания по теме № 0040-2019-0023.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВИДЕОКАМЕР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОВЕДЕНИЯ ЛИТИЕВОГО ЛИМИТЕРА НА ТОКАМАКЕ Т-11М В ИНФРАКРАСНОМ И ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНАХ. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

А.С. Джурик, А.С. Пришвицын, В.Б. Лазарев

АО "ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований",

г. Москва, г. Троицк, Россия, e-mail: adzhurik@triniti.ru

Среди жидких металлов (галлий, олово, литий), потенциально рассматриваемых для использования в элементах взаимодействующих с плазмой, литий - наиболее перспективный. Экспериментально показано, что использование лития в термоядерных установках типа токамак ведёт к увеличению времени удержания плазмы, уменьшению количества примесей в плазме, понижению рециклинга водорода.

Эксперименты на токамаке Т-11М посвящены разработке системы замкнутого контура циркуляции лития. В рамках данной программы необходимо наблюдать динамику тепловых нагрузок, приходящих на внутрикамерные элементы токамака, в частности на продольные лимитеры-коллекторы лития, в процессе разряда.

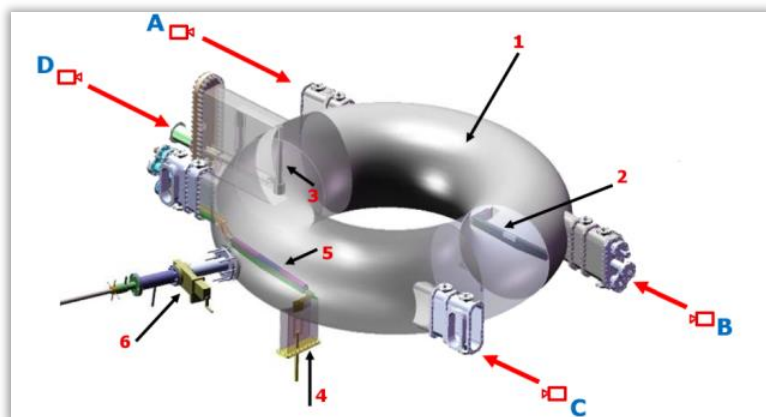


Рис 1. Схема токамака. 1- камера 2, 5 - продольный литиевый лимитер, 3 – вертикальный литиевый лимитер, 4 – графитовый лимитер, 6 – криогенная мишень

На токамаке Т-11М были установлены две высокоскоростные камеры Vaumer HXG20С работающие в видимом диапазоне, что позволило либо одновременно регистрировать процессы на двух лимитерах, либо одного лимитера с двух ракурсов. При необходимости во время съемки могут использоваться различные световые фильтры: LiI (671 нм.), LiII (549 нм) и Na (656 нм). Кроме того, на Т-11М были установлены две инфракрасные камеры Infratec VarioCam HD Head 680, работающие в диапазоне 7.5 - 14 мкм. Запуск всех камер синхронизирован.

Съемка двух продольных лимитеров-коллекторов токамака Т-11М проводится одновременно в видимом и ИК диапазоне, что позволило проанализировать процессы на их поверхности в динамике, в частности определить распределение тепловой нагрузки по их поверхности в ходе разряда.

В настоящее время на токамаке Т-11М проводятся эксперименты по определению тепловых нагрузок на поверхность литиевых лимитеров в процессе разряда в зависимости от их температуры и положения относительно плазменного шнура.

ДИАГНОСТИКА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ НА ТОКАМАКЕ EAST НА ОСНОВЕ АЛМАЗНОГО СПЕКТРОМЕТРА

Артемьев К.К., Родионов Н.Б., Амосов В.Н.,
Мещанинов С.А.

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

Измерение энергетических спектров атомов перезарядки, имеет важное значение для исследований характеристик плазмы, изучения поведения быстрых ионов и формирования режима работы токамака ИТЭР. Эта информация важна для повышения эффективности нагрева и удержания быстрых ионов в плазме. Детекторы на основе синтетического алмаза обладают следующими свойствами: высокая чувствительность к регистрации частиц и ионов, радиационная стойкость, высокая теплопроводность и малые габариты. Такие свойства детекторов на основе синтетического алмазного материала позволяют применять их для регистрации частиц [1,2].

По договоренности с китайской стороной было принято решение с помощью алмазного спектрометра нейтральных частиц исследовать поведение быстрых ионов на токамаке EAST. Алмазный детектор был установлен в экваториальном порту D. Алмазный спектрометр нейтральных частиц состоит из алмазного детектора, малозумящего предусилителя, устанавливаемого вне вакуума, блока обеспечения и АЦП. Детектор к предусилителю присоединяется через высоковакуумный проходной соединитель.

Выполнена энергетическая калибровка детектора для спектрометра нейтральных частиц для токамака EAST при регистрации протонов, дейтонов и альфа-частиц на базе ускорителя ФИАН. Энергетическое разрешение детектора составило для

протонов 16,7 кэВ, для альфа-частиц 26,4 кэВ, для дейтонов 16,1кэВ. Минимальные регистрируемые энергии протонов 18 кэВ, дейтонов 20 кэВ, альфа-частиц 22 кэВ. Детектор регистрировал частицы, рассеянные на кремниевой пластине с тонким золотым покрытием, на которую направлялся пучок ускорителя. Алмазный детектор в коаксиальном корпусе с апертурой диаметром 2,6 мм монтировался на проходной соединитель в мишенной камере ускорителя. Предусилитель устанавливался снаружи камеры на проходной соединитель. Поток частиц на детектор составлял от 91 до 2835 ч/с.

На токамаке EAST выполнена энергетическая калибровка спектрометра нейтральных частиц на основе алмазного детектора. Проведено подключение к системе сбора данных EAST. Обсуждается размещение дополнительного алмазного спектрометра нейтральных частиц на токамак EAST.

Работа выполнена в рамках реализации государственного контракта №Н.4а.241.19.18.1027 от 19 апреля 2018 г.

Литература.

- [1]. Артемьев К.К., Родионов Н.Б., Амосов В.Н., Красильников В.А., Мещанинов С.А., Родионова В.П., [XLV Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС](#), Звенигород, 2018
- [2]. Родионов Н.Б., Амосов В.Н., Артемьев К.К., Мещанинов С.А., Родионова В.П., Хмельницкий Р.А., Дравин В.А., Большаков А.П., Ральченко В.Г, Атомная энергия, т. 121, вып. 2, 98-103

ПРОДОЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В РЕЖИМАХ ОМИЧЕСКОГО И ЭЦР НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

Мещеряков А.И., Вафин И.Ю., Гришина И.А.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

Эксперименты, описанные в данной работе, проводились на стеллараторе Л-2М в режимах омического и ЭЦР нагрева плазмы. С помощью сканирующего SXR спектрометра измерялись спектры мягкого рентгеновского излучения в широком энергетическом диапазоне.

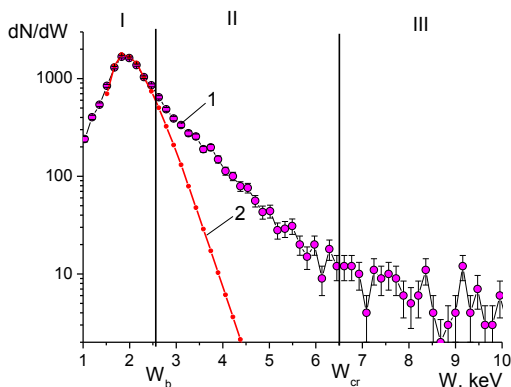


Рис. 1. Типичный вид SXR спектров, измеряемых на стеллараторе Л-2М в омическом режиме. 1 – экспериментальный спектр; 2 - максвелловский спектр с температурой, соответствующей тепловой части спектра 1.

Оказалось, что в обоих режимах нагрева измеренные спектры заметно отличаются от максвелловских.

В режиме омического нагрева в тороидальных магнитных ловушках происходит ускорение электронов в вихревом электрическом поле, что, приводит к искажению функции распределения электронов по

энергии (ФРЭЭ) и появлению убегающих электронов. Эти искажения можно видеть на спектрах мягкого рентгеновского излучения (SXR спектрах) и по ним оценить величину продольного электрического поля в плазме.

Типичный вид SXR спектров, измеряемых на стеллараторе Л-2М в омическом режиме, представлен в полулогарифмическом масштабе на Рис. 1. На Рис.1 W_b – энергия γ -квантов, начиная с которой отклонение SXR спектра от максвелловского можно считать заметным, а W_{cr} – нижняя граница энергии убегающих электронов. Предметом исследований данной работы являются промежуточный диапазон энергий $W_b < W < W_{cr}$ в SXR спектрах.

Методика оценки продольного электрического поля в плазме разработана в работах [1, 2]. В этих работах получено выражение, связывающее энергию W_b с продольным электрическим полем, в котором происходит ускорение электронов в омическом режиме. В работе [1] рассчитан спектр тормозного излучения замагниченной плазмы в продольном электрическом поле в области энергий $2 < W/T_e < \gamma^{-1/2}$, где $\gamma = E_{||}/E_{cr}$, а $E_{||}$ – продольное электрическое поле и E_{cr} – критическое поле Драйзера. Из этих расчетов следует, что если $\gamma^{1/2}W/T_e \sim 1$, то отклонение интенсивности спектра от интенсивности максвелловского спектра порядка самой интенсивности максвелловского спектра. Это условие является критерием того, когда отклонения измеряемого спектра от максвелловского уже являются заметными. Тогда, согласно [2], оценка продольного электрического поля, в котором происходило ускорение частиц, может быть найдена из соотношения

$$E_{||} = 4\pi e^3 n_e \ln \Lambda \times T_e / (W_b)^2.$$

Для спектра, приведенного на Рис. 1, $E_{||} \sim 0.35$ В/см. Эта методика оценки продольного электрического поля была использована для получения радиального распределения продольного электрического поля в режиме омического нагрева плазмы. С помощью сканирующего спектрометра [3] были измерены SXR спектры по различным хордам в поперечном сечении плазменного шнура. По максвелловским участкам этих спектров было построено радиальное распределение температуры электронов. Также были

определены значения W_b , по которым было построено радиальное распределение продольного электрического поля (Рис. 2).

Видно, что в омическом режиме нагрева продольное поле примерно равномерно распределено по радиусу и его величина

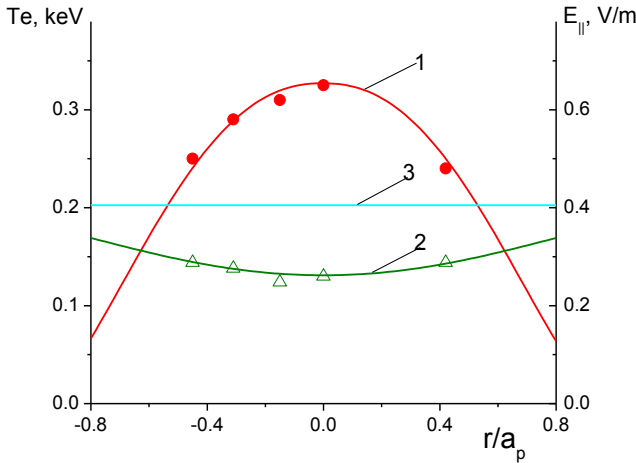


Рис. 2. Радиальные распределения электронной температуры (кривая 1) и продольного электрического поля (кривая 2). Кривая 3 соответствует продольному электрическому полю, вычисленному по напряжению на обходе

согласуется со значением электрического поля, определенное по величине напряжения на обходе (линия 3 на Рис. 2).

В отличие от омического нагрева, при электронном циклотронном нагреве в плазме не создается

индукционный ток при помощи вихревого электрического поля. Однако измеряемые в режиме ЭЦР нагрева SXR спектры также не являются максвелловскими [4]. Известно, что при ЭЦР нагреве в плазме создаются неиндукционные токи увлечения. В токамаках ЭЦР нагрев специально используют для их создания. В работе [5] были проведены расчеты, показавшие, что при ЭЦР нагреве на стеллараторе Л-2М также должны возникать токи увлечения. Наличие этих токов было подтверждено экспериментально. При этом в плазме возникает ЭДС самоиндукции (продольные вихревые электрические поля), приводящая к возникновению противотоков.

Эти электрические поля должны влиять на спектр тормозного излучения плазмы точно так же, как и в режиме омического нагрева. Таким образом, можно предположить, что отклонения от максвелловского спектра в условиях ЭЦР нагрева также вызвано наличием в плазме продольного электрического поля.

Используя методику, описанную в предыдущем разделе, по SXR спектрам, измеренным в режиме ЭЦР нагрева, проведены оценки продольного электрического поля, которое может возникать в плазме за счет токов увлечения, создающихся при ЭЦР нагреве. Измерена зависимость величины электрического поля от плотности плазмы. Показано, что эта зависимость согласуется с зависимостью от плотности разностного тока, протекающего по плазме (тока, представляющего собой разность между токами увлечения и противотоками). На основании этого выдвинута гипотеза, что отклонения от максвелловского спектра в условиях ЭЦР нагрева также вызвано наличием в плазме продольного электрического поля.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-02-00609).

Литература.

- [1]. M. Yu. Kantor, A possibility of plasma current density measurements using suprathreshold electron Bremsstrahlung emission, Review of Scientific Instruments, (2001) V. 72, No. 1, pp 1162-1165
- [2]. M. Yu. Kantor, A. B. Altukhov, V. P. Belik, L. A. Esipov, D. V. Koupprienko, L. A. Shmaenok, and V. B. Yermolayev, Local measurements of the Inductive Electric Field from Bremsstrahlung Emission Spectra in the FT-2 Tokamak, Proceedings of the 30th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, (2003) ECA Vol. 27A, P-2.60
- [3]. А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин, И. А. Гришина, ПТЭ, №6, 84-90 (2018).
- [4]. А.И. Мещеряков, И.Ю. Вафин, И.А. Гришина, А.А. Летунов, М.А. Терещенко. Физика плазмы, 2017, т.43, №6, с.497-502.

- [5]. Сахаров А. С., Терещенко М. А. // Физика плазмы 2002, Т. 28, No 7, С. 539.

СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ УЧЕБНО-ДЕМОНСТРАЦИОННОГО ТОКАМАКА МИФИСТ

В.А.Курнаев¹, В.Е.Николаева¹, С.А.Крат¹, А.В.Казиев¹,
А.В.Мельников^{1,2}, Г.М.Воробьев¹, Е.Д.Вовченко¹, А.В.Сушков²,

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

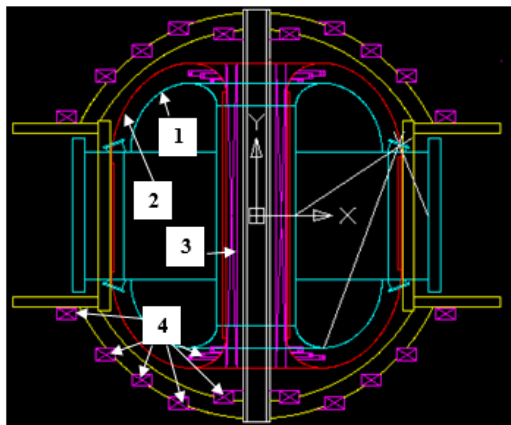
²*Научно исследовательский центр «Курчатовский институт»*

Создаваемый в МИФИ малый учебно-демонстрационный сферический токамак МИФИСТ в первую очередь предназначен для подготовки студентов, в том числе начиная с младших курсов, по физике плазмы в системах и магнитным удержанием, а также по ключевым термоядерным технологиям, используемым в экспериментальных установках типа токамак. Эта установка рассматривается как один из элементов кадрового обеспечения в разрабатываемой федеральной программе по физике УТС и плазменным технологиям, естественна ее интеграция в существующую и разрабатываемую экспериментальную базу этой программы, тесное согласованное сотрудничество с командой токамака Т-15МД и подготовка кадров для этой установки. Предполагается, что токамак МИФИСТ будет использован не только для повышения компетенций студентов по физике плазмы, но и студентов других специальностей, включая электрофизические установи, вакуумную технику, автоматизацию установок, материаловедение, программирование, работа с большими базами данных и другими, а также в качестве удобной лабораторной установки для студентов других вузов.

Параметры установки выбраны не только для того, чтобы продемонстрировать работу токамака как такового, но и для того, чтобы можно было осуществить и самостоятельные исследования, полезные для общей термоядерной программы. Как показал многолетний опыт МИФИ, становление будущих исследователей

происходит только через самостоятельную научную работу студентов.

Создание токамака предусматривает несколько этапов, определяемых последовательным расширением возможностей установки и уровнем финансирования. Согласованные параметры строящегося токамака приведены в таблице, а его конструкция показана на рисунке.



Параметр	ед. изм.	величина
Большой радиус	см	25
Малый радиус	см	13
Аспектное соотношение		1,9
Вытянутость камеры		3
Торoidalное поле на оси	Тл	0,5
Плазменный ток	кА	200
Длительность разряда	мс	30

Рис. 1 Схема токамака: 1-вакуумная камера, 2-обмотка тороидального поля, 3-индуктор, 4-полоидальные обмотки
 Вакуумная камера изготовлена из стали SS304 с разной толщиной стенок на внутреннем и внешнем диаметрах и имеет 12 прямоугольных фланцев (по числу катушек тороидального поля) с размерами условного прохода 120*376 мм и 24 наклоненных под углом 45° патрубка с фланцами Ду50.

Системы диагностики и контроля разделены на следующие подсистемы, реализуемые последовательно в несколько этапов.

На первом этапе (при запуске установки) реализуются:

- 1) система контроля параметров установки и параметров питания, которая в себя включает:
 - а) контроль температуры и напряжений в вакуумной камере и элементах электромагнитной системы, (тензодатчики и термопары)
 - б) токов и напряжений в блоках питания

- в) система вакуумной откачки (2 ТМН, 2 скролл–механических насоса, система подачи газа и масс-спектрометр остаточного газа);
- 2) система определения параметров разряда, состоящая из:
- а) 6-ти наборов электромагнитных зондов (катушки Мирнова), обхватывающих полоидальное сечение камеры и вставленные в жестко прикрепленные к камере трубчатые каркасы, равномерно расположенных по обходу тороидальной камеры,
 - б) 2-х поясов Роговского для измерения тока плазмы и витка для измерения напряжения на обходе,
- 3) системы регистрации излучений плазмы, включающие:
- а) обзорный спектрометр типа AvaSpec с CCD регистрацией (диапазон длин волн 200-800нм), присоединенный через кварцевое окно,
 - б) встроенные болометры и/или AXUV-детекторы для регистрации полных потерь энергии из плазмы,
 - в) скоростные инфракрасные камеры для контроля нагрева обращенных к плазме элементов токамака
 - г) датчики рентгеновского излучения для фиксации возможных срывов плазмы с генерацией убегающих электронов

На втором этапе будут реализованы системы контроля профилей температуры и плотности плазмы. Выбор между различными системами (рефлектометрия, хордовая интерферометрия с помощью двухмодового лазера, возможное томсоновское рассеяние и др. будет осуществлен после получения устойчивых разрядов, приобретения опыта управления токамаком и наличия необходимых средств и компонентов.

В связи с традиционной ориентацией кафедры физики плазмы на проблемы взаимодействия плазмы со стенками будут реализованы лазерные диагностики LIDS по определению состава ОПЭ и LID, позволяющие определять захват водорода стенками, а также разрабатываемые на кафедре дополнительные методы контроля взаимодействия плазмы со стенками непосредственно во время разряда, включая подвижные материаловедческие зонды,

встраиваемые анализаторы потоков частиц, торцевые автоколебательные зонды и др.

На заключительном этапе возможна реализация диагностики распределения электрических полей и флуктуаций плазмы с помощью инъекции литиевого пучка и специальных зондов. Построение систем диагностики будет связано с компьютерной обработкой и хранением данных и, по мере готовности, с переходом к возможности проведения дистанционных лабораторных и исследовательских работ на установке и полной цифровизацией установки.

Подробная программа создания средств диагностики, а также реализации с их помощью учебно-исследовательских задач и лабораторных работ должна стать предметом обсуждения на учебно-методическом совете токамака МИФИСТ с привлечением заинтересованных специалистов и преподавателей из ведущих термоядерных центров и университетов.

ПРОЕКТ КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИК ДЛЯ ТОКАМАКА МИФИСТ

В.Е. Николаева¹, Г.М. Воробьев¹, Ю.М. Гаспарян¹, Д.П. Иванов^{1,2},
С.А. Крат¹, В.А. Курнаев¹, А.В. Мельников^{1,2}

¹*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Москва, Россия*

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

В НИЯУ МИФИ ведется разработка и создание малого сферического токамака МИФИСТ для учебно-демонстрационных и исследовательских целей. Данная установка будет использоваться для ускоренной отработки технологий работы с литием, исследования удержания плазмы в сферическом токамаке, СВЧ-предионизации, поддержания тока с помощью ВЧ волн и разработки методов диагностики, в том числе *in situ* анализа взаимодействия плазмы с поверхностью. Разработан проект комплекса диагностик для различных стадий работы токамака МИФИСТ.

На данный момент осуществлено проектирование учебно-демонстрационного и исследовательского токамака МИФИСТ, разработаны концепции систем диагностик и дополнительного нагрева плазмы, начато изготовление вакуумной камеры и элементов электромагнитной системы. Основные параметры установки: большой радиус $R = 25$ см; малый радиус $a = 13$ см; аспектное отношение $A = R/a = 1.9$; вытянутость камеры $k \sim 3$; тороидальное поле на оси $B_\theta \sim 0.5$ Т; ток плазмы $I_{p1} \sim 200$ кА; длительность разряда $t \sim 10-30$ мс. В конструкцию токамака заложена возможность модернизации с увеличением поля до 3Тл

(что соответствует рекордному значению для сферических токамаков) и тока до 500кА.

Для начального этапа работы токамака МИФИСТ, включающего отладку установки и получение пробоя, начальные диагностики будут использоваться для контроля состояния вакуумной камеры и плазменного шнура. Проект комплекса диагностик для первого этапа работы токамака МИФИСТ включает в себя диагностики вакуумной системы, систему контроля нагрева катушек и прогрева вакуумной камеры, электромагнитные диагностики для контроля системы питания установки и положения плазменного шнура, а также диагностику радиационных потерь. Для дальнейших стадий научно-исследовательской работы на токамаке МИФИСТ разработаны концепции диагностических систем для измерения профилей плотности и температуры, на основе выбора наименее затратного при реализации метода с учетом увеличенных в 4-5 раз значений тороидального поля и 3-х кратного увеличения тока плазмы.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАМКНУТЫХ ПОЛОСТЯХ И ВРЕМЕНИ ТЕПЛОВОГО ПРОБОЯ ФОЛЬГ

Мунтян А.Н., Петров С.И., Романова Н.М., Таран С.С.

*Российский федеральный ядерный центр ВНИИЭФ, 607190, г.
Саров, Нижегородская обл., Россия, e-mail:
kravchenko@otd13.vniief.ru*

Представлена методика, предназначенная для исследования процессов переноса рентгеновского излучения в замкнутых полостях и в режиме теплового пробоя, которые протекают при взаимодействии мощного лазерного излучения второй гармоники йодного лазера установки «Искра-5» с рентгеновскими боксами-конверторами.

Источником рентгеновского излучения является мишень типа «Иллюминатор» [1], облучающая или полый бокс со щелью на боковой поверхности, сквозь которую измеряется скорость распространения излучения вдоль бокса или набор фольг из различных материалов. Время задержки появления излучения за фольгами и является временем теплового пробоя.

Для проведения измерений используются 2 абсолютно откалиброванных [2] рентгеновских фотохронографа РФР-4 [3] и рентгеновская кадровая лупа времени СХР7 [1]. Один из РФР-4 смотрит сквозь отверстие ввода на боковую стенку «Иллюминатора» и предназначен для определения параметров РИ, облучающего исследуемые мишени. Второй РФР-4 и СХР7 смотрит или на щель в боковой поверхности дополнительной мишени или на исследуемые фольги, и измеряют время переноса РИ. Для обеспечения пространственного разрешения вдоль щели и за разными фольгами используются спектрографы РИВС-4 [4]. На фотохронографах измерения ведутся в спектральном диапазоне от 0,2 кэВ до 1,1 кэВ в 5 узких интервалах шириной $h\nu/dh\nu \sim 3-7$, с

пространственным разрешением ~ 150 мкм и временным ~ 40 пс. Погрешность измерения абсолютных потоков РИ составляет $\sim 20\%$. Кадровая лупа регистрирует 11 изображений мишени с пространственным разрешением ~ 30 мкм, с задержкой между кадрами в 100 пс и временем выдержки каждого кадра 100 пс.

В проведенных экспериментах планковская температура излучения в «Иллюминаторе» составила 110-150 эВ, скорость распространения излучения по замкнутым полостям лежала в диапазоне от 1 мм/нс до 12 мм/нс, время теплового пробоя фольг в диапазоне от 50 пс до 550 пс.

Литература.

- [1]. Лазарчук В.П., Мунтян А.Н., Муругов В.М. и др. Многокадровая регистрация рентгеновского излучения с длительностью кадра 100 пс на установке "Искра-5" // ПТЭ. 2008. № 2. С. 81.
- [2]. Лазарчук В.П., Литвин Д.Н., Кравченко А.Г. и др. Методики калибровок рентгеновских фотохронографов и элементов рентгеновских измерительных схем // ПТЭ. 2004. № 2. С. 133.
- [3]. Лазарчук В.П., Литвин Д.Н., Кравченко А.Г. и др. Методики калибровок рентгеновских фотохронографов и элементов рентгеновских измерительных схем // ПТЭ. 2004. № 2. С. 128.
- [4]. Лазарчук В.П., Муругов В.М., Петров С.И., Сеник А.В. Фотохронографические методы регистрации пространственно-временных и спектральных характеристик рентгеновского излучения на установке "Искра-5" // Физика плазмы. 1994. № 1. С. 101.

МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ АБСОЛЮТНЫХ ПОТОКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 0,15 – 1,0 КЭВ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ $\lambda/\Delta\lambda \approx 20$ И 30 ПС ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЯМИ

Мунтян А.Н., Петров С.И, Романова Н.М., Санкин Е.В.

Российский федеральный ядерный центр ВНИИЭФ, 607190, г. Саров, Нижегородская обл., Россия, e-mail: kravchenko@otd13.vniief.ru

Значительная часть экспериментов, проводимых на установке «Искра-5», базируется на облучении исследуемых мишеней рентгеновским излучением, которое формируется в различных боксах-конверторах при облучении их лазерным излучением [1]. Одной из основных задач в таких экспериментах является регистрация динамики формирования поля рентгеновского излучения в полости конвертора. Характерные температуры рентгеновского излучения в полости лежат в диапазоне от 100 эВ до 200 эВ, следовательно, регистрацию необходимо проводить в спектральном диапазоне 0,1÷1 кэВ с временным и спектральным разрешением. Ранее для таких измерений использовалась методика, в которой спектральные каналы вырезались при помощи зеркал полного внешнего отражения и краевых фильтров, что обеспечивало спектральное разрешение $\lambda/\Delta\lambda \approx 3-7$ [2]. В данной работе представлена разработка и введение в действие методики регистрации рентгеновского излучения со спектральным разрешением $\lambda/\Delta\lambda \approx 20$ в 5 спектральных каналах в диапазоне энергий 0,15-1,0 кэВ с временным разрешением ~ 50 пс на основе многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) и рентгеновского электронно-оптического фотохронографа.

Для реализации методики разработан спектрограф «РИВС-5», обеспечивающий необходимый угол падения излучения на сборку из 5 многослойных рентгеновских зеркал и отраженного излучения на фотокатод фотохронографа РФР-4 [3].

На стенде на основе рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 проведена калибровка МРЗ. Измерены кривые отражения всех 5 зеркал в трех первых порядках отражения на излучении линии $K\alpha$ Cr – 5,415 кэВ. По этим данным, определены величины межплоскостного расстояния, отношение толщин слоев материалов в зеркале и величина шероховатости слоев зеркал [4]. На стенде РЭКС [5] на излучении $K\alpha$ C – 0,279 кэВ проведена калибровка абсолютной чувствительности фотохронографа РФР-4, а также измерены толщины подложки фотокатода (полипропилен – 2,32 мкм) и фотокатода (Au – 24 нм).

Проведено тестирование методики в опытах на установке «Искра-5», представлены полученные результаты регистрации.

Литература.

- [1]. Ф.М. Абзаев, С.А. Бельков, А.В. Бессараб и др., ЖЭТФ, 1998, том 114, вып. 6(12), стр.1993-2003.
- [2]. В.П. Лазарчук, В.М. Муругов, С.И. Петров, А.В. Сенник. Физика плазмы, 1994, том.20, №1, стр.101-106.
- [3]. В.П. Лазарчук, Д.Н. Литвин, А.Г. Кравченко и др., ПТЭ, 2004, том 7, №2, стр.128-133.
- [4]. Н.И. Чхало. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Институт физики микроструктур ИФМ РАН, Нижний Новгород, 2009.
- [5]. В.П. Лазарчук, Д.Н. Литвин, А.Г. Кравченко и др. ПТЭ, 2004, том 47, №2, стр.133-138.

РАЗРАБОТКА СТЕНДА КАЛИБРОВКИ МАГНИТНЫХ ЗОНДОВ ТОКАМАКА Т-15МД И ИЗМЕРЕНИЕ ИХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В.В. Будаева

*МГТУ им. Н.Э. Баумана,
e-mail: valeria.budaeva@yandex.ru*

Для регистрации МГД-активности плазмы, а также для задачи определения формы и положения краевой магнитной поверхности плазменного шнура в токамаке Т-15МД будут использованы локальные электромагнитные зонды. Перед установкой электромагнитных зондов в камеру токамака Т-15МД необходимо произвести их калибровку, а также определить их передаточные функции.

Локальный электромагнитный зонд представляет собой катушку (линейные размеры порядка нескольких сантиметров), позволяющую определить индукцию магнитного поля в области расположения зонда. В электромагнитной диагностике токамака Т-15МД будут использованы зонды в 3-х конструктивных исполнениях. В соответствии с формой и материалом основания для катушек зондов были введены следующие обозначения: А – прямоугольный сердечник из нержавеющей стали, В – сердечник – тефлоновая трубка. Цифра в обозначении зонда показывает количество компонент индукции магнитного поля, определяемое зондом: 1 – одна компонента (тангенциальная B_{τ}), 2 – две компоненты (нормальная B_n и тангенциальная B_{τ}). Если в обозначении отсутствует цифра, то зонд определяет только одну составляющую индукции магнитного поля (тангенциальную B_{τ}).

Фотографии зондов А1, А2 и прототипа электромагнитного зонда В представлены на рис. 1 [1].

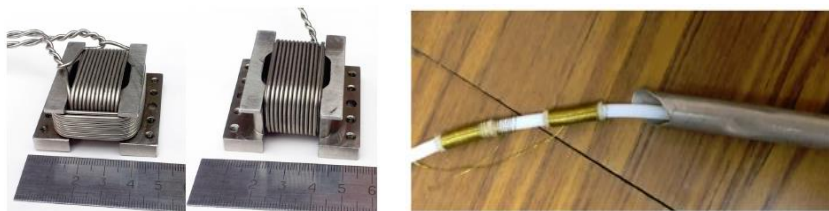


Рис. 1. Фотографии локальных электромагнитных зондов Т-15МД слева направо: А2; А1; и прототип электромагнитного зонда В с тонкостенной металлической защитной трубкой.

Для калибровки и измерения амплитудно-частотной характеристик зондов с целью определения передаточных функций был создан стенд, основным элементом которого являются спроектированные и изготовленные катушки Гельмгольца, создающие однородное магнитное поле в области несколько большей геометрических размеров зондов А2 и А1. Наряду с катушкой Гельмгольца для прототипов зонда В был использован соленоид.

Измерение АЧХ было проведено для трех различных прототипов зонда В (разные значения: NS; количество слоев катушки зонда; индуктивность зонда), переменное магнитное поле создавалось с помощью соленоида, а затем эксперимент был повторен уже с катушками Гельмгольца. Результаты представлены на рис. 2.

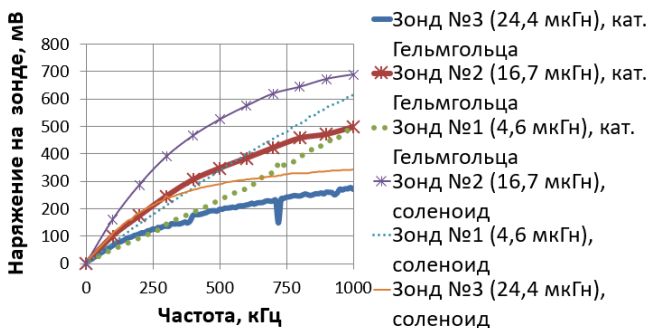


Рис. 2. АЧХ для трех различных прототипов зонда В. Зонд №1 –

NS = 1414 мм², 50 витков, 1 слой, L = 4,6 мкГн, зонд №2 - NS = 930 мм²,

100 витков, 2 слоя, $L = 16,7 \text{ мкГн}$; и зонд №3 - $NS = 1413 \text{ мм}^2$, 74 витков, 1 слой, $L = 24,4 \text{ мкГн}$.

Для зондов A2 и A1 измерение АЧХ было проведено с помощью катушек Гельмгольца, результат эксперимента представлен на рис. 3.

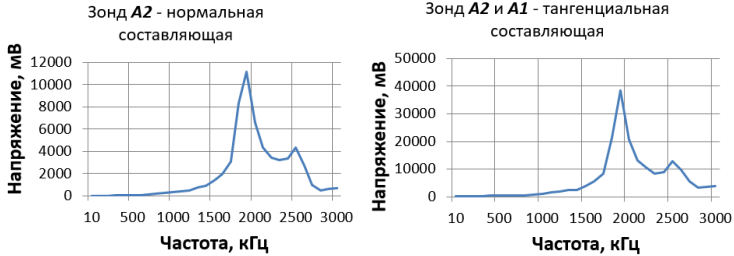


Рис. 3. АЧХ для зондов A2 и A1.

Для 2-ух вариантов прототипа зонда В были экспериментально и теоретически получены передаточные функции, которые представлены на рис. 4, и для них были определены значения частоты среза. Теоретические и экспериментальные данные совпадают с погрешностью $\sim 9\%$.

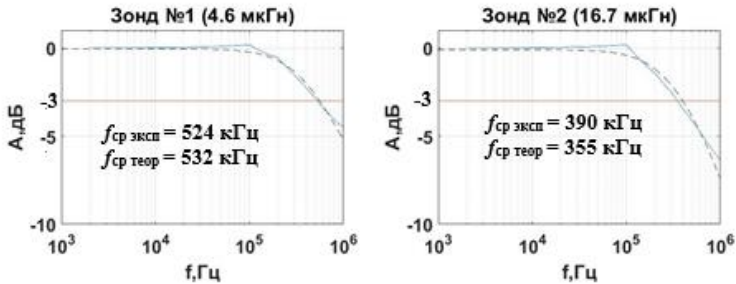


Рис. 4. Экспериментальные (непрерывная линия) и теоретические (пунктирная линия) передаточные функции для двух вариантов зонда В

Литература.

- [1]. Sushkov A.V. et al, Proc. 30th Symposium in Fusion Technology, P3.053, sept 16-21, 2018, Giardini Naxos, Sicily – Italy, 4pp.

ДИАГНОСТИКА ЭФФЕКТИВНОГО ЗАРЯДА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-15МД

В.А. Крупин¹, А.Р. Немец¹, Л.А. Ключников¹, М.Р.
Нургалиев¹, И.А. Земцов¹,
Н.Н. Науменко², С.Н. Тугаринов¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Россия, Москва, пл.
Академика Курчатова, д. 1, <http://nrcki.ru/>

²ИФ НАН РБ, 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т
Независимости, 68-2, <http://ifan.basnet.by/>

Эффективный ионный заряд (Z_{eff}) является одним из важнейших параметров плазмы, и влияет на её ключевые характеристики, такие как эффективность нагрева, удержание тепла и частиц и устойчивость разряда. Диагностика величины и радиального распределения эффективного заряда плазмы из интенсивности тормозного излучения широко используется на установках токамак. Данные об абсолютной величине и радиальном распределении $Z_{\text{eff}}(r)$ необходимы для многих исследовательских задач, решаемых на токамаке: исследования переноса тепла и частиц, исследования с инжекцией примесей, исследования турбулентности плазмы. Проектируемая диагностика для установки Т-15МД позволит проводить измерения абсолютной величины и профиля эффективного ионного заряда $Z_{\text{eff}}(r)$ в широком диапазоне параметров разряда.

В видимой области спектра 4000—7000 Å непрерывное излучение горячей плазмы ($T_e > 10$ эВ) представлено, в основном, тормозным континуумом, который на несколько порядков интенсивнее рекомбинационного и планковского излучения. Однако в рабочем диапазоне плотностей и температур плазмы установок Т-10 и Т-15 интенсивность линейчатого излучения атомов и ионов в видимой области спектра на порядки превосходит

тормозное излучение, поэтому для измерения интенсивности континуума используются выделенные участки спектра (так называемые «континуумные окна»), в которых отсутствуют линии атомов и ионов примесей и рабочего газа. Для Т-10 по совокупности параметров самой оптимальной оказалась зона в районе длины волны 5236 Å, используемая на многих других установках с магнитным удержанием. Измерения на Т-15МД планируется проводить в этой же области, поскольку, как и на Т-10, основной примесью плазмы ожидается углерод вследствие использования углеродного лимитера. В выбранной области отсутствуют яркие линии ионов углерода и молекулярные полосы C_2 , CH , CN , а основной вклад в линейчатое излучение вносят линии молекул H_2 . Для надежного выделения уровня тормозного излучения в присутствии молекулярного спектра водорода будут применены системы с высоким спектральным разрешением.

В состав диагностики входят 3 многохордовые системы сбора излучения (2 в полоидальном и 1 в тороидальном направлении) (рис. 1), обеспечивающие измерения профилей тормозного излучения с высоким спектральным разрешением до 0.2 Å за счет использования в системе регистрации спектрометров HES-370 и EMCCD камер Andor iXon Ultra с квантовым выходом до 95%. Передача излучения к системам регистрации спектров осуществляется 20-канальными кварцевыми оптоволоконными коллекторами длиной 17 м. Каждый входной канал коллектора, обеспечивающий сбор света с одной хорды наблюдения, состоит из двух волокон диаметром 480 мкм. На выходном торце коллектора все 40 волокон уложены в 1 ряд, таким образом полностью перекрывая высоту входной щели HES-370 (20 мм). Предельно малый астигматизм прибора ~0.2 мм позволяет разделить каналы коллектора на матрице CCD камеры по высоте, обеспечивая измерения полного хордового профиля на одном приборе.

Сканирующая система на базе вращающегося зеркального барабана обеспечивает непрерывные по пространству измерения профиля яркости интегрального излучения из области 5236 ± 6 Å с временным разрешением 5 – 20 мс. Всего, с учетом возможности использования нижней системы сбора CXRS диагностики, в

полоидальном сечении токамака организовано наблюдение с четырех независимых ракурсов, что позволит надежно восстанавливать радиальные профили тормозного излучения из хордовых измерений.

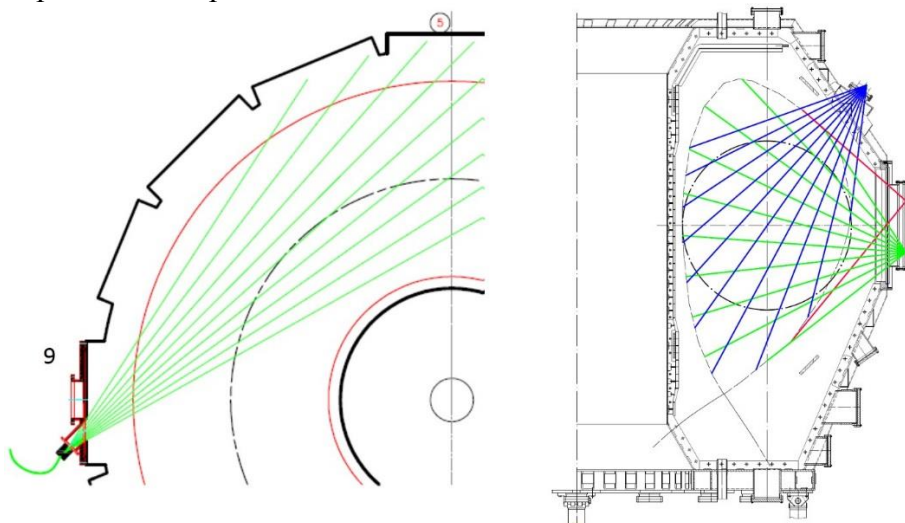


Рисунок 1. Схема расположения систем сбора излучения диагностики $Z_{\text{eff}}(r)$ на установке Т-15МД.

Помимо указанных систем, для контроля среднего по радиусу значения Z_{eff} с высоким временным разрешением (1 – 5 мкс) применяются однохордовые системы на базе монохроматоров МДР-2 и ФЭУ «ЕТ Enterprises» 9201SB.

Для уменьшения влияния паразитных засветок, полоидальное сечение измерений выбрано вдали от токовых диафрагм и источников дополнительного нагрева, а кроме того, для снижения уровня света, отраженного от задней стенки камеры, будет использоваться ловушка света в виде череных пластин.

Работа выполнена за счет гранта РФФИ, проект № 18-32-00100.

POST MORTEM АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ОБРАЩЕННЫХ В ЩЕЛЬ МЕЖДУ ТАЙЛАМИ ЛИМИТЕРА ТОКАМАКА Т-10

А.А. Писарев¹, И.И. Архипов², Я.А. Бабич¹, М.М. Бердникова¹,
Ю.М. Гаспарян¹, С.А. Грашин³, В.Е. Дробинин¹, В.С. Ефимов¹,
М.Г. Исаенкова¹, О.А. Крымская¹, В.А. Курнаев¹, Ю.А. Перлович¹,
Т.М. Степанова¹, В.А. Фесенко¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина
РАН

³Научно исследовательский центр «Курчатовский институт»

Лимитер токамака Т-10 представлял собой кольцо из нержавеющей стали, на котором были установлены 32 вольфрамовые пластины с электронной стороны и столько же пластин с ионной стороны с зазором 5 мм между тайлами. Пластины были изготовлены в НИИЭФА им. Ефремова из вольфрама марки ВМП производства фирмы «Полема» (г. Тула). После окончания кампании пластины исследовались с помощью растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа, рентгеновского фазового анализа, термодесорбционной спектроскопии и микротвердости. В данной работе описаны результаты исследования пластин, которые ограничивали плазменный шнур на внутреннем обводе и имели тепловые нагрузки не менее 30 МВт/м²,

Визуально на поверхностях, обращенных в щель между тайлами по всей глубине щели порядка 4 см наблюдались толстые осажденные пленки, капли, следы разрядов, глубокие трещины и сетка мелких трещин.

Обнаружено, что пленки на поверхности исследованных тайлов сформированы в основном углеродом, несмотря на то, что

вся кампания проводилась с вольфрамовыми лимитерами. Осажденные пленки в щелях наблюдались и ранее в других токамаках, где использовался углерод. Это связано с тем, что углерод в большом количестве накапливался на поверхностях элементов токамака за предыдущие годы работы с графитовыми лимитерами. При замене графитовых тайлов на вольфрамовые, этот углерод поступал в плазму в результате ее взаимодействия с поверхностью и переносился по вакуумной камере. В щелях углерод осаждался, по-видимому, из углеводородов и радикалов, которые разлагались там в разрядах. Паразитные высокочастотные разряды в магнитном поле были исследованы нами ранее в модельных экспериментах, в которых было также обнаружено образование углеродных пленок даже в узких (доли мм) щелях в результате разложения углеводородов в разряде. Следы разрядов видны на исследованных образцах Т-10.

Поверхность углеродной пленки покрыта сеткой мелких трещин, которые образовались из-за высокой температуры во время импульса. При резке образцов под струей воды пленка была удалена. Поверхность вольфрама имела признаки рекристаллизации, сетки мелких трещин на вольфраме не было.

Капли на поверхности были идентифицированы в основном как капли лития. Литий использовался на последней стадии работы. В небольшом количестве присутствовали капли нержавеющей стали и в незначительном количестве капли молибдена, которые были способны проникать в щели между тайлами на глубину в несколько см.

На поперечных шлифах видна сетка глубоких трещин, которая приводит к отслоению частичек с размерами 2-3 мм. При анализе шлифов показано образование частиц второй фазы вблизи поверхности, которые были идентифицированы как выделения карбидов. Карбиды образуются по всей внутренней (равно как и внешней) поверхности тайлов, в том числе поверхности, примыкающей к стальному держателю. Это свидетельствует, что весь лимитер был нагрет до высокой температуры, способствующей диффузии углерода в вольфрам. Различие в

структуре решеток карбидов и металла могло приводить к образованию трещин, которые наблюдались вблизи выделений.

Рентгено-фазовый анализ показал, что на поверхностях, обращенных в щель между тайлами образуется карбид вольфрама W_2C и присутствуют еще выделения WC , WO_2 , Li_2CO_3 , Li_2O и др. В анализированных образцах углеродная пленка была удалена при резке. Наличие оксида лития можно объяснить тем, что литий сначала осаждался на поверхности углеродной пленки (была удалена при резке), а затем диффундировал через нее в вольфрам, где впоследствии образовывал оксид.

На сторонах тайлов, которые обращены в щель, зарегистрированы неравнозначные по направлениям сжимающие напряжения от -118 до -720 МПа. На сторонах, обращенных к плазме, были растягивающие напряжения от 360 до 920 МПа. Растягивающие напряжения на внешней стороне, вероятно, были инициированы высокой температурой и приводили к образованию сетки трещин. Сжимающие напряжения в теневой области были, по-видимому, связаны с выделениями карбидов.

Поверхности тайлов крайне неоднородны в латеральном направлении. Твердость на поверхности даже в геометрически близких точках различалась в диапазоне 200-2000 HV. Высокая твердость обусловлена выделениями карбидов, кажущаяся низкая твердость (ниже твердости вольфрама) возможна в областях, близких к трещинам в вольфраме или в областях с остатками пленки.

На поперечных шлифах наблюдалось большое количество пор по границам зерен, образованных при спекании порошкового материала, которые могут служить стоками для накопления водорода и представлять опасность с точки зрения накопления трития в ИТЭР.

Термодесорбционные измерения с разрешением He и D_2 , показали, что большое количество гелия и дейтерия захвачено в тайлы со стороны поверхностей, обращенных в щель. Десорбция дейтерия обнаружена в диапазоне 350-1300 К, а десорбция гелия в диапазоне 1100-2050 К. Десорбция гелия и дейтерия происходит при более высоких температурах, нежели в лабораторных

экспериментах по ионному внедрению. Это можно объяснить тем, что и гелий и дейтерий захватываются не только в зоне внедрения, но глубоко в металле, куда они диффундируют при высокой температуре и где захватываются на дефектах. Вблизи кромки на электронной стороне захват дейтерия больше, чем на ионной стороне тайла, хотя температура на электронной стороне больше. То есть с увеличением температуры захват дейтерия не уменьшается, а увеличивается. Количество захваченного дейтерия и гелия вблизи рабочей кромки в теневой области, обращенной в щель, больше, чем в области, обращенной к плазме. Это может быть результатом высокочастотных разрядов в щелях в сильном (2 Тл) магнитном поле.

*Аппаратура системы сбора и
обработка экспериментальных
данных, диагностические средства и
метрологическое обеспечение
измерений*

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРОЕКТ СИСТЕМЫ СБОРА
ДАНЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ
ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА**

Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Миронов А.Ю., Немцев Г. Е.

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

Диагностика Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК) представляет собой систему всеобразных многоканальных коллиматоров и нейтронных детекторов. ВНК совместно с диагностикой Радиальная Нейтронная Камера обеспечивает проведение временных измерений профиля плотности термоядерной энергии и профиля источников нейтронов и α -частиц.

Проект системы управления и сбора данных Диагностики ВНК разрабатывается в специализированном ПО Enterprise Architect в соответствии с требованиями МО ИТЭР. Система управления и сбора данных построена по принципу распределенного сбора данных и иерархического управления. Информация с первичных датчиков (измерительный узел) попадает в подсистему предварительной обработки сигналов, в которой происходит усиление и оцифровка сигнала. Данная подсистема располагается в неблагоприятных условиях (здание токамака установки ИТЭР) - сильные электромагнитные и радиационные

поля, поэтому оборудование, реализующее данную функцию будет располагаться в специализированной экранированной стойке.

По проекту системы управления и сбора данных Диагностики ВНК была разработана документация для защиты предварительного проекта диагностики Вертикальная Нейтронная Камера. Документы обязательные для прохождения защиты предварительного проекта System I&C Requirement Specification (SRS), System I&C Design Specification (SDS).

В докладе описаны основные подходы к проектированию системы сбора данных и управления нейтронной диагностики для успешного прохождения защиты предварительного проекта в МО ИТЭР.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРОЕКТ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Миронова Е.Ю., Портоне С.С., Миронов А.Ю., Нагорный Н.В., Серов С. В., Тугаринов С.Н.

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

Диагностика Активная Спектроскопия (ДАС) или CXRS-edge диагностика (PBS 55.EC) предназначена для измерения интенсивности линейного излучения изотопов примесей в плазме, которое возникает при взаимодействии с инжектированным в плазму диагностическим пучком атомов водорода (Diagnostic Neutron Beam - DNB).

Проект системы сбора данных и управления Диагностики Активная Спектроскопия разрабатывался в специализированном ПО Enterprise Architect в соответствии с требованиями МО ИТЭР. Системы сбора данных и управления построена по принципу распределенного сбора данных и иерархического управления. Информация с первичных датчиков (sCMOS камер спектрометра) попадает в подсистему сбора данных.

По проекту системы сбора данных и управления Диагностики Активная Спектроскопия была разработана документации по системе сбора данных и управления для защиты предварительного проекта диагностики Активная Спектроскопия. Документы обязательные для прохождения защиты предварительного проекта: System I&C Requirement Specification (SRS); System I&C Design Specification (SDS).

В докладе описаны основные подходы к проектированию системы сбора данных и управления оптической диагностики для успешного прохождения защиты предварительного проекта в МО ИТЭР.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКИ ИТЭР

Миронов А.Ю., Портоне С.С., Миронова Е.Ю.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», A.Mironov@iterrf.ru,
S.Portone@iterrf.ru, E.Mironova@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. На нижнем уровне находятся около 130 технологических и диагностических подсистем установки.

Практически все технологические и диагностических подсистемы установки ИТЭР включают в себя автоматизированные системы управления для проектирования которых требуется использование специализированного программного обеспечения (ПО).

В данном докладе описывается практика использования в проекте ИТЭР следующего ПО: SEE Electrical Expert - профессиональное электрическое программное обеспечение, предназначенное для проектирования функциональных и электрических принципиальных схем, а также разработки и описания электрических кабельных систем, систем автоматики, систем энергоснабжения и компоновки электрических панелей и шкафов;

Enterprise Architect – специализированное программное обеспечение, которое используется в рамках проекта ИТЭР для

проектирования автоматизированных систем сбора данных и управления и подготовки отчетной технической документации.

В докладе продемонстрирован проект, созданный в Enterprise Architect, который описывает систему управления для одной из диагностических подсистем установки ИТЭР.

Доклад представляет интерес для инженеров, работающих в области автоматизированных систем управления.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ИНСТРУМЕНТА PSPS-EDITOR ДЛЯ КОНФИГУРИРОВАНИЯ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР

Пищулина П.А., Гужев Д.И., Журавлёв М.К., Нагорный Н.В.,
Миронова Е.Ю., Звонарева А.А.

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

ИТЭР содержит множество технологических и диагностических подсистем, которые должны иметь возможность конфигурирования в зависимости от сценария работы установки.

Инструментом, позволяющим менять значения конфигурационных переменных, управлять их предельными значениями, а также организовывать высокоуровневую логику, является PSPS-editor. Plasma Schedule Preparation System (PSPS) - система планирования экспериментов. В PSPS-editor проводятся настройки, которые затем передаются в Supervision and Automation System (SUP), где проходят проверку на соответствие ограничениям и передаются далее по иерархии непосредственно управляемому оборудованию. Также SUP включает в себя инструменты для описания поведения подсистемы как комплекса элементов согласно установленной методике тестирования. С целью проведения Factory Acceptance Test и Site Acceptance Test (FAT/SAT) разработчикам предоставляется “Mini-SUP”. Это виртуальная машина, предоставляющая минимальный функционал, позволяющая проверить синхронную работу подсистемы с рабочими состояниями установки ИТЭР.

В докладе рассказывается о программных инструментах, интерфейсах и системах, применяемых в процессе разработки и эксплуатации систем сбора данных и управления и планировании их работы, таких как SUP/mini-SUP, PPS-editor, SDD-editor и

других. Приводится пример создания конфигурации в PSPS-editor для демонстрационной системы, описанной в SDD-editor.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

ОРГАНИЗАЦИЯ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ ПОДСИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА

Звонарева А.А., Нагорный Н.В., Тугаринов С.Н.

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

На протяжении всей эксплуатации установки ИТЭР обращенные к плазме элементы подвергаются агрессивному воздействию. Отражающие поверхности первых зеркал оптических диагностик теряют свои свойства из-за осаждаемых на них примесей. Поэтому реализация подсистемы очистки первого зеркала является важной задачей для полноценной работы оптических систем.

Механизм очистки поверхности зеркал основан на удалении загрязнений тлеющим разрядом, управляемым высоковольтным источником питания.

Для контроля и управления источником питания необходим специальный драйвер NDS (Nominal Device Support), обеспечивающий связь между переменными прошивки устройства и переменными базы данных SCADA системы, отображаемыми на экране оператора.

В докладе представлен обзор системы CODAC Core System, приводится общая схема интеграции в SCADA-систему некаталогизированного оборудования на примере источника питания для системы очистки первого зеркала. Также рассмотрен вариант подключения стандартного промышленного интерфейса RS-485 к системе сбора и обработки данных с последующей реализацией ПО верхнего уровня в Red Hat Enterprise Linux.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка,

опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

Литература.

- [1]. A.V. ROGOV, YU.V. KAPUSTIN AND A.G. ALEKSEEV.
APPLICATION OF THE PENNING DISCHARGE FOR
CLEANING MIRRORS IN OPTICAL DIAGNOSTICS OF THE
ITER. ISSN 0020_4412, INSTRUMENTS AND
EXPERIMENTAL TECHNIQUES, 2015, VOL. 58, NO. 1, PP.
161–166.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДОМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПОРТ-ПЛАГОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕСТЫ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Вервелакис Г.М., Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Семенов И.Б.

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

В рамках международного проекта ИТЭР Россия осуществляет поставку стендов для испытания порт-плагов. Испытательные стенды предназначены для проведения испытаний как самих порт-плагов, так и диагностического и технологического оборудования внутри них. Испытания проводятся до установки порт-плагов в ИТЭР в условиях, приближенным к эксплуатационным.

В докладе описаны основные результаты проектирования системы управления стендов для испытания порт-плагов, подходы к организации локального управления и хранения данных процесса, а также подход к функциональным испытаниям систем, расположенных внутри тестируемых порт-плагов.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году»

АНАЛИЗ ИМЕЮЩИХСЯ СРЕДСТВ И ТРЕБОВАНИЙ К СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВ NATIONAL INSTRUMENTS НА ОСНОВЕ FPGA ДЛЯ ПРОЕКТА ИТЭР

Сорокин А.С., Нагорный Н.В., Портоне С.С., Миронова Е.Ю.,
Миронов А.Ю., Звонарева А.А.

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», A.Sorokin@iterrf.ru,
N.Nagorny@iterrf.ru, S.Portone@iterrf.ru, E.Mironova@iterrf.ru,
A.Mironov@iterrf.ru, A.Zvonareva@iterrf.ru*

На сегодняшний день в большинстве диагностик проекта ИТЭР создаются высокоскоростные системы сбора данных с устройствами National Instruments на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС/FPGA).

Данный класс устройств позволяет решать широкий спектр задач, связанных с быстроедействием и обработкой сигналов. National Instruments так же предлагают широкий спектр устройств (АЦП, ЦАП, осциллографы, генераторы сигналов, аналоговый и цифровой ввод-вывод) для работы в паре с FPGA модулями. Помимо этого, существует процесс для разработки собственных устройств для работы с NI FPGA.

В ИТЭР быстрые контроллеры работают под управлением операционной системы Red Hat Enterprise Linux и программного обеспечения CODAC Core System. Существует задача интеграции реконфигурируемых устройств на базе FPGA с этим программным обеспечением.

В докладе представлено последовательное описание процесса разработки систем с использованием FPGA устройств. Приведены основные принципы создания ПО уровня FPGA на языке LabVIEW, процесс переноса прошивок FPGA в ОС Linux,

создание специальных драйверов NDS необходимых для связи переменных FPGA с базой данных EPICS и их интеграция в ПО быстрых контроллеров.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ DC/PDC СИСТЕМОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ ЗЕРКАЛ ДИАГНОСТИКИ «СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ» В ИТЭР

А.В. Рогов^{1,2}, Ю.В. Капустин^{1,2}, Е.А. Драпико^{1,2}

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Kapustin_YV@nrcki.ru

²Автономная некоммерческая организация Координационный центр "Управляемый термоядерный синтез – международные проекты", 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, dc@fc.iterru.ru

Очистки первого зеркала в диагностических системах «Спектроскопия водородных линий» (55.E2, [1]) и «Активная спектроскопия» (55.EC, [2]) основана на удалении загрязнения с отражающей поверхности зеркала за счёт его ионного распыления на постоянном (DC) или среднечастотном ($f \leq 100$ кГц) импульсном (PDC) токе в газовом разряде внутри сеточного полого катода. Система автоматического управления процессом очистки является составной частью системы управления диагностики. Ниже представлены основные функции, которые предполагается реализовать при разработке системы управления процессом очистки зеркал:

- включение режима очистки;
- контроль наличия загрязнений и процесса их очистки на основе измерения частоты возникновения микродуговых привязок и режима разряда (сравнение напряжения и тока разряда со значениями, полученными для чистого зеркала) при заданном значении давления и состава рабочего газа;

- определение типа загрязнения (диэлектрическое или электропроводящее);
- переход от PDC к DC режиму очистки после полного удаления диэлектрических загрязнений;
- управление режимом очистки в реальном времени для достижения максимальной скорости очистки;
- автоматическая остановка процесса очистки для уменьшения распыления отражающей поверхности зеркала после удаления загрязнений;
- предусмотрен режим очистки поверхности анода при его загрязнении.

В рассматриваемых здесь диагностиках контроль наличия загрязнения на поверхности первого зеркала планируется проводить с использованием встроенной системы калибровки, при помощи которой будет измеряться интегральный коэффициент пропускания оптического тракта [2]: при снижении пропускания ниже определённой величины основной системе управления установки ИТЭР будет выставляться запрос на переход в режим очистки зеркал. После подтверждения необходимости очистки зеркал планируется переводить защитную шторку диагностики в положение «закрыто», тем самым препятствуя дальнейшему загрязнению отражающей поверхности.

В настоящий момент МО ИТЭР планирует разработать «унифицированный режим очистки» – такой режим, в котором, при необходимости, будет проводиться очистка зеркал всех оптических диагностик. Для этого собираются сведения о требуемом составе и давлении рабочего газа, допустимой величине магнитного поля, максимальной длительности очистки и пр. [3]. В случае диагностических систем «Спектроскопия водородных линий» и «Активная спектроскопия» в настоящий момент показана возможность проведения очистки при использовании чистого He и Ag при давлении (1...7) Па без магнитного поля. Длительность очистки от Al загрязнения (при моделировании Be загрязнения) толщиной 30 нм составляет ≤ 10 часов. В силу отсутствия в диагностиках датчиков для измерения давления и магнитного поля,

необходимые сведения должны быть получены от основной системы управления ИТЭР.

В случае диэлектрического загрязнения большой толщины на всей поверхности зеркала и внутренней поверхности катодного электрода разрядной ячейки DC разряд не может быть инициирован; очистка ведётся в PDC режиме, в котором устанавливаются частота и скважность импульсов, обеспечивающие максимальную среднюю мощность разряда.

В случае тонкого диэлектрического загрязнения или загрязнения с островковой структурой возможна очистка в DC или PDC режиме. При этом возможно появление микродуговых привязок – электрического пробоя тонких диэлектрических плёнок. Данный эффект может приводить к повреждению отражающей поверхности, поэтому при возникновении микродуг система очистки переключается в PDC режим. Частота возникновения микродуговых привязок является параметром, характеризующим наличие диэлектрических загрязнений. Максимальная эффективность очистки в PDC режиме обеспечивается за счёт автоматической установки скважности импульсов, при которой частота микродуговых привязок не превышает заданную. После исчезновения дуг система переключается в DC режим, где обеспечивается максимальная скорость очистки. Контроль очистки

в этом режиме основан на том факте, что напряжение разряда (при заданном токе и давлении) зависит от коэффициента ион-электронной эмиссии материала на поверхности катода и вида рабочего газа. Критерием для прекращения процесса

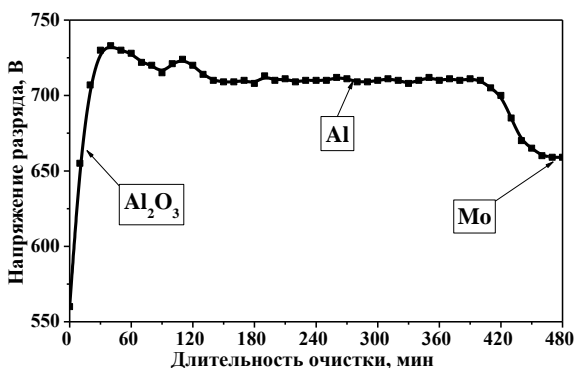


Рис. 1. Изменение напряжения разряда в процессе очистки

является снижение напряжения разряда в режиме стабилизации тока до значения, соответствующего чистому зеркалу. Пример

эволюции напряжения при очистке Mo зеркала от Al загрязнения с естественным оксидом представлен на Рис. 1.

Литература.

- [1]. Antonov N. PDR DA System Design Description (DDD) 55.E2 H-Alpha and Visible Spectroscopy. V. 1.0. 2017. 109 p. IDM UID: TWRHG4.
- [2]. Zvonkov A. System Design Description (DDD) 55.EC CXRS Edge. V. 4.0. 2019. 48 p. IDM UID: 79SL6Y.
- [3]. Shigin P. 55.NM justification memo – vacuum conditions for mirror cleaning. Report. 2019. 9 p. IDM UID: Y5QRZ2.

СЕРТИФИКАЦИЯ СПЕЦОБОРУДОВАНИЯ ПО ЕВРОПЕЙСКИМ СТАНДАРТАМ ПРИ ЕГО ПОСТАВКЕ В РАМКАХ ПРОЕКТА ИТЭР

Вервелакис Г.М., Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Нагорный
Н.В., Воробьев В.А., Семенов И.Б.

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

В рамках международного проекта ИТЭР Российское домашнее агентство осуществляет поставку спецоборудования на территорию Евросоюза (Кадараш, Франция).

Европейское законодательство требует обязательного наличия CE Сертификата соответствия и нанесения специального знака CE (CE маркировки) на оборудование. Это означает, что спецоборудование соответствует требованиям директив ЕС и прошло процедуру оценки соответствия. Размещая CE маркировку на свою продукцию, производитель гарантирует, что продукция является безопасной для использования в ЕС. Знак CE является единственным знаком соответствия на территории Европейского Союза.

На примере стоек системы сбора данных и управления в докладе описана процедура CE сертификации с этапа определения директив, применимых к конкретному спецоборудованию, выявления подходящих схем проведения сертификационных испытаний до этапа нанесения CE маркировки на конкретную единицу спецоборудования.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке

специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ СО СПЕКТРОМЕТРОВ ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ»

Кудрявцев А.В., Нагорный Н.В., Парышкин Ю.А.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Задачами данной работы являлись:

- разработка программной модели, имитирующей поток данных на выходе с камеры спектрометра;
- проведение моделирования потоков передачи данных от камер спектрометров в подсистему сбора данных.

Доклад содержит краткое описание архитектуры подсистемы сбора данных диагностики «Активная спектроскопия». Кроме этого в докладе приведено описание программной модели, имитирующей поток данных на выходе с камеры спектрометра, а также результаты моделирования потоков передачи данных от камер спектрометров в подсистему сбора данных.

Требования, выдвигаемые при регистрации и анализе спектральных профилей излучения плазмы, составляют по временному разрешению – 10 мс, а по задержке получения параметров – 25 мс. Регистрация спектров излучения в спектрометрах производится с помощью ПЗС камер. Каждый измеренный спектр представляет собой набор из 2048 чисел с разрядностью 16 бит. Результатом каждого измерения по всем спектрометрам являются 78 таких спектров. Данная информация должна передаваться с ПЗС камер по каналам связи Ethernet в «быстрый» контроллер и там обрабатываться в режиме «on-line». Так как минимальный период набора спектров может задаваться равным 1 мс и все спектры измеряются одновременно, то это накладывает ограничения на пропускную способность канала передачи данных.

В рамках настоящей работы необходимо было проверить пропускную способность данной структуры при следующих ограничениях, накладываемых на режимы накопления спектров, предварительной обработки и стратегии передачи данных, а именно:

- при различном времени накопления спектров (в диапазоне от 1 мс до 10 мс),
- при различных способах предварительной обработки измеренных спектров в ПЗС камере (без предварительной обработки измеренных спектров в ПЗС камерах, то есть с передачей всех измеренных спектров и с предварительным усреднением по заданному количеству измерений и соответственно передачей меньшего количества спектров),
- при передаче всех измеренных спектров, но с формированием пакетов данных различной длины с учетом ограничений, накладываемых по временному разрешению и задержке получения параметров,
- при последовательной и параллельной структурах формирования запросов и приема ответов при управлении ПЗС камерами со стороны «быстрого» контроллера.

Разработанная программная модель подсистемы сбора данных со спектрометров включает программную модель ПЗС камер и программную модель «быстрого» контроллера (РХИ-системы). Ниже приведены требования, на базе которых были разработаны эти программные модели.

Программная модель ПЗС камеры должна функционировать на персональном компьютере с ОС Windows или Linux и имитировать работу ПЗС камеры в режимах накопления и передачи спектров оптического излучения под управлением подсистемы сбора данных на базе «быстрого» контроллера (РХИ-системы).

Программная модель подсистемы сбора данных с ПЗС камер (РХИ-системы) должна функционировать на персональном компьютере с ОС Windows или Linux и имитировать управление ПЗС камерами в режимах накопления и передачи спектров оптического излучения.

Были проверены варианты работы программных моделей с последовательной и параллельной структурой формирования запросов и приема ответов при управлении ПЗС камерами.

В варианте работы с последовательной структурой формирования запросов и приема ответов быстрый контроллер выполняет все процедуры последовательно в одном потоке независимо от числа ПЗС камер. В варианте работы с параллельной структурой формирования запросов и приема ответов «быстрый» контроллер выполняет все процедуры параллельно, организуя количество потоков, равное числу моделируемых ПЗС камер. При этом и в том и в другом случае, после завершения скачивания спектров с одинаковым номером со всех ПЗС камер программа отмечает время, когда была закончена данная процедура. Операции выполняются до тех пор, пока не будет скачано заданное количество измеренных спектров со всех ПЗС камер.

Работа подсистемы сбора данных моделировалась при следующих условиях:

- заданное время накопления одного спектра - 1, 2, 5, 10 мс;
- количество подключаемых ПЗС камер – от 1 до 24;
- время накопления спектров до передачи – 10 мс.

Моделирование было проведено на компьютерах со следующими параметрами:

- компьютер - Intel Core 2 Duo CPU E740 2.80 ГГц, 3,46 Гб ОЗУ;
- операционная система - Microsoft Window XP Professional Service Pack 3.

Результаты моделирования приведены в виде таблиц, содержащих значения загрузки сети (%) и среднего времени передачи данных, собранных за 10 мс при различных заданных временах накопления одного спектра и различном количестве подключенных ПЗС камер при последовательной и параллельной структурах формирования запросов и приема ответов при управлении ПЗС камерами.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ КОМПЛЕКСА АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НА ИТЕР

А.С. Наволоцкий, В.И. Афанасьев, А.Д. Мельник, М.И. Миронов, В.Г. Несеневич, М.П. Петров, С.Я. Петров, Ф.В. Чернышев

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

В настоящее время в ФТИ им. А.Ф. Иоффе проводится разработка диагностического комплекса атомных анализаторов для строящегося токамака ИТЭР. Объектом исследования комплекса являются выходящие из плазмы потоки нейтральных атомов дейтерия и трития, дающие информацию об изотопном соотношении топливной смеси внутри плазмы. Одной из особенностей работы диагностики во время горения термоядерной дейтерий-тритиевой плазмы является наличие интенсивного нейтронного и гамма фона в месте установки детекторов.

Для регистрации вторичных ионов в анализаторах используются детекторы на основе многоанодных фотоэлектронных умножителей на входные окна которых нанесен тонкий сцинтилляционный слой CsI(Tl). Применение сцинтилляторов микронной толщины хоть и позволяет значительно снизить чувствительность детекторов к фоновому излучению, однако для надежного выделения полезного сигнала необходимо проводить полноценный амплитудный анализ. Для этих целей в тракте регистрации сигналов атомных анализаторов предусмотрено использование АЦП, позволяющего отфильтровывать значительную часть фоновых импульсов, которые, в отличие от полезного сигнала частиц гауссовой формы, имеют экспоненциально спадающее амплитудное распределение.

В качестве основного элемента, осуществляющего оцифровку входных сигналов, был выбран модуль многоканального АЦП NI 5752 фирмы National Instruments [1]. Он имеет 32 дифференциальных входа, что позволяет с помощью восьми таких модулей обеспечить прием сигнала со всех детекторов диагностической системы. Особенностью модуля NI 5752 является работа в режиме непрерывной оцифровки входных сигналов с частотой 50 МГц, что реализуется с помощью четырех 8-канальных АЦП AFE5801 производства фирмы Texas Instruments. Разрядность преобразователей составляет 12 бит, а динамический диапазон – ± 1 В для дифференциального входного сигнала. Управление модулем NI 5752 осуществляется с помощью блока NI 7966R, в котором установлена FPGA матрица Xilinx Virtex-5 SX95T. Оба модуля устанавливаются в крейте PXIe, связь с компьютером пользователя, управляющего измерениями, обеспечивается с помощью встроенного в крейт MXI контроллера.

В докладе описаны результаты разработки специализированного программного обеспечения, позволяющего адаптировать оборудование National Instruments под нужды диагностического комплекса атомных анализаторов. Представлены данные об испытании на работоспособность многоканального макета системы сбора данных. Рассмотрены возможности интеграции системы сбора данных атомных анализаторов в систему CODAC.

Финансирование работы: госконтракт № Н.4а.241.19.19.1009 от 26.12.2018, часть работы, связанная с испытанием макета системы сбора данных, выполнена в рамках государственного задания по теме № 0040-2019-0023

Литература.

- [1]. ОТЧЕТ О НИОКР «РАЗРАБОТКА, ОПЫТНОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АНАЛИЗАТОРОВ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ, ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ И ГАММА СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ИТЭР В

2014-2016 ГОДАХ», ДОГОВОР ОТ 25.02.2014 № 02-14/01 С
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ СОГЛАШЕНИЯМИ ОТ 11.02.2015
№1, ОТ 24.09.2015 №2, ФТИ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ (2015)

СТАТУС РАЗРАБОТКИ КАНАЛА РЕГИСТРАЦИИ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА В СОСТАВЕ АНАЛИЗАТОРОВ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ИТЭР

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

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук, Россия, 194021, С.-Петербург, Политехническая
ул., 26, e-mail: e.khilkevitch@mail.ioffe.ru*

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе разрабатывается гамма-спектрометр в составе системы анализаторов атомов перезарядки ИТЭР (PBS 55.E8). Спектрометр включает в себя два детектора - сцинтилляционный детектор на основе кристалла LaBr_3 с размерами $\text{Ø}76\text{мм} \times 76\text{мм}$ производства компании Saint-Gobain; второй - германиевый HPGe (High-Purity Germanium) детектор GR5021 производства компании CANBERRA, снабженный электрическим кулером Cryo-Pulse 5 plus. Первый детектор имеет разрешение 3% на линии 662 кэВ, и позволяет работать при нагрузке до $3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Разрешение второго детектора составляет 2,1 кэВ на линии 1332,5 кэВ, однако он может использоваться при нагрузках порядка 10^5 с^{-1} .

Канал регистрации сигналов гамма-спектрометра строится на платформе компании National Instruments, реализующей архитектуру FlexRIO. Оборудование включает в себя процессорный модуль PXIe 7966R с submodule АЦП 5761R (14 бит, частота оцифровки 256 МГц), передающие данные через шину крейта NI PXIe 1082 на интерфейсную плату NI PXIe 8381 и далее транслирующие их на управляющий компьютер. Использование методов сжатия данных позволяет записывать без потерь сигнал с частотой 250 МГц за время, ограниченное только свободным

местом на твердотельном накопителе. Необходимый объем памяти для записи информации, накопленной за 400 с, при использовании дифференциального кодирования и применением метода сжатия данных Deflate, составляет 82,4 Гбайт. На управляющем компьютере происходит обработка сигнала и передача его далее в систему CODAC. Была разработана предварительная версия программного обеспечения, которое обеспечило управление каналом регистрации гамма-спектрометра с использованием средств системы CODAC (пуск, запись сигнала).

Сигнал с полупроводникового детектора подается на анализатор сигналов CANBERRA Lynx, либо так же оцифровывается АЦП для проведения амплитудного анализа в off-line режиме на управляющем компьютере, осуществляющего также его дальнейшую передачу в систему CODAC. Разработанные алгоритмы цифровой обработки оцифрованного сигнала германиевого детектора позволили получить энергетическое разрешение 7 кэВ при загрузке детектора 10^4 с^{-1} .

Работа частично финансировалась в рамках Государственного контракта № Н.4а.241.19.19.1009 от 26.12.2018 г.

АРХИТЕКТУРА И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ, СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВНК

Зубарев П.В.¹, Квашнин А.Н.¹, Моисеев Д.В.¹, Хильченко А.Д.¹,
Голачев В.М.², Немцев Г.Е.³, Семенов И.Б.³, Миронова Е.Ю.³,
Портоне С.С.³

¹*Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, проспект академика Лаврентьева 11, 630090 Новосибирск*

²*Акционерное общество "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований", 142190, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12*

³*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, площадь ак. Курчатова 1, строение 3*

Система регистрации, сбора и обработки данных включает в себя: два выносных крейта, в каждом из которых находятся по 6 модулей АЦП, контроллер предусилителей и контроллер выносного крейта; основной крейт, в нем находятся: контроллер основного крейта, 12 модулей приёма и обработки данных; крейт NI с модулем FlexRIO NI-7966R на борту и подключенным к нему адаптерным модулем; управляющий ПК(персональный компьютер) и кабельные линии связи.

В связи с дополнительными требованиями к синхронизации, а также к скорости передачи данных от АЦП в модуль приёма и обработки данных, была модернизирована система регистрации, сбора и обработки данных ВНК.

В модернизированной системе сделаны следующие изменения:

- В модуле приема и обработки данных заменена ПЛИС и добавлена возможность передачи данных по сети Ethernet.
- В контроллере основного крейта, помимо оптического канала связи с модулем FlexRIO, добавились ещё два оптических канала связи Ethernet. Один для обмена данными с выносным крейтом, в второй - для непосредственного подключения к ПК (без использования модуля FlexRIO).
- В выносном крейте в модуль управления АЦП тоже добавлен оптический канал связи Ethernet (с поддержкой RTPv2 протокола). По этому каналу связи теперь выполняется передача всех управляющих команд модулю управления предусилителями, а также получение и передача на верхний уровень всей необходимой информации о состоянии предусилителей.

RTP - «Протокол точного времени», описанный стандартом IEEE 1588, необходим для синхронной работы каналов АЦП двух выносных крейтов и позволяет достичь точности синхронизации в несколько десятков наносекунд. Для аппаратной поддержки RTP в системе использованы микросхемы DP83640.

Программные средства системы регистрации, сбора и обработки данных системы ВНК условно можно разделить на следующие уровни:

- Уровень ПЛИС – программы в ПЛИС модулей обработки данных, адаптерного модуля и основного контроллера.
- Уровень МК(микроконтроллера) – программа модуля контроллера АЦП выносного крейта.
- Уровень МП(микропроцессора) – утилиты, библиотеки и драйвера, разрабатываемые под ОС Linux для МП семейства АРМ, находящихся на борту ПЛИС модулей обработки данных и основного контроллера.
- Уровень FlexRIO – программа в ПЛИС модуля NI FlexRIO-7966R.
- Уровень ПК – программы, библиотеки и драйвера работающие под управлением ОС Linux и CODAC Core System управляющего ПК.

Добавление интерфейса Ethernet в модули приёма и обработки данных, а также в контроллер основного крейта значительно упрощает и облегчает проверку и отладку системы в целом. Но такое решение не вписывается в общую схему управления диагностикой ИТЭР, поэтому пока в качестве основного управляющего элемента системы будет использоваться модуль FlexRIO.

ИСПЫТАНИЯ АНАЛОГОВОГО ТРАКТА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ВНК

В.М. Голачев¹, Е.Ю. Миронова¹, Г.Е. Немцев¹, С.С. Портоне¹, И.Б. Семенов¹.

¹Частное учреждение «ИТЭР-Центр» E-mail:

*V.Golachev@iterrf.ru, E.Mironova@iterrf.ru, G.Nemtsev@iterrf.ru,
S.Portone@iterrf.ru, I.Semenov@iterrf.ru*

Аналоговый тракт диагностической системы Вертикальной Нейтронной Камеры (ВНК) ИТЭР состоит из следующих элементов:

- алмазный детектор, регистрирующий потоки высокоэнергетических частицы (нейтронов, альфа-частиц и др.)
- длинный кабель связи, состоящий из двух частей: радиочастотный кабель с минеральной изоляцией (выдерживающий высокие температуры и радиационно-стойкий) и помехозащищенный коаксиальный/триаксиальный кабель;
- удаленный токовый высокочастотный усилитель, работающий на длинный кабель связи от алмазного детектора до усилителя;
- аналоговая оптическая линия гальванической развязки.

В докладе рассказано о методике испытания отдельных компонент аналогового тракта диагностической системы ВНК с целью выбора пути для проведения измерений с максимально-возможной точностью.

Аналоговый тракт системы ВНК подключается к цифровой части ВНК.

Один из вариантов цифрового тракта диагностической системы ВНК представлен на этой конференции в докладе: В.М. Голачев, Е.Ю. Миронова, Г.Е. Немцев, С.С. Портоне, И.Б. Семенов «Экспериментальное исследование тракта измерительного канала

сигнала от алмазного детектора с применением спектрометров различного типа».

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

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАКТА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА СИГНАЛА ОТ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕКТРОМЕТРОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

В.М. Голачев¹, Е.Ю. Миронова¹, Г.Е. Немцев¹, С.С. Портоне¹, И.Б. Семенов¹.

¹ Частное учреждение «ИТЭР- Центр» E-mail:

*V.Golachev@iterrf.ru, E.Mironova@iterrf.ru, G.Nemtsev@iterrf.ru,
S.Portone@iterrf.ru, I.Semenov@iterrf.ru*

Точность измерений плотности нейтронного потока и восстановления профиля нейтронного источника в полоидальном сечении плазмы на установке ИТЭР диагностической системой Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК) зависит от работы отдельных элементов, входящих в ее состав. Всего ВНК состоит из 48 измерительных каналов. Оконечным устройством каждого канала является спектрометр.

Рассмотрено применение двух вариантов спектрометра, разработанных институтом ядерной физики имени Г.И. Будкера при участии Частного учреждения Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

В предлагаемой работе, на алмазный детектор воздействовали альфа частицы радиоактивного калиброванного альфа-источник ²³⁸Pu (5,5 МэВ). После преобразования заряда, полученного в алмазном детекторе в результате воздействия альфа-частицы, в импульс напряжения, происходит усиление и оцифровка сигнала с подачей его на спектрометр. Использовались два типа разработанных спектрометров: один работает по амплитудным значениям импульсов сигналов, а другой по измеренным площадям этих импульсов.

Проведены сравнительные измерения одного и того же

сигнала разными спектрометрами. Экспериментально выявлены плюсы и минусы каждого типа спектрометров. Даны рекомендации для дальнейшей работы.

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

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

Джурик А.С., Воробьев В.А., Кормилицин Т.М., Ковалев А.О.,
Обудовский С.Ю., Кашук Ю.А.,

Частное учреждение «ИТЭР-Центр»

В работе представлено описание алгоритма и разработанного программного обеспечения для обработки сигналов нейтронного спектрометра на основе органического сцинтиллятора, создаваемого для токамака-реактора ИТЭР.

В состав спектрометра входит:

- Детекторный узел:
- Фотоумножитель Hamamatsu R6231-100;
- Кристалла стильбена размером 40x40 мм;
- Регистратор:
- АЦП Spectrum M4i.4450-x8;
- Программное обеспечение SBench.
- Для обработки данных, полученных с помощью спектрометра, разработано программное обеспечение Pulse Shape Visual. Программа построена на принципе анализа сигналов спектрометра по форме импульса, что позволяет разделять нейтроны и гамма-кванты.
- Программа Pulse Shape Visual позволяет:
- Просматривать данные получаемые при помощи регистратора сигналов;
- Обработать данные в соответствии с алгоритмом разделения;

- Строить амплитудные спектры сигналов, вызванных регистрацией, гамма квантов и нейтронов, выделенных из исходного амплитудного спектра сигналов;
- Сохранять данные в текстовом формате csv (разделитель табуляция).

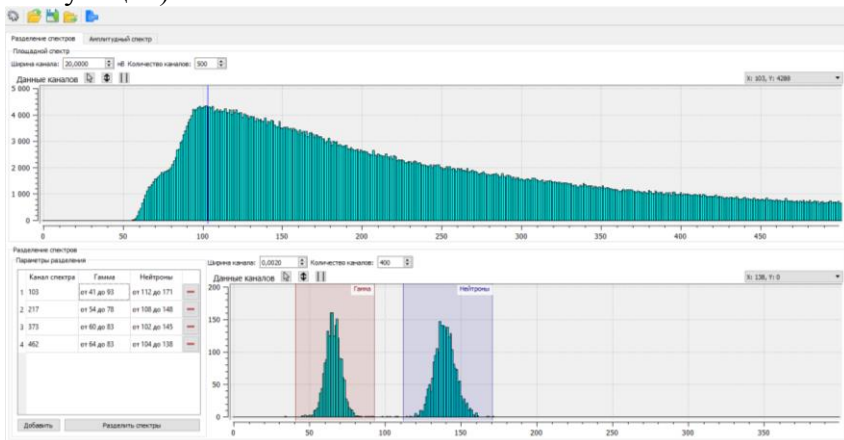


Рис. 1 Интерфейс программы Pulse Shape Visual

Измерены амплитудные спектры сигналов при регистрации нейтронного потока генератора ИНГ-07Т, изотопного источника AmBe.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ ИКД. ОБЗОР ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ И РЕЗУЛЬТАТОВ

Воробьев В.А., Джурик А.С., Обудовский С.Ю., Кашук Ю.А.

Частное учреждение «ИТЕР-Центр»

В докладе рассматриваются инструментальные средства измерительного канала ионизационной камеры деления (ИКД). Измерительный канал используется при исследовании характеристик детекторных узлов нейтронного потока диагностики ДМНП ИТЭР.

Измерительный канал состоит из собственно ИКД как детектора нейтронов, кабеля передачи сигналов ИКД, усилителя сигналов ИКД и регистратора. Также в состав инструментальных средств включено программное обеспечение обработки записей сигналов ИКД.

Приведено аналитическое выражение сигнала ИКД, рассмотрено влияние характеристик компонентов канала на регистрируемый сигнал. Обсуждаются результаты работ [Л] по измерению времени сбора и заряда в импульсе ИКД. Обсуждаются возможности калибровки флуктуационного измерительного канала при малых нагрузках, а также построение имитатора сигналов ИКД.

В данном докладе отображены результаты работ, выполненных в период 2017-2019 г.. Работа профинансирована Росатомом в рамках государственных контрактов № Н.4а.241.9Б.17.1001, № Н.4а.241.19.18.1027 и № Н.4а.241.19.19.1009.

[Л] В. А. Воробьев, С. Ю. Обудовский, Ю. А. Кашук. Методика определения времени сбора заряда и среднего заряда в импульсе

ионизационной камеры деления. Измерительная техника, 2019, №2, стр.60-65.

АНАЛИЗ ШУМОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАКТАХ КАНАЛА КОНТРОЛЯ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА

Мартазов Е.С.¹, Воробьев В.А.²

¹*Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"*

²*Частное учреждение «ИТЭР-Центр»*

Плотность потока нейтронов является основным источником информации об интенсивности и мощности ядерной реакции в различных ядерных установках. Чем более чувствительный канал контроля нейтронного потока, тем более низкую плотность потока нейтронов можно измерить. Но с увеличением чувствительности канала к полезному сигналу увеличивается также чувствительность к помехам и возрастает влияние собственных шумов.

В докладе рассматриваются результаты анализа двух вариантов построения предварительного усилителя сигналов ионизационной камеры деления. Предварительные усилители являются составной частью системы сбора данных диагностики «Диверторный монитор нейтронного потока» установки ИТЭР [1] и в значительной степени определяют работу ее счетных и флуктуационных измерительных трактов.

Оба варианта усилителей обеспечивают дифференциальное подключение ионизационной камеры деления. Первый вариант усилителя построен на базе инвертирующих полностью дифференциальных усилителей. Второй вариант построен по смешанной схеме с применением неинвертирующих усилителей и дифференциального каскада усиления.

Приведены требования к усилителям в части усиления и полосы пропускания, а также к коэффициенту подавления синфазного сигнала. Приведены результаты расчета АЧХ и шумовых характеристик реальных схем. Проведено сравнение

расчетных и фактических характеристик прототипов предварительных усилителей при подключении имитатора камеры деления. В докладе приводятся характеристики каждой из схем преобразования и обсуждаются их преимущества и недостатки. Данный доклад рассматривает влияние собственных шумов преобразователей и усилителей, но не рассматривает влияние шумов детектора и линии связи.

Литература.

- [1]. ФЕДОРОВ В. А., КАЩУК Ю. А., МАРТАЗОВ Е. С., ПАРЫШКИН Ю. А., СЕЛЯЕВ Н. А., ВОРОБЬЕВ В. А.; СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ ДИВЕРТОРНОГО МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО ПОТОКА УСТАНОВКИ ИТЭР; IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE; 2018; ТОМ 65; НОМЕР 9; СТРАНИЦЫ 2392 - 2397.

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ССД ДМНП

Селяев Н.А.¹, Федоров В.А.¹, Воробьев В.А.², Кашук Ю.А.²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Частное учреждение «ИТЭР-Центр»

Система сбора данных (ССД) является составной частью нейтронной диагностики «Диверторный монитор нейтронного потока» (ДМНП). К системе подключаются три модуля детектирования, содержащие по шесть ионизационных камер деления (ИКД) с различными материалами радиатора и чувствительностью к нейтронному потоку. ССД обеспечивает питание ИКД и обработку сигналов с вычислением плотности нейтронного потока в месте размещения модуля детектирования, передачу информации в системы верхнего уровня (CODAC), диагностику измерительных каналов.

Все 18 измерительных каналов системы имеют идентичную структуру и обеспечивают обработку сигнала ИКД (выходного сигнала предусилителя) по четырем независимым измерительным трактам: импульсному, флуктуационному, импульсно-флуктуационному и токовому. Для каждого тракта приводятся:

- описание принципа работы;
- функциональная схема с выделением аппаратно и программно реализованных функций;
- основные характеристики, включая функции преобразования, диапазоны работы и погрешности измерений;
- алгоритмы обработки сигналов;
- описание процедур проверки работоспособности (самодиагностика).

Сигналы всех трактов одного измерительного канала через нормирующие коэффициенты приводятся к одному

контролируемому параметру - приведенной скорости счета, что позволяет проводить сопряжение статических характеристик (сигналов) трактов с различными информативными параметрами как для отдельной ИКД, так и модуля детектирования в целом. В докладе обсуждаются:

- функции вычисления плотности потока нейтронов, включающие описание исходных данных, подготовку данных для вычисления плотности потока нейтронов;

- алгоритмы исключения сигналов трактов, которые не соответствуют диапазону работы или запрещены оператором и/или системой самодиагностики;

- алгоритм исключения выбросов в результатах измерений по трактам;

- алгоритм определения весовых коэффициентов для сопряжения сигналов,

- алгоритмы вычисления приведенной скорости счета, плотности потока нейтронов и неопределенности результата измерений.

Представлены результаты проверки работы алгоритмов обработки сигналов при лабораторных испытаниях прототипа модуля ССД ДМНП.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРИЕМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ССД ДМНП

Аляев И.В., Парышкин Ю.А.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Представленный программно-аппаратный комплекс разработан для системы сбора данных диверторного монитора нейтронного потока (ССД ДМНП) и предназначен для автоматизации процесса проверки работоспособности оборудования системы и проведения процедуры приема-сдаточных испытаний.

Процесс проверки работоспособности системы и процедура приема-сдаточных испытаний состоит из ряда этапов, включающих проверку характеристик измерительных трактов, проверку работоспособности самодиагностики системы, а также проверку параметров электробезопасности. Для реализации всех проверок используется большое количество измерительного оборудования, как стандартного (осциллографы, генераторы, источники-измерители тока), так и нестандартного типа (линии связи и устройства сопряжения компонентов системы со стандартным оборудованием). Для реализации задачи автоматизации используемое оборудование имеет интерфейсы связи с персональным компьютером, такие как USB, GPIB, LAN, PCIe и RS-232. Программное обеспечение позволяет проводить операции по проверке работоспособности и функционированию системы в ручном и автоматизированном режимах. На экране дисплея персонального компьютера отображается информация о формируемых воздействиях и измеренных величинах, а в результате автоматизированной проверки формируется отчет.

Основным инструментом для проверки работоспособности и контроля характеристик измерительных трактов и каналов системы является имитатор сигналов ионизационных камер.

Имитатор сигналов ионизационных камер позволяет воспроизводить следующие сигналы и режимы работы:

- регулярные импульсы заданной формы и длительности с постоянной частотой следования;
- случайные по времени возникновения импульсы заданной формы и длительности;
- широкодиапазонный режим воспроизведения сигналов, сочетающий режим воспроизведения случайных по времени возникновения импульсов заданной формы и длительности и режим воспроизведения постоянной составляющей тока ионизационной камеры деления;
- амплитуда импульсов может быть как постоянной, так и случайной с заданным законом распределения;
- интервалы времени между импульсами при воспроизведении случайного сигнала подчиняются экспоненциальному распределению.

Имитатор состоит из генератора сигналов произвольной формы NI PXIe-5451, модуля FPGA NI 7966R и блока преобразования сигналов напряжения в сигналы тока.

При работе со случайными сигналами расчет моделируемого сигнала ионизационной камеры производится в FPGA NI 7966R в реальном времени при предварительно сгенерированном файле со случайным количеством импульсов, определяющим заданную скорость счета. Воспроизведение сигнала осуществляется с помощью генератора сигналов NI PXIe-5451.

Преобразование сигналов напряжения генератора в токовые сигналы, имитирующие выходные сигналы ионизационной камеры деления, осуществляется в блоке преобразования сигналов напряжения в ток (БПНТ). БПНТ содержит «быстрые» преобразователи выходного дифференциального сигнала напряжения в дифференциальный сигнал тока для имитации работы ионизационной камеры в импульсном и флуктуационном режимах и «медленные» преобразователи выходного сигнала

напряжения генератора в сигнал тока для имитации работы ионизационной камеры в токовом режиме.

Для формирования «быстрых» и «медленных» сигналов используются два независимых канала генератора, что позволяет одновременно формировать флуктуационный и токовый режимы работы ионизационной камеры. Таким образом, имитатор способен формировать сигналы, имитирующие выходные сигналы ионизационной камеры, во всем диапазоне их работы. Это позволяет проверять не только функционирование каждого тракта в отдельности, но и функционирование алгоритма сопряжения выходных сигналов трактов одного канала.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДМНП ПРОЕКТА ИТЭР

Парышкин Ю.А.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Программное обеспечение ДМНП предназначено для сбора и обработки информации, получаемой от РХИ системы, а также калибровки, конфигурирования и контроля рассчитываемых параметров. Доклад содержит краткое описание архитектуры программного обеспечения ДМНП. Рассмотрена структура базы данных EPICS, NDS драйвер для обмена между верхним и нижним уровнем, приведены ОП экраны оператора для взаимодействия с программным обеспечением системы и кратко описаны функции самодиагностики измерительных каналов.

Требования ИТЭР к разработке программного обеспечения включают использование определенных средств разработки, в частности базы данных реального времени EPICS и среды разработки и проектирования Control System Studio. Временной интервал между получаемыми данными не более 1 мс. Обязательным является формирование сигналов сигнализаций по отказам системы с точным временем возникновения отказа. Также одно из основных требований отсутствие скрытых данных и формирование полной архивной информации из «сырых данных». При построении системы необходимо использовать оборудование из каталога ИТЭР.

В данном докладе приведены ограничения существующих обязательных средств разработки и описаны способы получения результатов на существующих средствах разработки, чтобы удовлетворять требованиям ИТЭР.

Основные части программного обеспечения NDS драйвер для связи и управления оборудованием системы, база данных EPICS, визуальные экраны оператора и средства диагностики. Одна подсистема на «быстром» контроллере собирает данные с 6 ионизационных камер, производит обработку «сырых данных», сохраняет данные в архив по сети DAN, отправляет данные внешним системам по сети SDN с требуемой частотой дискретизации. К каждому срезу полученных системой данных прикрепляются данные платы реального времени с абсолютным временем для синхронизации измерительной информации от различных систем. В программном обеспечении реализованы алгоритмы пошаговой диагностики измерительных трактов как в ручном, так и в автоматическом режиме. Для сохранения «сырых» данных с АЦП для каждого измерительного тракта используется режим цифрового осциллографа. При выполнении самодиагностики тестовые воздействия подаются на входные цепи предварительных усилителей через встроенные токозадающие резисторы. Проверка охватывает все узлы измерительных трактов за исключением ИКД, которые при проведении проверки не отключаются.

Период дискретизации ЦАП составляет 8 нс. Частота дискретизации может быть уменьшена при помощи установки значения делителя частоты.

Установка программного обеспечения выполняется по требованиям ИТЭР. Все исходные коды программного обеспечения загружаются с SVN репозитория и компилируются.

Результаты лабораторных испытаний программного обеспечения приведены в докладе в виде графиков сохраненных архивных данных и таблиц. Приведены экраны оператора для настройки и конфигурирования системы. Предложены граничные условия для диагностирования измерительных трактов на основе лабораторных испытаний. Представлены результаты самодиагностики измерительных трактов с помощью встроенного ЦАП.

ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ НА ИМПУЛЬСНОМ РЕАКТОРЕ ИБР-2

Обудовский С.Ю., Джурик А.С., Воробьев В.А., Кашук Ю.А.

Частное учреждение «ИТЭР-Центр»

В работе представлены результаты измерения плотности потока тепловых нейтронов на импульсном реакторе ИБР-2 в Объединенном Институте Ядерных Исследований в г. Дубна с использованием макета системы сбора данных диагностики ДМНП.

Состав макета:

- 3-х канальная система регистрации сигналов;
- детекторный узел с опытным образцом ионизационной камеры деления КНТ30-5.

ИБР-2 импульсный реактор периодического действия. Модуляция реактивности на установке обеспечивается подвижными отражателями.

Таблица 1. Характеристики реактора ИБР-2

Средняя мощность, МВт	2
Частота следования импульсов, Гц	5; 10
Плотность потока тепловых нейтронов с поверхности замедлителя: - усредненная по времени - максимум в импульсе	$\sim 10^{13}$ н/см ² ·сек $\sim 10^{16}$ н/см ² ·сек

Детекторный узел содержит 3-хсекционную ионизационную камеру деления КНТ30-5 с радиатором U-235 (обогащение 90%). Детекторный узел имеет жаропрочный радиационно-стойкий кабель с минеральной изоляцией, при помощи которого он соединяется с 3-х канальным макетом системы регистрации сигналов ДМНП. Длина линии связи ~30 м.

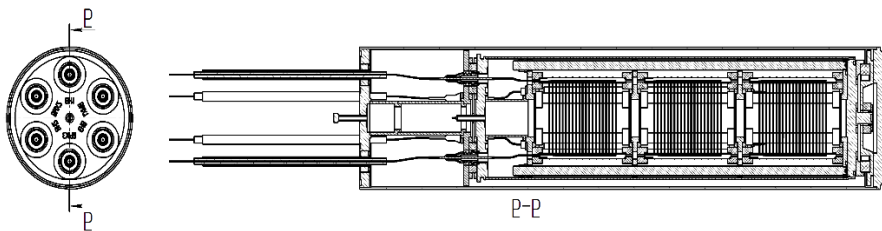


Рис. 1. Детекторный узел с опытным образцом ионизационной камеры деления КНТ30-5

Измерения плотности нейтронного потока были выполнены по следующему сценарию:

- Измерения при выводе реактора на мощность 400 кВт (40 минут);
- Измерения при постоянной мощности реактора 400 кВт (30 минут);
- Измерения при выводе реактора на минимальную контролируемую мощность (40 минут).

В результате работы подобраны алгоритмы работы с 3-х канальным макетом системы регистрации сигналов ДМНП и измерена плотность нейтронного потока в месте расположения детекторного узла.

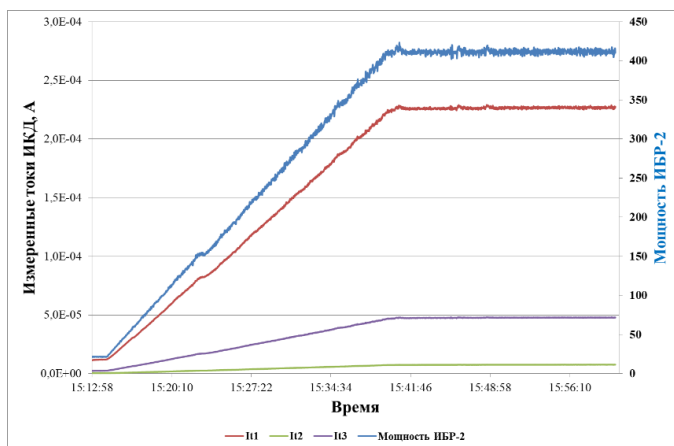


Рис. 2 График изменения токов ИД при поднятии мощности реактора ИБР-2

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке

специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 году».

НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ В ФОТОХРОНОГРАФАХ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСОВ В ДИАПАЗОНЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ 10^{-13} - 10^{-8} СЕКУНДЫ

Душина Л.А., Корниенко Д.С., Кравченко А.Г., Литвин Д.Н.,
Мисько В.В., Стародубцев К.В., Тараканов В.М.

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл. пр. Мира
37, 607190*

[oefimova@otd13.vniief.ru](mailto: oefimova@otd13.vniief.ru)

Проблема увеличения динамического диапазона регистрации оптических импульсов с помощью электронно-оптических преобразователей (ЭОП) стоит давно. Этот параметр достигает уровня ≈ 100 , в лучших образцах – не более 1000. По мере усложнения методик потребовалось достижение сочетания высокого временного, пространственного разрешений и динамического диапазона. Прежние методы расширения динамического диапазона (использование всей временноанализирующей щели, параллельная регистрация нескольких ранжированных сигналов), стали не пригодны, возросла актуальность увеличения ДД собственно прибора. К таким методикам следует, прежде всего, отнести методику многоканальных измерений длительности и разновременности прихода на мишень лазерных импульсов [1] и методику измерения скорости ударной волны в экспериментах по изучению ударной сжимаемости веществ [2]. Кроме того, при работе с профилированным лазерным импульсом требования по динамическому диапазону составляют $ДД \geq 10^3$ при сохранении временного и пространственного разрешения на уровне $\tau \sim 100$ пс и $d \sim 100$ мкм соответственно.

Эффект снижения динамического диапазона фотохронографов при регистрации импульсов длительностью в единицы наносекунд и менее известен давно. На эту тему существует ряд работ [3, 4, 5]. Качественно было понятно, что нелинейные искажения и ограничение динамического диапазона наступает из-за возмущения фокусирующего электростатического поля, возникающего вследствие необходимости работы на коротких развертках с большими плотностями тока фотоэлектронов. Существовали работы, в основном экспериментального характера, в которых в качестве критерия в оценке возникновения искажений использовалась величина плотности фототока. Однако, для одного и того же типа электронной оптики (ЭОП типа ЗИМ, УМИ, ПИМ) различие в этом параметре составляло от $j_{\max}=2 \text{ мА/см}^2$ [6] до $j_{\max}=20 \text{ мА/см}^2$ [7]. Повидимому, это различие обусловлено разной длительностью лазерных импульсов, с которыми работали авторы. Не было единой простой аналитической модели, позволяющей описать разные типы нелинейных искажений. Возможно, эти процессы можно учесть в существующих у разработчиков ЭОП программах расчета электронной оптики. Если учесть, что подобный расчет нужен для условий каждого конкретного эксперимента, то становится понятной актуальность подобной модели, позволяющей наметить пути повышения динамического диапазона регистрации, находить для каждого эксперимента оптимальное соотношение между требованиями по пространственному, временному разрешению и динамическому диапазону.

Уровень входного сигнала, при котором возникают искажения, определяется конструкцией ЭОП, типом электронной оптики, а также технологией формирования фотокатода. Так известным способом повышения динамического диапазона ЭОП является формирование фотокатода на электропроводящей подложке [8]. Представленная методика оценки искажений учитывает перечисленные факторы, а также условия эксперимента: длительность развертки, временное и пространственное разрешения, длительность регистрируемого процесса. Модель прошла экспериментальную проверку на различных типах ЭОП с

катодами S1 и S20 на проводящей подложке и с фотокатодом S1 без подложки. Изучалось влияния различных факторов на динамический диапазон фотохронографов.

Литература.

- [1]. Е.Н. ВОРОНЦОВ, А.Г. КРАВЧЕНКО, Г.П. ОКУТИН. ДИАГНОСТИКА ФИЗИЧЕСКОГО ТАУТОХРОНИЗМА НА МНОГОКАНАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ «ИСКРА-5». КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, Т. 21, №10, 1994.
- [2]. БЕЛЬКОВ С.А., КРАВЧЕНКО А.Г., КУНИН А.В., ЛИТВИН Д.Н., МУРУГОВ В.М., СЕНИК А.В. ПТЭ. 2006. № 2. С. 150.
- [3]. М.М. БУТСЛОВ. О ВРЕМЕННОМ РАЗРЕШЕНИИ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТИПА ПИМ-УМИ. ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА. М., НАУКА. 1976Г.
- [4]. В.М. ЕФИМОВ, А.М. ИСКОЛЬДСКИЙ, Ю.Е. НЕСТЕРИХИН. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ФОТОСЪЕМКА В ФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ. НОВОСИБИРСК, НАУКА, 1978Г.
- [5]. М.М. БУТСЛОВ, Б.М. СТЕПАНОВ. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ. М., НАУКА, 1978Г.
- [6]. М.М. БУТСЛОВ. НИЗКООМНЫЕ ПОЛУПРОЗРАЧНЫЕ СЕРЕБРЯНО-ЦЕЗИЕВЫЕ ФОТОКАТОДЫ. М., НАУКА, 1976.
- [7]. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ, УСИЛИТЕЛИ ЛУЧИСТЫХ ПОТОКОВ И ДИССЕКТОРЫ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. СПРАВОЧНИК ПОД РЕДАКЦИЕЙ Б.М. СТЕПАНОВА. М., АТОМИЗДАТ, 1977.
- [8]. А.Г. БЕРКОВСКИЙ, В.А. ГАВАНИН, И.Н. ЗАЙДЕЛЬ. ВАКУУМНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ. М., РАДИО И СВЯЗЬ, 1988Г. С. 112.

СПИСОК УЧАСТНИКОВ КОНФЕРЕНЦИИ

Ф. И. О.	Место работы	E-mail, телефон
Mickaël Portalès	Фирма «Конвексум»	mpo@convexum.fr
АЛЯЕВ Иван Васильевич	НИЯУ "МИФИ"	alyaeviv@gmail.com , +7 495 788 56 99*9228
АМОСОВ Владимир Николаевич	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	amosov@trinity.ru , +7 499 281 72 27
АНДРЕЕНКО Евгений Николаевич	УТС-Центр, НИЦ "Курчатовский Институт"	andreenkoyn@mail.ru , +7 499 196 70 46
АРТЕМЬЕВ Кирилл Константинови ч	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	K.Artemev@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
АФОНИН Александр Юрьевич	АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", УТС- Центр	aleksandr.afonin@phystech.edu , +7 985 803 75 61
АФОНИН Кирилл Юрьевич	АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", УТС- Центр	kirill.afonin@phystech.edu , +7 985 803 75 92
БАБИНОВ Никита Андреевич	ФТИ им. А.Ф. Иоффе	n.babinov@mail.ioffe.ru , +7 911 154 09 42
БАРЬКОВ Иван Анатольевич	АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ"	barykov@trinity.ru , +7 906 750 92 82
БЕГРАМБЕКО В Леон Богданович	НИЯУ "МИФИ"	lbb@plasma.mephi.ru
БУДАЕВА Валерия Владимировна	МГТУ им. Н.Э. Баумана	valeria.budaeva@yandex.ru , +7 985 459-55-76

ВЕРВЕЛАКИС Георгиос Менелаосович	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	G.Vervelakis@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
ВОРОБЬЕВ Вячеслав Анатолевич	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	v.vorobiov@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
ВУКОЛОВ Константин Юрьевич	НИЦ "Курчатовский Институт"	Vukolov_KY@nrcki.ru , +7 499 196 96 90
ВЫСОКИХ Юлия Геннадьевна	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	J.Vysokih@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
ГАВРИЛЕНКО Дмитрий Евгеньевич	ИЯФ СО РАН	D.E.Gavrilenko@inp.nsk.su , +7 923 234 11 50
ГОЛАЧЕВ Владимир Михайлович	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	V.Golachev@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
ГОРБУНОВ Алексей Викторович	НИЦ "Курчатовский Институт"	alexeygor@mail.ru , +7 926 209 54 34
ГОРШКОВ Алексей Владимирович	НИЦ "Курчатовский институт"	Gorshkov_AV57@mail.ru , +7 499 196 77 82
ГРИНЕМАЙЕР Константин Андреевич	Новосибирский государственный технический университет	kgrinemayer@gmail.com
ДАНИЛОВ Валерий Вячеславович	Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН	wdivurs@gmail.com

ДЖУРИК Андрей Сергеевич	АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	adzburik@triniti.ru +7 926 836 10 35
ДМИТРИЕВ Артем Михайлович	ФТИ им. А.Ф. Иоффе	artem.dmitriev@yandex.ru +7 952 214 66 12
ДРАПИКО Евгений Анатольевич	НИЦ "Курчатовский Институт", УТС-Центр	e.drapiko@fc.iterru.ru +7 499 196 91 61
ДУШИНА Ляна Александровна	РФЯЦ ВНИИЭФ	dushinala@gmail.com +7 83130 20410
ЖУРАВЛЕВ Михаил Кириллович	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	M.Zhuravlev@iterrf.ru +7 499 281 72 27
ЗВОНАРЕВА Анжела Александровна	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	A.Zvonareva@iterrf.ru +7 499 281 72 27
ЗИМИН Александр Михайлович	МГТУ им. Н.Э. Баумана	zimin_am@bmstu.ru +7 499 263 65 70
ЗУБАРЕВ Петр Васильевич	Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН	p_v_zubarev@ngs.ru
ИЛЬЯСОВА Маргарита Вадимовна	ФТИ им. А.Ф. Иоффе	margaritavadimovna@gmail.com , +7 911 845 08 03
КАПУСТИН Юрий Владимирович	УТС-Центр	89851332125@yandex.ru , +7 985 133 21 25

КАЩУК Юрий Анатольевич	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	Y.Kashchuk@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
КЛЮЧНИКОВ Леонид Александрович	НИЦ "Курчатовский Институт"	lklyuchnikov@list.ru , +7 916 481 17 77
КОВАЛЕВ Андрей Олегович	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	A.Kovalev@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
КОЗЛОВ Андрей Михайлович	УТС-Центр	a.kozlov@fc.iterru.ru , +7 916 857 55 79
КОРМИЛИЦЫН Тимофе Михайлович	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	T.Kormilitsyn@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
КОРНЕВ Владимир Александрович	ФТИ им. А.Ф. Иоффе	Vladimir.Kornev@mail.ioffe.ru и, +7 911 996 02 27
КОРНИЕНКО Дмитрий Сергеевич	РФЯЦ ВНИИЭФ	w_ds@mail.ru , +7 83130 20789
КРАСИЛЬНИКО В Анатолий Витальевич	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	A.Krasilnikov@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
КРАСИЛЬНИКО В Виталий Анатольевич	От Центральной Организации ИТЭР	Vitaly.Krasilnikov@iter.org
КУДРЯВЦЕВ Александр Витальевич	НИЯУ "МИФИ"	rpt_avk@mail.ru , +7 916 121 90 31
КУМПИЛОВ Давлет Асланбиевич	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	D.Kumpilov@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
КУРНАЕВ Валерий Александрович	НИЯУ "МИФИ"	kurnaev@plasma.mephi.ru

КУРСКИЕВ Глеб Сергеевич	ФТИ им. А.Ф. Иоффе	gleb.kurskiev@gmail.com , +7 903 092 67 15
ЛЕТУНОВ Александр Алексеевич	Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН	let@fpl.gpi.ru , +7 499 503 8777*248
ЛИСТОПАД Александр Алексеевич	ИЯФ СО РАН	a.a.listopad@inp.nsk.su , +7 383 329 41 02
МАРТАЗОВ Евгений Сергеевич	НИЯУ "МИФИ"	martazov@list.ru , +7 903 115 90 88
МЕЛЬНИК Андрей Дмитриевич	ФТИ им. А.Ф. Иоффе	amelnik@npd.ioffe.ru , +7 921 331 25 15
МЕЩАНИНОВ Сергей Анатольевич	АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	S.Meshaninov@iterrf.ru
МЕЩЕРЯКОВ Алексей Иванович	Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН	meshch@fpl.gpi.ru , +7 499 503 87 77*340
МИРОНОВ Андрей Юрьевич	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	A.Mironov@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
МИРОНОВА Екатерина Юрьевна	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	E.Mironova@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
МУНТЯН Александр Николаевич	РФЯЦ ВНИИЭФ	sasha.muntyan@inbox.ru

МУХИН Евгений Евгеньевич	ФТИ им. А.Ф. Иоффе	e.mukhin@mail.ioffe.ru , +7 950 007 87 49
НАВОЛОЦКИЙ Андрей Сергеевич	ФТИ им. А.Ф. Иоффе	anavolotsky@mail.ioffe.ru , +7 812 297 22 45
НАГОРНЫЙ Никита Васильевич	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	N.Nagorny@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
НЕМЕЦ Антон Ролланович	НИЦ "Курчатовский Институт"	nemets_ar@nrcki.ru , +7 499 196 16 11
НЕМЦЕВ Григорий Евгеньевич	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	G.Nemtsev@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
НЕРУШ Максим Николаевич	НИЦ "Курчатовский Институт"	1340116@gmail.com , +7 916 957 96 40
НИКОЛАЕВА Валентина Евгеньевна	НИЯУ "МИФИ"	venikolaeva@mephi.ru , +7 964 774 24 31
ОБУДОВСКИЙ Сергей Юрьевич	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	S.Obudovsky@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
ОРЛОВСКИЙ Илья Игоревич	НИЦ "Курчатовский Институт"	orlovskiy_ii@nrcki.ru , +7 903 759 38 57
ПАРЫШКИН Юрий Алексеевич	НИЯУ "МИФИ"	papbox@mail.ru , +7 495 788 56 99*9228
ПЕТРОВ Владимир Георгиевич	АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", УТС-Центр	vpetrov@triniti.ru , +7 495 841 50 58
ПИНЖЕНИН Егор Игоревич	ИЯФ СО РАН	e.i.pinzhenin@inp.nsk.su , +7 383 327 42 24

ПИСАРЕВ Александр Александрович	НИЯУ "МИФИ"	pisarev@plasma.mephi.ru
ПИЩУЛИНА Полина Александровна	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	P.Pischulina@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
ПОРТНОВ Дмитрий Владиславович	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	D.Portnov@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
ПОРТОНЕ Сергей Сергеевич	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	S.Portone@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
ПУРЫГА Екатерина Александровна	ИЯФ СО РАН	gvinkate@gmail.com
РОДИОНОВ Николай Борисович	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	rodionovnb@gmail.com , +7 499 281 72 27
РОДИОНОВ Роман Николаевич	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	R.Rodionov@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
РОДИОНОВА Валентина Петровна	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	v.rodionova@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
РОМАНОВА Наталья Михайловна	РФЯЦ ВНИИЭФ	natusromashka@mail.ru , +7 83130 247 88
САМСОНОВ Дмитрий Сергеевич	ФТИ им. А.Ф. Иоффе	d.samsonov@mail.ioffe.ru , +7 951 665 38 87
СЕМЕНОВ Евгений Владимирович	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	E.Semenov@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
СЕМЕНОВ Игорь Борисович	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	I.Semenov@iterrf.ru , +7 499 281 72 27

СЕМЕНОВ Олег Игоревич	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	O.Semenov@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
СОЛОВЬЁВ Никита Алексеевич	НИЦ "Курчатовский Институт"	solovev_na@nrcki.ru , +7 915 160 83 04
СОРОКИН Александр Сергеевич	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	A.Sorokin@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
СУББОТИН Георгий Федорович	НИЦ "Курчатовский Институт"	subbotingf@gmail.com , +7 926 539 33 32
СУЛЯЕВ Юлий Сергеевич	ИЯФ СО РАН	Yu.S.Sulyaev@inp.nsk.su , +7 383 329 45 75
ТАСКАЕВ Александр Сергеевич	ИЯФ СО РАН	a.s.taskaev@inp.nsk.su , +7 923 225 41 86
ТУГАРИНОВ Сергей Николаевич	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	S.Tugarinov@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
ФЕДОРОВ Владимир Алексеевич	НИЯУ "МИФИ"	VAFedorov@mephi.ru
ХАФИЗОВ Руслан Рашитович	Частное учреждение "ИТЭР-Центр"	r.khafizov@iterrf.ru , +7 499 281 72 27
ХИЛЬКЕВИЧ Евгений Михайлович	ФТИ им. А.Ф. Иоффе	evgeniy-hila@yandex.ru , +7 921 359 58 36
ШОШИН Андрей Алексеевич	ИЯФ СО РАН	shoshin@mail.ru , +7 913 393 53 20

Всероссийская конференция
«Диагностика высокотемпературной плазмы»

**ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

ISBN 978-5-89513-450-4

Подписано в печать 04.09.2019
Формат 60x84/16 Гарнитура Times New Roman
Уч. изд. листов 300. Тираж 150 экз. Заказ 12936

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