

Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения «Государственный университет имени Шакарима города Семей»  
Министерства образования и науки Республики Казахстан

УДК: 53.083.91; 53.088.6

На правах рукописи

**ЧЕКТЫБАЕВ БАУРЖАН ЖАМБУЛОВИЧ**

**Развитие методов диагностики процессов в плазме и на поверхности  
первой стенки установки токамак**

**6D072300** - Техническая физика

Диссертация на соискание степени доктора философии **PhD**

Научные консультанты:  
Д.ф.-м.н., профессор М.К. Скаков (РК)

Д.ф.-м.н., профессор В.А. Курнаев (РФ)

Республика Казахстан,  
Семей, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....</b>	<b>4</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>1 СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗМЕРЕНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ НОЛЯ ПОЛЯ И РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВИДИМОГО И ИК ДИАПАЗОНОВ НА УСТАНОВКАХ ТИПА ТОКАМАК.....</b>	<b>12</b>
1.1 Ноль-поля в установках типа токамака, расчет, верификация и оптимизация.....	12
1.2 Системы видеонаблюдения за плазмой на установках типа токамак .....	14
1.3 Диагностика ИК визуализации на установках УТС.....	16
1.3.1 Системы с классическим размещением у смотрового окна .....	18
1.3.2 Системы ИК визуализации на основе эндоскопа .....	21
1.3.3 Тепловизионные камеры для научных исследований.....	26
1.3.4 Степень черноты тела и ее влияние на точность измерения радиационных термометров.....	28
1.4 Выводы и постановка задач .....	33
<b>2 СПОСОБ ПРЯМОГО ИЗМЕРЕНИЯ НОЛЯ ПОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЦЫ ТРЕХМЕРНЫХ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА35</b>	<b>35</b>
2.1 Конструкция и устройство матрицы трехмерных датчиков Холла .....	35
2.2 Калибровка матрицы датчиков Холла .....	38
2.3 Оценка погрешности измерений .....	42
2.4 Измерение ноля поля в токамаке КТМ с использованием матрицы трехмерных датчиков Холла.....	44
2.5 Выводы по разделу.....	56
<b>3 СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА КТМ .....</b>	<b>57</b>
3.1 Разработка конструктивной концепции системы визуализации плазменного шнура и требований к ней .....	57
3.2 Разработка конструкции и элементов системы визуализации плазменного шнура токамака КТМ.....	62
3.3 Настройка, тестирование и экспериментальная отработка системы визуализации плазменного шнура.....	72
3.4 Выводы по разделу .....	76
<b>4 СПОСОБ ТЕРМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ .....</b>	<b>78</b>
4.1 Диагностика ИК визуализации токамака КТМ.....	78
4.2 Способ повышения точности термографических измерений.....	86
4.2.1 Основные принципы предлагаемого способа измерения .....	86
4.2.2 Расчетно-аналитическое обоснование возможности использования предлагаемого способа .....	89
4.2.3 Отработка схемы и режимов измерения в лабораторных условиях .....	94
4.2.4 Система синхронизации работы ИК камеры и лазера .....	100
4.2.5 Оценка точности измерения.....	102
4.3 Отработка способа термографических измерений .....	106

4.3.1 Эксперименты по отработке методики измерения на вакуумном стенде с использованием высокотемпературного нагревателя .....	106
4.3.2 Эксперименты по отработке методики измерения на ИС ППУ .....	111
4.4 Выводы по разделу .....	117
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	118
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	120
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b> .....	127
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б</b> .....	127
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В</b> .....	129

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

МОН РК	–	Министерство образования и науки Республики Казахстан
ИАЭ НЯЦ РК	–	Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан
КТМ	–	казахстанский токамак материаловедческий;
УТС	–	управляемый термоядерный синтез
ТЯР	–	термоядерный реактор;
$I_p$	–	ток плазмы
А	–	аспектное отношение
ВК	–	вакуумная камера;
ФД	–	физическая диагностика;
МГД	–	магнитогидродинамический
ЭМС	–	электромагнитная система
RF	–	катушка полоидального поля токамака;
ДНО	–	датчик напряжения обхода;
ДХ	–	датчик Холла;
В	–	магнитная индукция;
ELM	–	Edge localized modes
НИОКР	–	научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
АЧТ	–	абсолютно черное тело;
ИТЭР	–	международный термоядерный экспериментальный реактор;
ПЗС	–	прибор с зарядовой связью
ИИС	–	информационно-измерительная система
БПОС	–	блок первичной обработки сигналов
БРД	–	блок регистрации данных
ЭОП	–	электронно-оптический преобразователь
ИК	–	инфракрасный;
СО <sub>2</sub>	–	двууглекислотный;
$\varepsilon$	–	излучательная способность тела;
$\rho$	–	отражательная способность тела;
$\varepsilon\lambda$	–	монохроматическая излучательная способность тела;
$\varepsilon t$	–	полная интегральная излучательная способность тела;
$\rho\lambda$	–	монохроматическая отражательная способность тела;
$\rho t$	–	полная интегральная отражательная способность тела.
ИС ППУ	–	иммитационный стенд с плазмо-пучковой установкой

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В Республике Казахстан завершается создание токамака КТМ – установки плазменного разряда тороидального типа для исследований взаимодействия высокотемпературной плазмы с материалами первой стенки для будущих экспериментальных и промышленных установок термоядерного синтеза [1]. Установка КТМ является одним из значительных звеньев в кооперации передовых стран мира по созданию экологически чистой и безопасной термоядерной энергетики будущего. На установке КТМ должна быть получена плазма с током  $I_p=750$  кА и аспектным отношением  $A=2$ . Установок с подобным аспектным отношением до настоящего времени не создавалось, поэтому исследование физики плазмы в подобной установке также является весьма интересным. Таким образом, совершенствование и использование методов диагностики, предназначенных для измерения параметров плазменного шнура токамака КТМ и взаимодействия плазмы с исследуемыми материалами первой стенки будущих ТЯР, является очень актуальным. Несмотря на то, что все установки типа токамак объединяет общий принцип работы, каждая из них является уникальной и имеет свои конструктивные и физические особенности. Это приводит, по меньшей мере, к необходимости адаптации физических диагностик к конкретной установке, а зачастую к разработке и новых устройств.

Первые экспериментальные работы на токамаке КТМ выявили ряд особенностей конструкции вакуумной камеры [2]. Данные особенности связаны с несимметричной конструкцией вакуумной камеры и наличием массивных токопроводящих элементов (таких как диверторный стол, фланцы вакуумной камеры и др.). На начальной стадии плазменного разряда на вакуумной камере КТМ наводятся значительные токи, достигающие 100 кА. Как показали эксперименты, наличие массивных неравномерно распределенных токопроводящих элементов приводит к сложности и неточности моделирования наводимых вихревых токов на вакуумной камере и соответственно к неточности расчета конфигурации нуль поля в вакуумной камере КТМ [3]. К тому же в токамаке КТМ в силу проектных ограничений на электромагнитную систему и источники питания имеется возможность получить относительно не большое значение напряженности электрического поля на обходе не превышающее 1,6 В/м. Что вместе с относительно небольшим значением тороидального магнитного поля равным 1 Тл накладывает высокие требования на величину рассеянных полоидальных магнитных полей и размер области с так называемым нуль полем для достижения лавинного омического пробоя. Поэтому это место наиболее чувствительно к неточности моделирования, а кроме того надежное моделирование магнитных полей в этой области имеет большое значение для прогнозирования одного из необходимых условий при инициации плазменного разряда на его начальной фазе, влияющего на весь плазменный разряд. Таким образом, являлось актуальным проведение работ по

прямому измерению реального значения и конфигурации ноль поля внутри вакуумной камеры КТМ и верификации расчетных кодов.

Системы видеонаблюдения за плазмой являются неотъемлемой частью диагностического комплекса установок типа токамак. Такие системы являются одними из первых по очереди внедрения и основными, как на стадии запуска токамака, так и в последующей эксплуатации установки. Системы видеонаблюдения имеют в своем составе, как правило, не менее двух видеокамер, одна из которых является высокоскоростной, а другая медленной – высокого разрешения. Первая позволяет проводить исследования быстропротекающих процессов, а вторая имеет четкое цветное изображение плазмы и первой стенки, проводить сравнительный анализ с быстрой камерой и другими диагностиками, а так же вести наблюдения за плазмой в реальном масштабе времени.

В целом системы видеонаблюдения позволяют проводить:

- визуальное наблюдения за плазменным шнуром;
- исследовать стадии развития плазменного шнура: пробой, рост тока плазмы;
- наблюдения различных МГД неустойчивостей плазмы – типа ELM, MARFE, срывы;
- наблюдения и изучения образования и миграции пыли в плазме, краевых эффектов;
- наблюдения взаимодействия плазма-стенка;
- контроль положения плазменного шнура.

Однако в силу конструктивных и технологических особенностей – длинные диагностические патрубки (ограничивающих угол обзора), электромагнитное и нейтронное воздействие, непосредственная установка видеокамер у патрубков со смотровыми окнами затруднена или невозможна. В связи с этим приходится разрабатывать специальные оптические тракты (эндоскопические системы) для передачи изображения от входного объектива на матрицу видеокамеры. Таким образом, системы видеонаблюдения за плазмой становятся сложным комплексом технических средств, имеющим в своем составе большой набор различных оптических элементов.

В токамаке КТМ так же имеются подобные ограничения. Поскольку каждая новая создающаяся установка является уникальной и имеет свои особенности, то в каждом случае приходится решать свои отдельные проблемы по разработке и созданию диагностических систем. Конструктивная особенность вакуумной камеры КТМ связана с наличием длинных экваториальных патрубков значительно ограничивающих визуальное наблюдение за плазменным шнуром. В связи с этим требовалось использование технического решения позволяющего преодолеть проблему длинных патрубков.

Как было сказано выше, одной из основных целей создания токамака КТМ является исследование поведения кандидатных материалов первой стенки будущих термоядерных реакторов (ТЯР) под действием тепловых потоков

плазмы [4]. На строящемся в настоящее время международном экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР [5] планируется применение металлической первой стенки, выполненной из бериллия и вольфрама [5]. Также в мире активно ведутся исследования возможности использования лития в качестве материала первой стенки ТЯР [7,8].

Однако следует отметить, что до сегодняшнего дня вопрос выбора материалов первой стенки будущих стационарных энергетических термоядерных реакторов остается открытым [9]. Поэтому исследования, направленные на выбор кандидатных материалов первой стенки ТЯР удовлетворяющим теплофизическим, механическим и радиационным требованиям являются очень актуальными. Более того, актуальным является разработка прецизионных и надежных способов диагностики состояния поверхности материалов первой стенки ТЯР под действием высокотемпературной плазмы. Одним из важных контролируемых параметров при изучении взаимодействия плазма-стенка является температура нагрева поверхности обращенных к плазме материалов и значение воздействующих тепловых потоков плазмы. На токамаке КТМ максимальные тепловые потоки плазмы (до  $20 \text{ МВт/м}^2$ ) на дивертор будут соответствовать ожидаемым в ИТЭР. В связи с этим является актуальным использование средств измерения и контроля температуры нагрева поверхности исследуемых материалов под воздействием тепловых потоков плазмы.

Известно, что температуру нагрева материалов и тепловые потоки плазмы можно измерить контактными способами (термопара, зонды), а также методами бесконтактной термометрии. Преимущества контактных методов заключается в достаточной простоте метода и прямых измерениях. Однако в случае установок управляемого термоядерного синтеза и, в частности КТМ, сложность заключается в том, что установка работает в импульсном режиме, где имеют место быстрые переходные процессы, приводящие к локальному поверхностному нагреву материалов первой стенки. В случае использования термопар имеется проблема быстродействия, где необходим миллисекундный диапазон (микросекундный в случае изучения неустойчивостей и срывов). Также имеются ограничения по размещению датчика в непосредственной близости от поверхности материалов, воспринимающей тепловую нагрузку, а также весьма сложно измерить распределение температуры на поверхности материала с высоким пространственным разрешением, что требует размещения большого количества датчиков. В условиях токамака КТМ, к тому же, существуют конструктивные ограничения, связанные с наличием подвижного диверторного стола, что приводит практически к невозможности размещения датчиков с сигнальными линиями и зондов на исследуемых материалах, размещаемых на диверторном столе.

Методы оптической термометрии не требуют контакта датчика с телом, температура которого измеряется, и поэтому могут применяться там, где использование контактных способов затруднено. Методы ИК термометрии позволяют измерить очень высокие температуры. При использовании ИК

камеры можно определить картину распределения температуры на поверхности материала с высоким пространственным разрешением. При этом измерение может производиться с высоким быстродействием. Методы оптической термометрии хорошо применимы при измерении температуры поверхности тел с излучательной способностью близкой к абсолютно черному телу, а также при его заранее известном значении. На токамаках [10-16] методы бесконтактной ИК термометрии успешно использовались при измерении температуры графита, установленного в качестве материала первой стенки, поскольку его излучательная способность близка к 1.

Вместе с тем, использование металлической первой стенки приводит к проблеме точного измерения температуры ее поверхности методами оптической ИК термометрии. Это связано с тем, что металлы не являются «черными» телами, имеют малую излучательную способность, и она имеет зависимость от температуры [17,18]. Также излучательная способность зависит от состояния поверхности материала, и может меняться с течением времени как в связи с модификацией поверхности под действием излучения плазмы, так и в связи с осаждением на поверхности пылевых частиц, например частиц бериллия на диверторные пластины, изготовленные из вольфрама. При этом погрешность измерений может достигать десятков процентов, особенно в области высоких температур.

Для решения проблемы изменения излучательной способности тела в процессе нагрева поверхности и изменения его состояния для ИТЭР разрабатывается специальный двуцветный пирометр, использующий принцип пирорефлектометрии [19]. Данный метод находится на стадии НИОКР. Одним из недостатков разрабатываемой диагностики является – измерение температуры только в одной пространственной точке. Однако на поверхности металлической первой стенки и дивертора имеют место сильные градиенты температуры вследствие неравномерного распределения потоков плазмы, поэтому разработка способа измерения, позволяющего измерять пространственное распределение температуры на поверхности исследуемых материалов, в частности металлов, с высокой точностью, является крайне актуальным.

Таким образом, создание и использование специальных средств измерения позволяющих получать экспериментальные данные, обеспечивающие проведение исследований на токамаке КТМ имеет большое значение для реализации всей научно-исследовательской программы на уникальной установке.

**Целью диссертационной работы** является разработка и совершенствование средств измерения и методов диагностики плазмы для проведения исследований на токамаке КТМ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– Разработать способ прямого точного измерения конфигурации нуля магнитного поля в вакуумной камере КТМ;

- Экспериментально измерить конфигурацию нуля поля на токамаке КТМ;
- На основе полученных экспериментальных данных провести верификацию численных кодов расчета распределения полоидальных магнитных полей внутри вакуумной камеры КТМ;
- Разработать систему видеонаблюдения за плазмой КТМ;
- Провести исследование формирования плазменного шнура с использованием системы видеонаблюдения плазмы токамака КТМ;
- Разработать диагностику ИК визуализации для наблюдения за распределением температуры на поверхности исследуемых материалов на токамаке КТМ;
- Разработать способ, позволяющий повысить точность термографических измерений материалов, выполненных из металла на токамаке КТМ.

#### **Научная новизна работы:**

- Впервые разработаны устройство и способ прямого измерения конфигурации нуля поля в токамаке КТМ;
- Впервые проведена верификация расчетных кодов моделирования и восстановления распределения полоидальных магнитных полей для токамака КТМ;
- Разработана эндоскопическая система наблюдения за плазмой в видимом диапазоне для токамака КТМ;
- Разработана система ИК визуализации токамака КТМ для наблюдения за распределением температурных полей на поверхности исследуемых материалов под воздействием тепловых потоков плазмы;
- Впервые разработан способ коррекции термографических измерений температуры металлов в широком температурном диапазоне в условиях быстрого нагрева под воздействием потоков высокотемпературной плазмы.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- Способ прямого измерения конфигурации нуля магнитного поля внутри вакуумной камеры токамака КТМ с использованием матрицы трехкомпонентных датчиков Холла.
- Система визуализации плазменного шнура токамака КТМ;
- Способ измерения распределения температуры на поверхности исследуемых образцов кандидатных материалов в токамаке КТМ.

#### **Практическая значимость диссертационной работы:**

- Разработанный способ прямого измерения конфигурации нуля поля позволил провести верификацию расчетных кодов. Полученные результаты измерений были использованы для уточнения модели ЭМС КТМ, что в свою очередь повысило точность проводимых расчетов. Способ применим на других установках УТС.
- Разработанная система визуализации плазмы токамака КТМ позволила проводить видеонаблюдение за плазменным шнуром, решив проблему длинных экваториальных патрубков, и значительно расширила возможности

экспериментальных исследований на КТМ. Подобная система также может быть использована на других установках УТС.

– Предложен способ значительного повышения точности термографических измерений температуры поверхности исследуемых материалов, в частности металлов, под воздействием потоков плазмы в условиях токамака КТМ.

Акты о внедрении результатов диссертационной работы на токамаке КТМ представлены в Приложениях к диссертации.

Основные результаты работ позволили осуществить своевременную подготовку и проведение физического пуска (первого и второго этапов) токамака КТМ, а также продемонстрировать работоспособность установки на ЭКСПО 2017.

Все положения и результаты настоящей работы выполнены при финансовой поддержке грантов Государственного учреждения «Комитет науки Министерства образования и науки Республики Казахстан» в рамках Договора №2064/ГФ4 от 12.02.2015 года по теме «Разработка численной модели динамики магнитных полей в вакуумной камере токамака с учетом наведенных вихревых токов и ее верификация на конфигурациях нуля поля токамака КТМ» на 2015-2016 гг., а также Договора №305 от 30.03.2018 года по теме АР05133148 «Разработка способа термографических измерений поверхности кандидатных материалов первой стенки ТЯР и его внедрение на материаловедческом токамаке КТМ» на 2018-2020 гг, а также в рамках республиканской бюджетной программы «Прикладные научные исследования технологического характера» по мероприятию «Научно-техническая поддержка создания и эксплуатации казахстанского термоядерного материаловедческого реактора токамак» Министерства Энергетики Республики Казахстан темы «Подготовка комплекса физических диагностик и методик для определения параметров плазмы токамака КТМ» 2015-2017 гг.

#### **Личный вклад автора.**

Основные результаты и положения диссертационной работы получены и разработаны лично автором или под его руководством, а также при участии специалистов ИАЭ РГП НЯЦ РК. Анализ полученных результатов и формулировка основных выводов проведены совместно с научными консультантами.

#### **Апробация результатов диссертационного исследования.**

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на 8 международных научных конференциях:

1. 25-th IAEA Fusion Energy Conference (St. Petersburg, 2014);
2. IX международная конференция «Современные методы диагностики плазмы и их применение» (Москва, НИЯУ МИФИ, 2014)
3. X международная конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение» (Москва, НИЯУ МИФИ, 2016);
4. Всемирный конгресс инженеров и ученых (WSEC-2017, Астана);

5. VIII Международная конференция Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала (Курчатов, Казахстан, 2018);

6. 27-th IAEA Fusion Energy Conference (Ahmedabad, India, 2018);

7. 46-ая Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород, Россия, 2019);

8. 3-rd Quantitative Infrared Thermography Asian Conference (Tokyo, Japan, 2019);

а также на 4 конференциях-конкурсах, школах и совещаниях:

1. XIII конференция-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов НЯЦ РК (Курчатов, Казахстан, 2014);

2. XIV Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа (Москва, Россия, 2016);

3. 9-th IAEA Technical Meeting on Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices (IAEA Headquarters, Vienna, Austria, 2017).

4. Конкурс постерных докладов среди докторантов ГУ им. Шакарима (Семей, 2018)

Основные положения диссертации были доложены на заседании кафедры «Физики плазмы» НИЯУ МИФИ, под руководством заведующего кафедрой Курнаевым Валерием Александровичем, являющимся также зарубежным научным консультантом, а также на НТС ИАЭ и НЯЦ РК.

Кроме того, основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», на объединенных научных семинарах инженерно-технологического факультета ГУ им. Шакарима г. Семей, на Научно-техническом совете ГУ им. Шакарима г. Семей, на заседании кафедры «Физика плазмы» НИЯУ МИФИ (Москва, Россия), под руководством заведующим кафедрой Курнаевым В.А, а также на научно-техническом совете НЯЦ РК.

#### **Публикации.**

Всего по результатам изложенных в диссертации исследований опубликовано 9 статей в реферируемых научных журналах, из которых в рецензируемых научных изданиях РК, рекомендованных ККСОН – 3, в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science – 2, 1 в техническом документе МАГАТЭ.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы, всего 129 страниц, 86 рисунков, 37 таблиц и библиография из 95 наименований, 3 приложения.

# **1 СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗМЕРЕНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ НОЛЯ ПОЛЯ И РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВИДИМОГО И ИК ДИАПАЗОНОВ НА УСТАНОВКАХ ТИПА ТОКАМАК**

## **1.1 Ноль поля в установках типа токамака, расчет, верификация и оптимизация**

Как известно, начальной фазой получения плазменного разряда на токамаке КТМ [20], как и на других установках подобного типа, является омический пробой [21]. Он обеспечивается рядом условий в вакуумной камере токамака, включающих необходимое давление рабочего газа, вихревое тороидальное электрическое поле, тороидальное магнитное поле и минимум рассеянных полоидальных магнитных полей (так называемое ноль поле) в месте ожидаемого пробоя. Одним из основных условий пробоя, которое зависит от сочетания ряда взаимосвязанных параметров, является ноль-поле. Так как продольное тороидальное электрическое поле индуцируется изменением во времени тока в центральном соленоиде токамака и ноль-поле формируется путем компенсации рассеянных полей центрального соленоида магнитными полями обмоток полоидального поля токамака, то требуется обеспечить стабильность положения ноля поля при существенной динамике магнитных полей в ВК токамака во время развития пробоя. В этот период времени от изменяющихся во времени магнитных полей индуцируются существенные токи на конструктивных элементах вакуумной камеры токамака и их магнитные поля влияют сложным образом на положение и характеристики ноля поля. Особенно это сказывается на токамаках, чьи вакуумные камеры имеют несимметричную по вертикали конструкцию с множеством внутренних элементов, дивертором и патрубками. К таким установкам относится и токамак КТМ. В работе [2] показано, что наведенные токи на вакуумной камере КТМ значительно влияют на конфигурацию магнитного поля внутри камеры.

Таким образом, на уровень рассеянных полей влияет центральный соленоид, катушки полоидального поля, а также наведенные токи на вакуумной камере и других внутрикамерных элементах [22, 23].

От того насколько хорошо рассчитана и оптимизирована конфигурация ноля поля зависит, будет ли достигнут пробой и соответственно получена ли сама плазма.

Поскольку невозможно провести аналитический расчет конфигурации нуля поля от динамических токов в многоэлементной структуре, используют специальные расчетные коды для моделирования магнитных конфигураций в вакуумной камере токамака, включая ноль-поля, с учетом наведенных вихревых токов и расчета необходимого токового сценария начальной фазы получения плазмы.

В крупных научных центрах, таких как Culham centre - Великобритания (токамаки JET и MAST), Naka centre - Япония (токамак JT-60), ОАО НИИЭФА им. Ефремова — Российская Федерация, токамак KSTAR – Южная Корея и др.,

используются численные электромагнитные модели для планирования начальной фазы плазменного разряда токамака с учетом вихревых токов, например, коды TYPHOON [24] и TRANSMAK [25]. При этом важным условием проведения качественного расчета является построение адекватной модели вакуумной камеры. Для уточнения и построения модели ВК используют различные трехмерные конечно-элементные расчетные коды [26-29]. Однако в этом случае также не исключена возможность ошибки. В целом, как показывает анализ, верификацию расчетных кодов на токамаках обычно проводили по результатам измерений параметров на плазменных экспериментах или по сравнению с результатами расчетов по аналогичным кодам.

Для проверки соответствия расчетной модели с реально получаемыми результатами обычно используют электромагнитные датчики, установленные в полоидальном сечении вакуумной камеры, такие как полнообходные петли (датчики напряжения обхода) и двухкомпонентные зонды. Данные получаемые с датчиков сравнивают с расчетными значениями. Также их используют для реконструкции конфигурации магнитных полей внутри вакуумной камеры. При этом такой подход, для достижения наилучшего результата, требует отсутствия токовых элементов в области охватываемой датчиками или, по крайней мере, учета тока протекающего в них по средствам измерения. На точность измерения электромагнитных датчиков сильно влияет точность их установки.

На рисунке 1 показано поперечное сечение вакуумной камеры токамака КТМ.

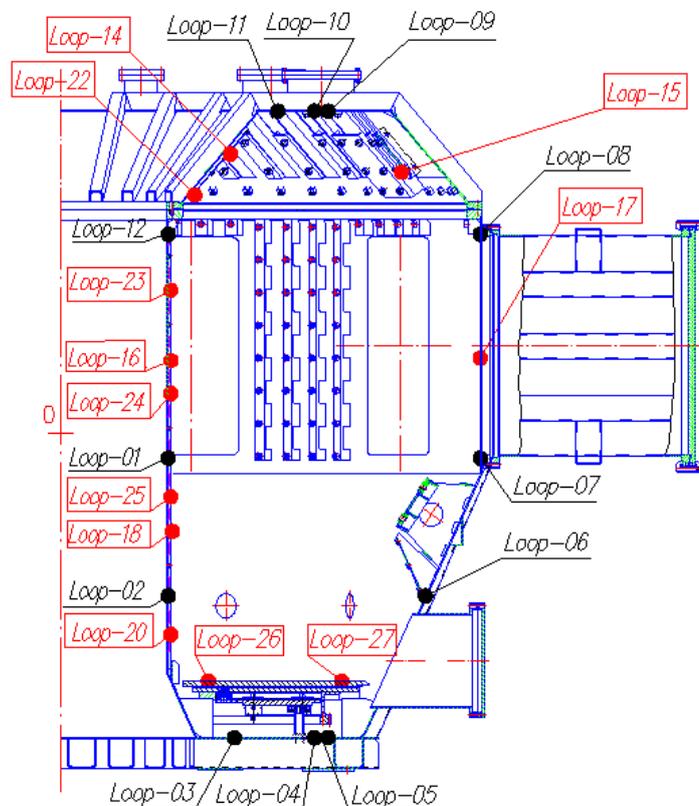


Рисунок 1 – Поперечное сечение ВК КТМ

Также на рисунке 1 показаны места расположения датчиков напряжения на обходе. Как видно из рисунка 1 внутри контура измерения имеется массивный токопроводящий элемент в виде диверторного стола. Как было показано в [2] ток на стадии инициации плазменного разряда достигает 30 кА. Из-за несимметричности полоидальной системы в витках пассивной стабилизации на стадии пробоя также имеет место ток достигающий 1-2 кА. Что также уменьшает точность восстановления магнитного поля по данным магнитных измерений с индукционных датчиков. Таким образом, верификация расчетного кода сценария пробоя по коду, использующему экспериментальные данные с магнитных датчиков в токамаке КТМ, является не точным. В работе [3] автором было показано, что имеются значительные отклонения расчетного значения магнитного поля в области предполагаемого ноля поля в токамаке КТМ, полученного с использованием восстановительного кода, по сравнению с измеренным прямым способом.

Однако, как показывает опыт для достижения наилучшего результата по оптимизации и верификации расчетного кода для условий конкретной установки самым достоверным способом является прямое измерение расчетного параметра.

Для прямого измерения конфигурации ноля поля автором была предложена методика с использованием набора миниатюрных датчиков Холла. На основе имеющегося опыта измерения магнитных полей с использованием миниатюрных датчиков Холла [3, 30], автором работы была предложена и разработана усовершенствованная методика прямого измерения магнитных полей внутри ВК в области ноля поля на основе матрицы трехмерных датчиков Холла.

Использование миниатюрных датчиков Холла для верификации численной модели предпробойной конфигурации магнитных полей в предполагаемом месте расположения ноля поля в вакуумной камере токамака, автором до сих пор не встречалось. Известны случаи использования датчиков Холла для измерения характеристик электромагнитных катушек – гофрировки тороидального магнитного поля и ошибки установки обмоток магнитной системы токамака EAST [31, 29]. Также датчики Холла использовались в качестве двухкомпонентных зондов для восстановления формы плазменного шнура во время проведения плазменных экспериментов [32, 33].

## **1.2 Системы видеонаблюдения за плазмой на установках типа токамак**

Системы видеонаблюдения за плазмой являются неотъемлемой частью диагностического комплекса установок типа токамак [34]. Такие системы являются одними из первых по очереди внедрения и основными как на стадии запуска токамака, так и в последующей эксплуатации установки. Системы видеонаблюдения имеют в своем составе, как правило, не менее двух видеокамер, одна из которых является высокоскоростной, а другая медленной – высокого разрешения. Первая позволяет проводить исследования быстропротекающих процессов, а вторая имеет четкое цветное изображение

плазмы и первой стенки, проводить сравнительный анализ с быстрой камерой и другими диагностиками, а также вести наблюдения за плазмой в реальном масштабе времени.

На современных токамаках как правило используются различные эндоскопические системы для организации видеонаблюдения за плазмой. Это связано с конструктивными и техническими ограничениями на размещение видеокамеры непосредственно у смотрового окна вакуумной камеры. Подобными ограничивающими факторами являются: длинные диагностические патрубки, значительно уменьшающие угол обзора; сильные электрические и магнитные поля, а также нейтронное и жесткое электромагнитное излучение.

На токамаке КТМ также имеются подобного рода ограничения, связанные, в первую очередь, с наличием длинных экваториальных патрубков (рисунок 2). Длина экваториального патрубка КТМ составляет около 800 мм при размерах на просвет 360x720 мм. На рисунке 3 приведен пример получаемого изображения с видеокамеры, установленной непосредственно на смотровом окне Ду80 заглушки экваториального патрубка.

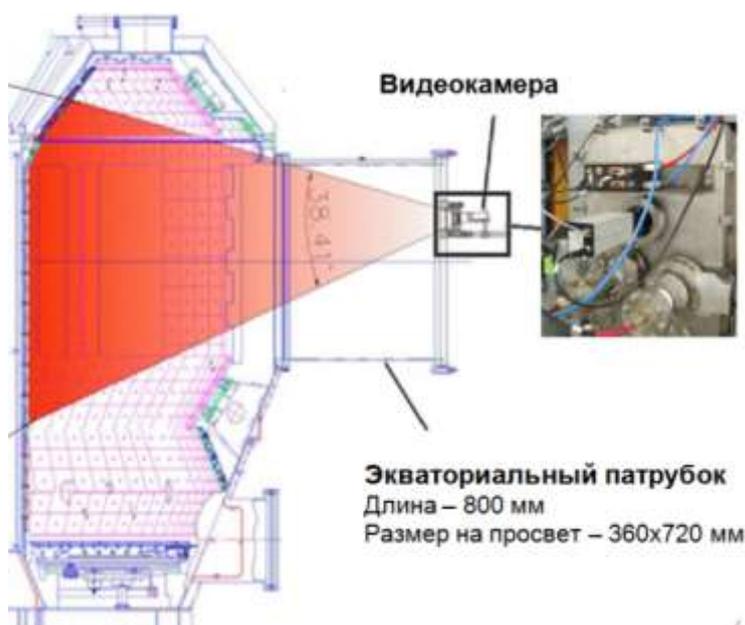


Рисунок 2 – Поперечное сечение вакуумной камеры КТМ

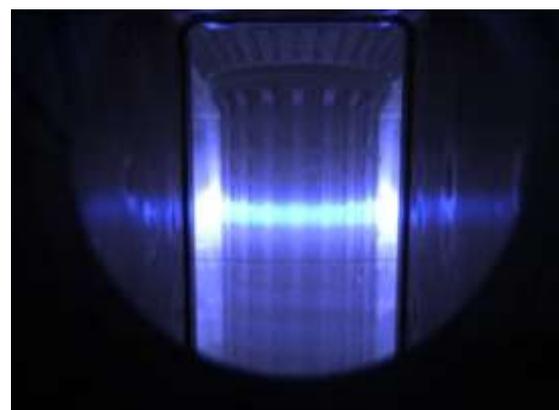


Рисунок 3 – Изображение с видеокамеры, установленной на смотровом окне экваториального патрубка КТМ

Как можно увидеть из рисунка 2 при размещении видеокамеры непосредственно на смотровом окне экваториального патрубка имеет место значительное ограничение угла обзора. Горизонтальный угол обзора ограничен настолько, что видны лишь небольшие зазоры по краям центральной колонны вакуумной камеры. Обзор по вертикали также ограничен и видна лишь центральная часть колонны ВК.

На токамаках, где конструкция вакуумной камеры и условия эксплуатации позволяют, то видеокамеру размещают непосредственно на смотровом патрубке вакуумной камеры. Как правило, это возможно реализовать на небольших установках, чаще всего низкоаспектных сферических токамаках, например, MAST, NSTX, Глобус-М [35, 36, 37].

Известны случаи размещения миниатюрных видеокамер внутри специального вакуумного смотрового патрубка, расположенного внутри диагностического патрубка. Такая схема была реализована на токамаке FTU [38]. Однако в этом случае видеокамера работает под воздействием сильных электромагнитных полей, генерируемых установкой и подвержена быстрому выходу из строя.

Наибольшее распространение получили системы видеонаблюдения с использованием приемо-передающих оптических систем на основе эндоскопа. Чаще всего используют, так называемые, жесткие эндоскопы, где в качестве оптического приемо-передающего тракта используется система линз и зеркал. Как правило, конструкция оптического тракта выбирается и рассчитывается исходя из условий наблюдения: в зависимости от ракурса наблюдения (тангенциально или поперечно плазменному шнуру), угла обзора и длины патрубка, условий работы и др. требований [39, 40].

На токамаке Tore Supra и стеллараторе TJII в качестве эндоскопа был использован гибкий оптоволоконный световод для передачи изображения [41, 42]. На стеллараторе TJII в состав системы видеонаблюдения в быструю видеокамеру был установлен усилитель яркости изображения для возможности получения изображения плазмы на отдельных длинах волн.

В настоящее время, как будет показано в следующем параграфе, все чаще разрабатываются эндоскопические системы для одновременного размещения видеокамеры видимого диапазона и инфракрасной камеры для наблюдения за нагревом элементов первой стенки.

### **1.3 Диагностика ИК визуализации на установках УТС**

Визуальное наблюдение, контроль за состоянием внутренних элементов поверхности первой стенки и исследование их поведения становятся все более и более важными с развитием программы УТС и достижением параметров плазмы необходимых для создания энергетического термоядерного реактора. Одной из важных проблем требующих решения, стал вопрос выбора материалов первой стенки, а также контроля температуры поверхности обращенных к плазме материалов. Развитие инфракрасных тепловизионных камер за последние двадцать лет позволило их широко внедрять и использовать в науке и технике. В последние годы системы визуализации инфракрасного диапазона на основе тепловизионных камер получили широкое распространение на действующих установках по исследованию высокотемпературной плазмы. Они используются для наблюдения и контроля температуры элементов дивертора и первой стенки, изучения процессов нагрева, охлаждения и стойкости кандидатных материалов при взаимодействии

плазма-стенка, а также для восстановления значения тепловых потоков поступающих с плазмы. Системы ИК визуализации на основе тепловизионных камер позволяют проводить наблюдения за распределением температурных полей на поверхности материалов первой стенки с высоким разрешением, что является большим преимуществом по сравнению с пирометрами и другими способами измерения температуры.

Системы ИК визуализации включают в себя комплекс оптических систем необходимый для интеграции в конкретную установку УТС, с присущими ей конструктивными особенностями, а так же тепловыми и радиационными нагрузками. В зависимости от задач и особенностей установки дизайн системы является компромиссным. И будет зависеть от конкретных задач и целей проводимых исследований, а также от конструктивных особенностей установки.

Одной из основных целей создания токамака КТМ является исследование поведения кандидатных материалов первой стенки будущих ТЯР под действием тепловых потоков плазмы. На токамаке КТМ максимальные тепловые потоки плазмы (до 20 МВт/м<sup>2</sup>) на дивертор будут соответствовать ожидаемым в ИТЭР. В связи с этим является весьма актуальным измерение и контроль температуры нагрева и ее распределения на поверхности исследуемых материалов под действием потоков высокотемпературной плазмы.

Известно, что температуру нагрева материалов и тепловые потоки плазмы можно измерить контактными способами (термопара, зонды), а также методами бесконтактной термометрии. Преимущества контактных методов заключается в достаточной простоте метода и прямых измерениях. Однако в случае установок управляемого термоядерного синтеза и, в частности КТМ, сложность заключается в том, что установка работает в импульсном режиме и имеют место быстрые переходные процессы, приводящие к локальному поверхностному нагреву материалов первой стенки. В случае использования термопар имеется проблема быстродействия, где необходим миллисекундный диапазон (микросекундный в случае изучения неустойчивостей и срывов). Также имеются ограничения по размещению датчика в непосредственной близости от поверхности материалов, воспринимающей тепловую нагрузку, а также весьма сложно измерить распределение температуры на поверхности материала с высоким пространственным разрешением, что требует размещения большого количества датчиков. В условиях токамака КТМ, к тому же, существуют конструктивные ограничения, связанные с наличием подвижного диверторного стола, что приводит практически к невозможности размещения датчиков и зондов с сигнальными линиями на диверторе.

Методы оптической термометрии не требуют контакта датчика с телом, температура которого измеряется, и поэтому могут применяться там, где использование контактных способов затруднено. Методы ИК термометрии позволяют измерить очень высокие температуры. При использовании тепловизионной камеры можно определить картину распределения температуры на поверхности материала с высоким пространственным

разрешением. При этом измерение может производиться с высоким быстродействием.

В составе диагностического комплекса токамака КТМ имеется три ИК диагностики: пирометр быстродействующий, пирометр ТЦ2С и монитор тепловых нагрузок на дивертор. Перечисленные диагностики предназначены для измерения температуры и восстановления тепловых потоков на дивертор. Однако они позволяют проводить локальные (точечные) измерения, не позволяя измерять пространственное распределение температуры на исследуемых образцах в процессе разряда. Они также имеют не достаточно большое пятно измерения около 20 мм. Кроме того их рабочий диапазон измерения температур от 600 °С до 2000 °С. Следует отметить, что пирометр быстродействующий и монитор тепловых нагрузок на дивертор требуют проведения абсолютной калибровки. Пирометр ТЦ2С является двухцветным и не требует проведения абсолютной калибровки, однако его использование непосредственно во время пуска не возможно из-за ограничений по условиям эксплуатации. В связи с этим его планируется использовать для проведения калибровки при подготовке к экспериментам.

Разработка и использование диагностики ИК визуализации на основе тепловизионной камеры на токамаке КТМ позволит значительно расширить экспериментальные возможности, измеряя температуру поверхности исследуемых материалов от исходной комнатной до 2000 °С и получить распределение температурных полей на поверхности исследуемых образцов с высоким пространственным разрешением.

Ниже представлен обзор систем ИК визуализации разрабатываемых и используемых на токамаках. Также обсуждаются проблемы измерения температуры металлов с помощью термографических камер в условиях установки токамак.

### **1.3.1 Системы с классическим размещением у смотрового окна**

Одним из первых и ставших классическим типом компоновки (дизайном) системы ИК визуализации является размещение ИК камер непосредственно у смотрового окна, как и для классических видеокамер. Ниже приведен обзор токамаков с такой реализацией диагностики ИК визуализации.

Особенность конструкции вакуумной камеры токамака MAST с размещением полоидальных катушек непосредственно внутри вакуумного объема и отсутствием длинных вакуумных патрубков делает исключительно удобным использование оптических диагностик. Просто устанавливая их у смотровых окон вакуумной камеры. ИК система токамака MAST состоит из двух тепловизионных камер [43]. Обе ИК камеры устанавливаются непосредственно в смотровом окне. Одна из камер работает в среднем ИК диапазоне длин волн (MWIR), а вторая в дальнем ИК диапазоне (LWIR).

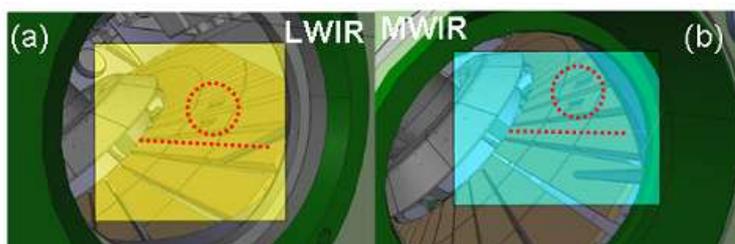
Первая камера разработана компанией Santa Barbara Focal Plane модель SBFB 125, с разрешением матрицы 320×256 и рабочим диапазоном от 3 мкм до 5 мкм. Камера снабжена полосовым фильтром с рабочим диапазоном от 4,5 мкм

до 5 мкм. Максимальная частота кадров 10 кГц в оконном режиме 128×8 и 315 Гц в полнокадровом режиме. Типичное пространственное разрешение системы оснащенной стандартной 15 мм объективом около 5 мм.

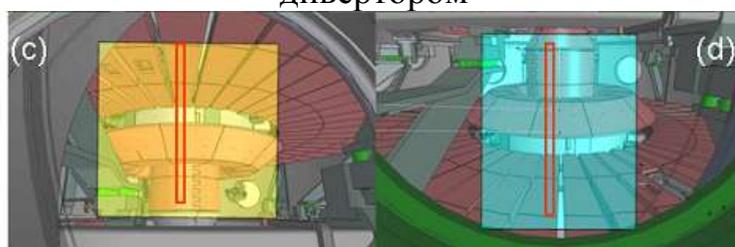
Вторая камера от Thermosensorik CMT256 LHS с матрицей 256×256 на основе focal plane array detector с рабочим диапазоном длин волн от 7,6 мкм до 8,9 мкм. Частота кадров в полноэкранный режиме 880 Гц, с возможностью увеличения до 25 кГц при уменьшении кадра. Пространственное разрешение со стандартным объективом около 7 мм. В качестве смотрового окна используются стекла сделанные из сульфида цинка (ZnS) и сапфира, соответственно для LWIR и MWIR камер.

Обе камеры используются для измерения температур и восстановления потоков плазмы на дивертор. Использование двух ИК камер разного рабочего диапазона длин волн реализовано с целью повышения надежности измерения температурных полей и сравнения полученных результатов. Камеры используются одновременно в одном окне для наблюдения за одной и той же зоной, с целью повышения точности и достоверности результатов измерения. Наличие двух камер позволило также проводить одновременное наблюдение за тепловыми процессами в верхнем и нижнем диверторах в режимах с двухнулевой диверторной конфигурацией.

На рисунке 4 показана модель получаемого изображения и полей зрения с камер. Все наблюдения производятся с горизонтальных патрубков. При одновременном наблюдении одной и той же зоны камеры устанавливаются в одном смотровом окне (рисунок 4а, b).



а, b – изображение получаемое при одновременном наблюдении за нижним дивертором



с, d – изображение получаемое при наблюдении верхнего и нижнего дивертора

Рисунок 4 – Пример модельного изображения, получаемого с системы ИК визуализации в различных местах установки токамака MAST (слева LWIR, справа MWIR) [43]

На токамаке COMPASS используется система, состоящая из ИК камеры Micro-Epsilon TIM160 [44]. В качестве детектора в камере используется матрица 160×120 из неохлаждаемых микроболометров, частотой кадров до 120 Гц. Камера может работать в четырех температурных диапазонах, в общем покрывающих диапазон от 20 °С до 1500 °С. Камера установлена в горизонтальном экваториальном патрубке для наблюдений за лимитером, непосредственно у смотрового окна, изготовленного из селенида цинка (ZnSe).

Подобный подход также используется на токамаках Глобус-М, ADITYA, DIII-D и др.

Интересный подход был использован на токамаке NSTX [45]. Здесь был использован специально разработанный переходник – делитель изображения (рисунок 5), в котором осуществляется оптическое разделение на два канала (два диапазона инфракрасного излучения – средневолновый и дальневолновый диапазоны) после чего разделенное изображение проецируется на матрицу инфракрасной камеры, как показано на рисунке 5. Теоретически такой подход позволяет проводить измерения температуры вне зависимости от излучательной способности поверхности тела, которая может изменяться с ростом температуры. Данная система была разработана для проведения измерений температуры жидкого литиевого дивертора, поскольку измерение температуры поверхности может быть затруднена из-за изменения излучательной способности вследствие: 1) роста температуры; 2) накопления примесей на поверхности; 3) образования на поверхности различных химических соединений LiH, Li<sub>2</sub>C<sub>2</sub>, Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Данный подход аналогичен, тому, что используется в двухцветных пирометрах.

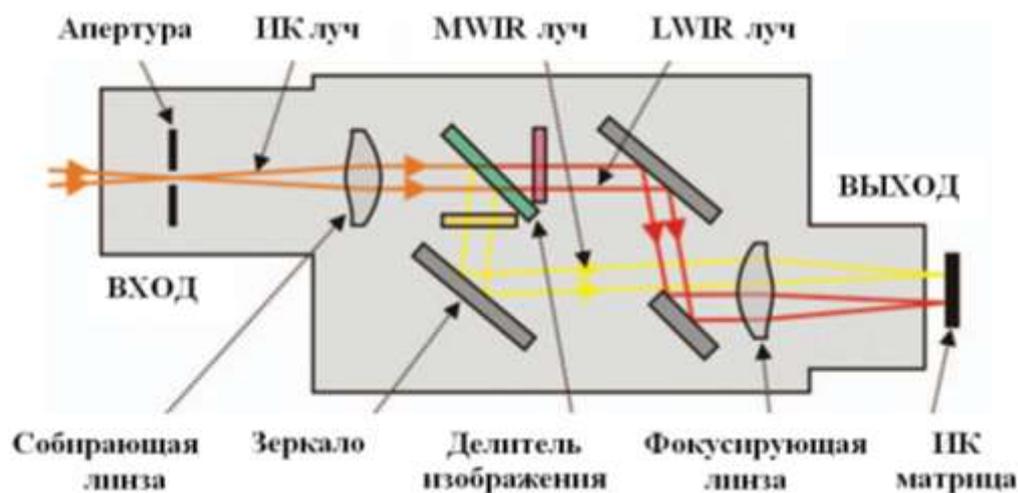


Рисунок 5 – Схематичное изображение двухполосного ИК переходника системы ИК визуализации токамака NSTX [45]

В системе используется скоростная ИК камера с частотой от 1,6 кГц до 6,2 кГц. В камере используется матрица на основе теллурида ртути-кадмия (HgCdTe) с разрешением 128×128 на максимальной частоте, размером одного пикселя 40 мкм и охлаждением жидким азотом. Квантовая эффективностью

QE > 90 % в диапазоне от 1,5 мкм до 11 мкм, разрядность 14 бит и чувствительность < 20 мК.

В качестве смотрового вакуумного окна используется стекло из ZnSe.

На многих токамаках малого и среднего размеров используются системы ИК термографии с непосредственной установкой ИК камеры за вакуумным окном. При этом вакуумное окно делают из оптически прозрачного материала для инфракрасного диапазона длин волн.

Выбор модели тепловизионной камеры практически определяется имеющимся в наличие бюджетом на приобретение камеры.

### 1.3.2 Системы ИК визуализации на основе эндоскопа

На некоторых токамаках в связи с конструктивными особенностями, например, наличие длинных диагностических патрубков ограничивающих обзор, разрабатываются эндоскопические системы, позволяющие преодолеть конструктивные ограничивающие факторы. Использование эндоскопов так же позволяет удалить электронные блоки от воздействия электромагнитных полей.

С развитием программы УТС и приближением параметров плазмы близким к зажиганию, использование эндоскопических систем стало одним из требований в связи появлением нейтронного излучения. Это обусловлено необходимостью удаления электроники оборудования от радиационного воздействий и организации их обслуживания. Не редко также системы визуализации разрабатываются с возможностью одновременного наблюдения в видимом и ИК диапазонах.

Так в настоящее время широко разрабатываются прототипы подобных систем для создающегося сегодня токамака ИТЭР и будущих термоядерных реакторов.

На таких токамаках как Tore-Supra, JET, JT-60SA были разработаны подобные эндоскопические системы. На рисунке 6 приведен пример изображения такой системы, разработанной для токамака Tore-Supra [46].

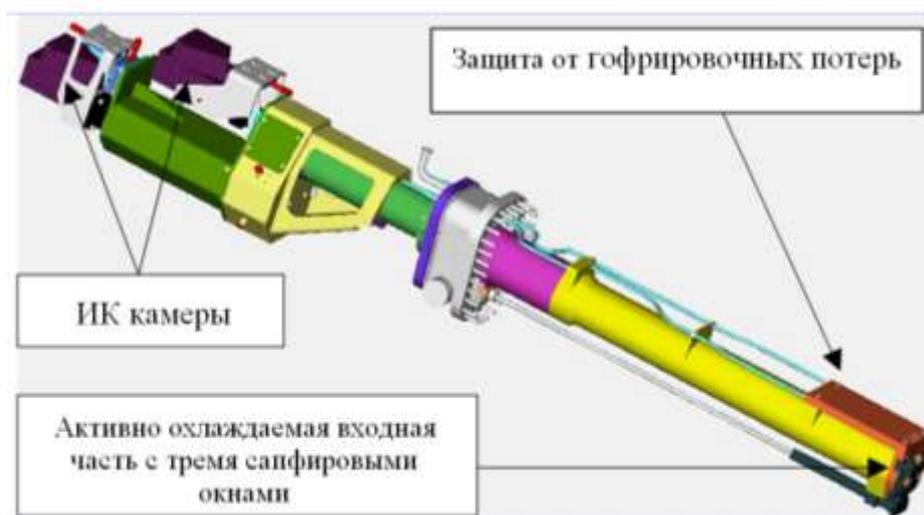


Рисунок 6 – Система ИК визуализации токамака Tore Supra [46]

Целью создания этой системы – предупреждение разрушения активно охлаждаемых элементов первой стенки: тороидального лимитера и антенны СВЧ нагрева. На токамаке Tore Supra используются семь подобных систем. В каждой системе используется две ИК камеры, одна для наблюдения за тороидальным лимитером, другая за СВЧ антеннами. В купе все семь систем обеспечивают наблюдение за всей поверхностью лимитера (360°) и всеми СВЧ антеннами. Особенностью данной системы является также наличие активного охлаждения элементов обращенных к плазме, поскольку длительность разряда в токамаке Tore-Supra может достигать шесть минут в процессе чего элементы, обращенные к плазме, могут достаточно сильно нагреться.

Данные с ИК системы используются для наблюдения в реальном времени возможных зон перегрева. Информация с системы используется в контуре управления разрядом для предотвращения возможных аварийных ситуаций с разрушением элементов первой стенки с активным охлаждением. Из-за использования достаточно большого количества линз общий коэффициент передачи системы составляет 20 %.

На токамаке JET также используется эндоскопическая система. Особенностью данной системы является широкоугольное наблюдение за вакуумной камерой [47]. На рисунке 7 показана модель системы.

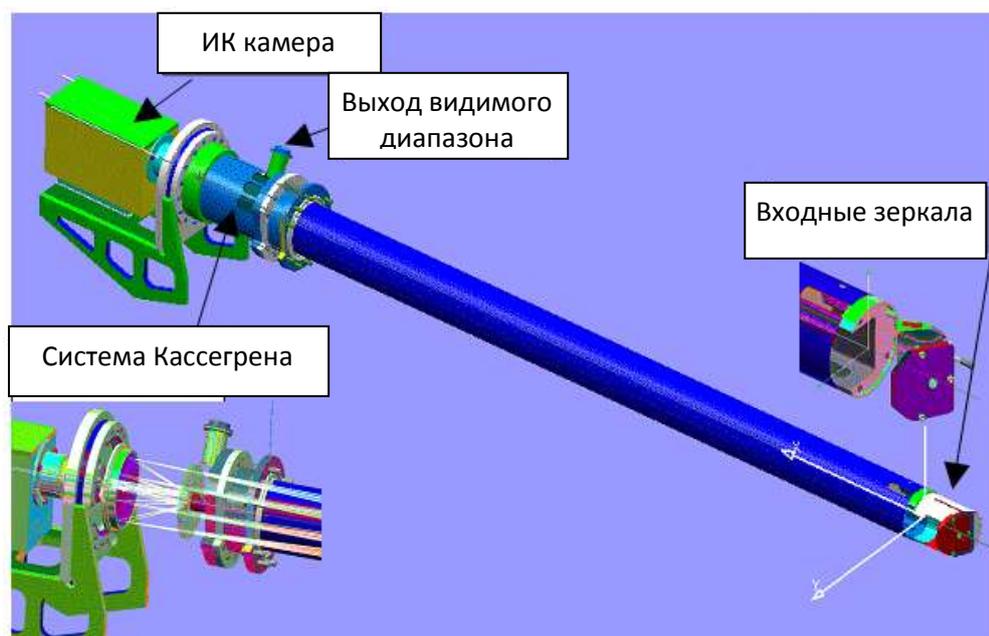


Рисунок 7 – Система ИК визуализации токамака JET [47]

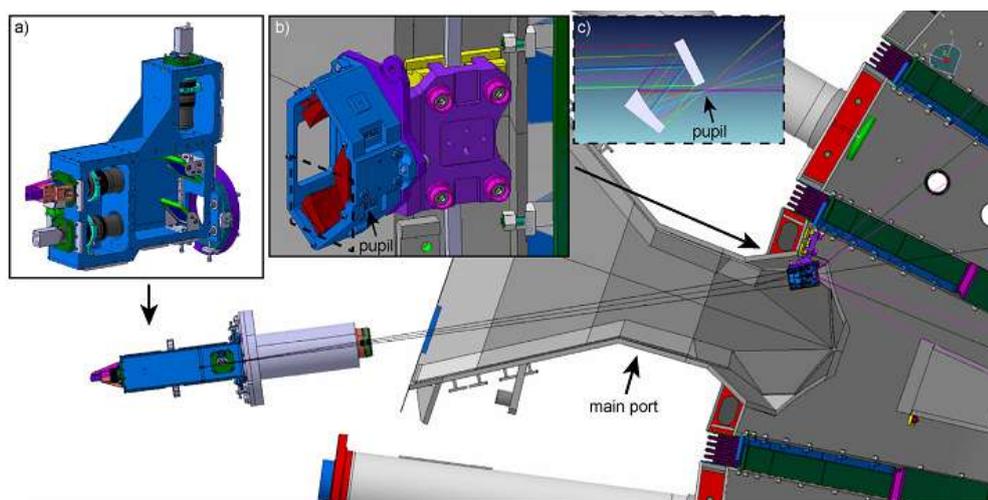
Целью создания системы является защита машины в реальном времени, а так же анализ тепловых нагрузок во время нормальной работы и во время переходных процессов, таких как срывы и ELM-ы.

Система имеет угол обзора 70°, позволяет видеть дивертор, внутреннюю стенку, внешний полоидальный лимитер, антенну ВЧ нагрева и верхний лимитер.

Данная система позволяет производить одновременные наблюдения в видимом и ИК диапазонах. Коэффициент передачи эндоскопической системы составляет около 60%.

В системе используется ИК камера с матрицей на основе теллурида ртути-кадмия (HgCdTe) с разрешением  $640 \times 512$ , размером одного пикселя 25 мкм и охлаждением до 80 К с использованием Стирлингова охладителя. В полнокадровом режиме частота до 100 Гц, с возможностью увеличения кадров до 10 кГц в режиме уменьшения кадра до  $128 \times 8$ . Рабочий диапазон длин волн камеры от 3,6 мкм до 5,1 мкм и температурный диапазон измерения от 200 °С до 2000 °С. Для работы в видимом диапазоне используется ПЗС камера, которая дает тот же угол обзора, что и ИК камера.

В 2014 году для токамака JET в рамках проведения экспериментов с цельнометаллической первой стенкой, планируемой к использованию на реакторе ИТЭР, была разработана новая широкоугольная система визуализации [48]. Особенностью новой системы является то, что все элементы, размещенные внутри вакуумной камеры (ВК), построены целиком на зеркальных (отражающих) элементах. На рисунке 8 показано изображение системы.



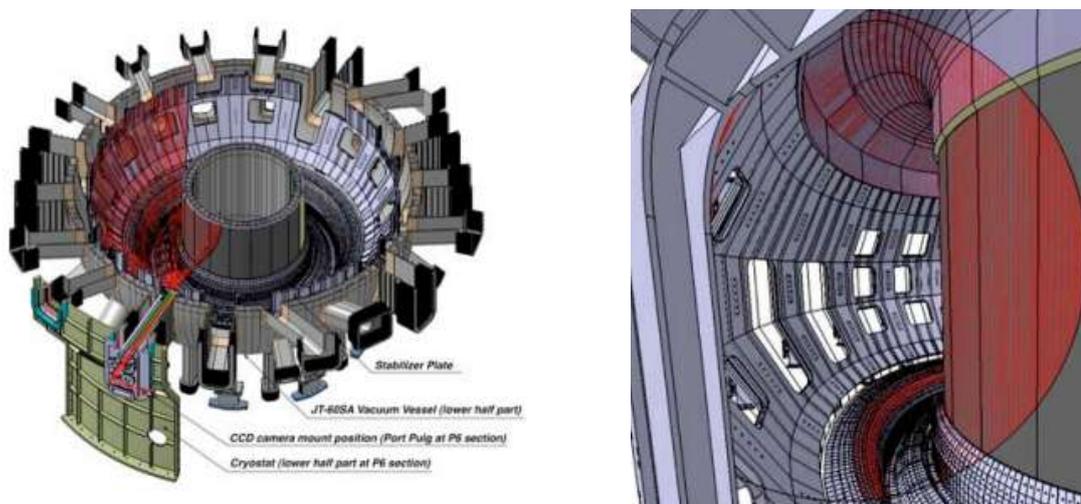
а – внешняя часть, б – внутрикамерная часть, с – система зеркал

Рисунок 8 – Система визуализации токамака JET с полностью зеркальными внутрикамерными элементами [48]

Система состоит из двух частей: внутрикамерной и внешней. Внутрикамерная часть представляет собой корпус, прикрепленный к вакуумной камере, в котором размещается система зеркал (рисунок 5с). Система зеркал состоит из двух симметричных частей, которые проецируют две половины изображения вакуумной камеры – верхнюю и нижнюю часть. Внешняя часть системы состоит из двух оптических разветвителей, трех ПЗС камер и трех телефото объективов. Одна из камер обеспечивает наблюдение за плазмой в видимом диапазоне. Две другие – монохромные камеры, снабженные интерференционными фильтрами ближнего ИК диапазона ( $1016 \pm 40$ ) нм. Они обеспечивают наблюдение за нагревом внутрикамерных элементов как часть системы защиты первой стенки.

На новом сверхпроводящем токамаке KSTAR также используется ИК система для проведения наблюдений за температурой поверхности элементов внутренней стенки и локальных горячих точек на элементах антенны ионно-циклотронного резонансного нагрева [16]. Система состоит из перископа, установленного в горизонтальном экваториальном патрубке, и обеспечивает вид одного полоидального сечения вакуумной камеры. Система линз изготовлена из фторида кальция (CaF<sub>2</sub>). Длина перископа составляет 2,5 м. Использование перископической системы связано с конструктивными особенностями KSTAR. Токамак имеет сверхпроводящие обмотки, которые вместе с ВК погружаются в криостат. Это и приводит к наличию длинных патрубков. В качестве ИК камеры используется камера компании FLIR модели ThermoVision SC6000HS. Камера имеет матрицу 640×512 на основе антимонида индия (InSb) с охлаждением до 70 К, частотой кадров 125Hz и рабочим спектральным диапазоном от 3 мкм до 5 мкм.

Для находящегося сейчас на модернизации токамака JT-60U (после модернизации JT-60SA) также разрабатывается новая система визуализации [49]. Система будет иметь широкоугольный обзор, и также будет позволять проводить наблюдения одновременно в видимом и ИК диапазонах. На рисунке 9 показана модель системы установленной на вакуумной камере JT-60SA, а также модельное изображение поля зрения с системы.



а) модель системы ИК визуализации    б) модельное поле изображения  
Рисунок 9 – Система ИК визуализации токамака JT-60SA [49]

Оптическая система будет соответствовать требованиям ИТЭР. В составе системы предполагается использовать ИК камеру с матрицей на основе InSb с рабочим диапазоном от 3,6 мкм до 5,1 мкм, разрешением 640×512 и размером пикселя 25 мкм. Ожидаемое пространственное разрешение около 14 мм. Угол обзора примерно 80°, как показано на рисунке 6. Широкоугольный обзор позволит видеть полностью одно полоидальное сечение ВК с верхним и нижним диверторами.

Использование перископической системы так же обусловлено наличием длинных патрубков в связи со сверхпроводящей структурой токамака JT-60SA.

Для создающегося в настоящее время токамака ИТЭР также будет использоваться система ИК визуализации. В связи с тем, что в ИТЭР ожидается объемное термоядерное горение и как следствие нейтронные потоки, то к диагностическим системам предъявляются повышенные требования. Учитывая наличие радиации, а также длинные диагностические порты (наличие сверхпроводящих обмоток и криостата) для всех диагностических систем планируется использование специальных трактов сбора и передачи излучения, размещенных в диагностических портах и далее к диагностической зоне.

На ИТЭР планируется использовать большой набор систем ИК визуализации с целью наблюдения за всей поверхностью первой стенки. В общем, ИК система должна охватывать более 90 % поверхности вакуумной камеры [50]. Задачи ИК системы достаточно обширны: измерение и контроль температуры поверхности во время разряда с целью защиты и предотвращения аварийных ситуаций; восстановление тепловых потоков плазмы; изучение быстрых переходных процессов и пр.

В зависимости от размещения и поставленных задач к системе предъявляются различные требования. Эти требования весьма жесткие, что обусловлено уникальностью установки и исследовательскими задачами. На рисунке 10 показан один из примеров дизайна разрабатываемой системы ИК термографии дивертора ИТЭР-а [51].

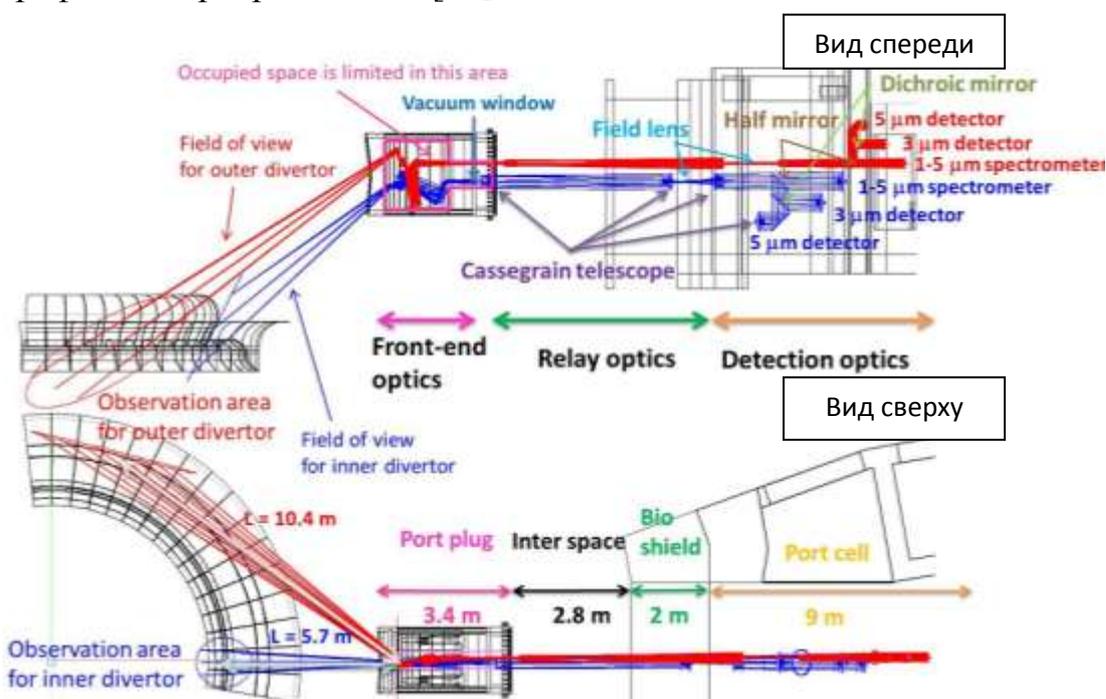


Рисунок 10 – Дизайн системы ИК термографии дивертора ИТЭР [51]

На сегодняшний день система находится на стадии разработки и многие элементы еще не определены, включая ИК камеры. Поэтому мы не будем детально останавливаться на ИК системе ИТЭР. Система представляет собой сложный оптический комплекс, в котором будут реализованы самые последние

наработки в области техники. Система сложна в реализации и изготовлении, а так же будет иметь очень высокую стоимость.

Подводя итоги выше сказанному, следует отметить, что при использовании системы ИК визуализации непосредственно у смотрового окна обеспечивается простота конструкции и обслуживания. Данный подход предпочтительней в случае технической и конструктивной возможности организации наблюдения за интересующей зоной. Использование эндоскопических систем требует тщательной разработки и значительных финансовых затрат. К тому же, вследствие использования достаточно большого набора оптических элементов в такой системе, интенсивность излучения, попадающего на детектор может быть значительно снижена, что влияет на диапазон и чувствительность проводимых измерений.

### 1.3.3 Тепловизионные камеры для научных исследований

В настоящее время все тепловизионные камеры можно разделить на две группы в зависимости от типа детектора – неохлаждаемые на основе микроболометров и на охлаждаемые на основе квантовых детекторов. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики двух групп тепловизионных камер. Как видно из таблицы 1 камеры на основе квантовых детекторов обладают более высокой чувствительностью и быстродействием по сравнению с неохлаждаемыми. Однако они имеют ограниченный срок службы и более высокую стоимость. Быстродействие камер на основе микроболометров ограничено тепловой константой (тепловой инерционностью) детектора, имеющей значение порядка нескольких миллисекунд, что дает ограничения на максимальную скорость кадров на уровне нескольких сот кадров в секунду. Камеры на квантовых детекторах не имеют такого ограничения, их скорость может достигать десятков тысяч кадров в секунду (в оконном режиме). Тепловизионные камеры на основе микроболометров работают в дальнем ИК диапазоне, тогда как камеры на основе квантовых детекторов в зависимости от типа матрицы могут работать в ближнем, среднем и дальнем ИК диапазонах.

Таблица 1 – Сравнение характеристик тепловизионных камер с разными типами детекторов

Характеристика	Тепловые детекторы	Квантовые детекторы
Подтип (материал)	неохлаждаемые микроболометры	InSb, InGaAs, PtSi, HgCdTe (МСТ), GaAs/AlGaAs
Спектральный диапазон	7 – 14 мкм	PtSi 3,2 – 5 мкм, InSb 3 – 5 мкм МСТ, QWIP 7,5 – 10 мкм
Преимущества	Низкая стоимость и широкий спектральный диапазон, большой ресурс	Быстрые (сотни к/с в полнокадровом режиме), чувствительные (20 мК типично)
Недостатки	Медленнее квантовых (десятки к/с в полнокадровом режиме), менее чувствительные (максимум до 30 мК)	Требуют охлаждения – жидкий азот или охладитель по циклу Стирлинга. Высокая стоимость. Ограниченный срок службы

Следует отметить, что все тепловизионные камеры с матрицами на основе квантовых детекторов стоят, по меньшей мере, в два раза дороже, чем камеры с таким же разрешением матрицы на основе микроболометров.

В таблице 2 приведены, для примера, тепловизионные камеры различных производителей, отвечающие требованиям, предъявляемым к камере для токамака КТМ, отобранные в процессе проведенного анализа рынка. Все модели камер относятся к научно-исследовательским. В таблице 2 приведены три видеокамеры на основе микроболометров и для сравнения показана камера с детектором на основе квантового детектора из InSb.

Таблица 2 – Тепловизионные камеры для научно-исследовательских работ

Модель камеры и производитель	FLIR, A655SC	InfraTec, VarioCAM HD head	Xenics, Gobi-640-GigE	InfraTec, ImageIR 8300
Тип детектора	Неохлаждаемый микроболометр	Неохлаждаемый микроболометр	Неохлаждаемый микроболометр	InSb
Разрешение	640×480	640×480	640×480	640×512
Тепловая чувствительность	< 30 мК	< 30 мК	< 50 мК	< 20 мК
Охладитель	нет	нет	нет	Stirling cooler
Спектральный диапазон	7,5 – 14,0 мкм	7,5 – 14,0 мкм	8 – 14,0 мкм	2 – 5,5 мкм
Частота кадров	50 Гц (полный кадр), 200 Гц (640×120)	60 Гц (полный кадр), 240 Гц (640×120)	50 Гц (полный кадр), 200 Гц (640×120)	350 Гц (полный кадр), до 5000 Гц (в оконном режиме)
Диапазон измеряемых температур, °С	-20 – 2000 °С	-40 – 2000 °С	-20 – 2000 °С	-40 – 2000 °С
Габариты ДхШхВ, мм	216×73×75	190×90×94	79×49×49	250×120×160
Стоимость	20-25 тыс. Евро	25 000 Евро	22 600 Евро	~70 000 Евро

Все камеры имеют практически идентичное разрешение и диапазон измеряемых температур. При этом как видно из таблицы 2 стоимость камеры на основе квантового детектора в три раза выше, чем на основе микроболометров. Кроме того, как правило, тепловизоры на квантовых детекторах имеют габариты больше, чем у аналогичных на микроболометрах.

Следует отметить, что стоимость камер на основе квантовых детекторах начинается от 50-60 тыс. евро для камер с разрешением 200×300 пикселей. Приведенные в таблице 2 камеры на основе микроболометров являются

лучшими представителями среди тепловизоров на основе данного типа детекторов. Как видно из таблицы их характеристики очень близки. Камера Gobi-640-GigE от Xenics имеет чувствительность хуже, чем у двух других, поэтому при прочих равных условиях не подходит. Оставшиеся две камеры от компании FLIR модели A655SC и от компании InfraTec модели VarioCAM HD head имеют практически идентичные характеристики, за исключением частоты. У камеры от InfraTec указанная производителем частота кадров несколько выше на 20%. Однако, учитывая инерционность используемого детектора, имеющего постоянную времени 5-8 мс, увеличение частоты кадров свыше 200 к/с не дает физического улучшения.

#### **1.3.4 Степень черноты тела и ее влияние на точность измерения радиационных термометров**

Принцип действия инфракрасных тепловизионных камер аналогичен принципу действия радиационных пирометров. И в том и другом случае измеряется тепловое излучение нагретого тела, после чего мощность излучения пересчитывается согласно заложенного алгоритма с учетом излучательной способности тела и калибровочной кривой в значение температуры. Разница между ними заключается в том, что в тепловизионной камере используется большое количество чувствительных детекторов объединенных в матрицу, а в радиационных пирометрах используется только один чувствительный элемент.

Всем этим приборам присущ один недостаток – зависимость точности показания прибора от степени черноты тела. Т.е. для точного определения реальной температуры тела необходимо точное задание значения излучательной способности измеряемого тела.

Причем погрешность измерения будет зависеть как от точности задания коэффициента излучения, так и от рабочего диапазона длин волн прибора.

На рисунке 5, для примера, показаны кривые ошибки измерения радиационных ИК термометров в зависимости от рабочего диапазона длин волн и температуры при неточности определения излучательной способности в 10 % [52]. Как видно из рисунка 11 при смещении рабочего диапазона ИК термометров в длинноволновую часть ИК спектра увеличивается ошибка измерения при неточности задания излучательной способности тела на одну и ту же величину. При этом для ИК термометров, работающих в дальней ИК области (8 – 14 мкм), ошибка измерения имеет наибольшее значение. Следует отметить, что практически все современные тепловизионные камеры работают в двух рабочих ИК диапазонах длин волн: в среднем от 3 мкм до 6 мкм и дальнем от 7,5 мкм до 14,0 мкм.

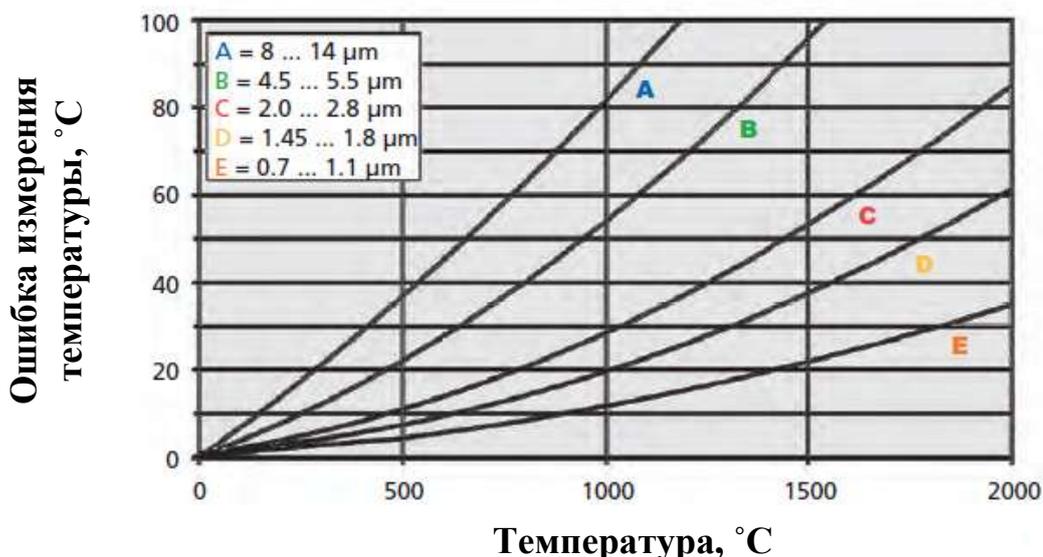


Рисунок 11 – Ошибка измерения температуры ИК термометрами при неточности определения степени черноты в 10 % [52]

Известно, что излучательная и отражательная способности металлов сильно зависят от состояния поверхности (шероховатости, пористости, наличия окисных пленок и т.д.) и, следовательно, являются не столько характеристиками материала, сколько характеристиками поверхности. Более того, что очень важно, существует зависимость степени черноты от температуры.

До настоящего времени на токамаках использовался графит в качестве материала первой стенки. Графит имеет значение излучательной способности близкой к 1 и в зависимости от типа и марки может быть от 0,8 до 0,99. В связи с чем, больших проблем с точностью измерения температуры методами ИК термометрии, как правило, не было. Однако в случае использования металлов могут иметь место большие ошибки измерения.

У металлов степень черноты значительно ниже, чем у диэлектриков, и увеличивается, как правило, с ростом температуры. Так, при комнатной температуре чистые стальные и чугунные поверхности имеют степень черноты  $\epsilon$  от 0,05 до 0,45, а при очень высоких температурах может достигать  $\epsilon = 0,7 \div 0,8$ . Для полированной алюминиевой поверхности повышение температуры с 500 К до 850 К приводит к увеличению  $\epsilon$  от 0,047 до 0,069.

Пленка окислов на металлической поверхности оказывает существенное влияние на степень черноты последней. Так, появление окислов на полированной поверхности алюминия приводит к увеличению ее степени черноты с 0,05 до 0,8. Таким образом, окисление металлической поверхности увеличивает ее исходную излучательную способность  $\epsilon$ . При этом, окисление может приводить к отрицательной зависимости  $\epsilon$  от температуры, т.е. к ее уменьшению с ростом температуры [53].

На степень черноты металлической поверхности существенное влияние оказывает также вид механической и термической обработки. Чистые

металлические поверхности поглощают значительно меньше энергии излучения, но с увеличением температуры их поглотительная способность увеличивается. С увеличением шероховатости поверхности излучательная способность  $\epsilon$  увеличивается. Более того, степень черноты металлов очень сильно зависит от рассматриваемого спектрального диапазона.

Теоретически для чистых полированных металлов можно провести расчет излучательной способности. На рисунке 12 показаны теоретически рассчитанные кривые полной излучательной способности различных металлов, в том числе вольфрама, согласно [54]. Однако данные расчеты применимы только для чистых полированных металлов. Что в реальном эксперименте практически не встречается.

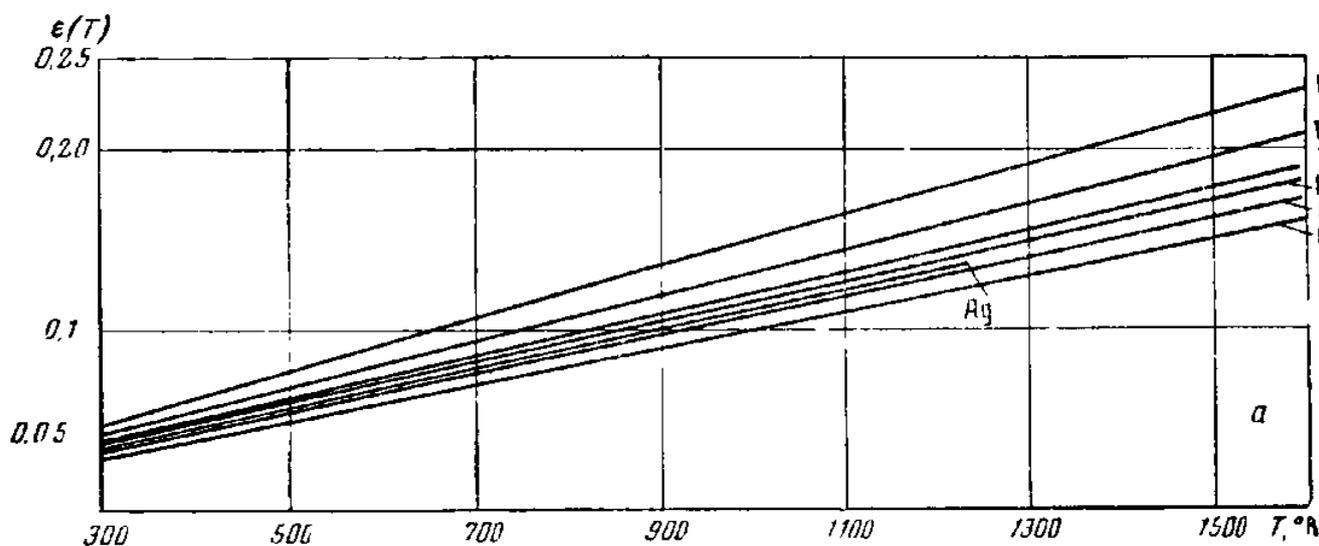


Рисунок 12 – Результаты расчетов степени черноты различных металлов в диапазоне температур от 300 К до 1650 К [54]

На рисунке 13 показаны экспериментально измеренные различными авторами кривые монохроматической излучательной способности вольфрама с полированной поверхностью в диапазоне от 0,3 мкм до 15 мкм при температуре 2400 К и [17].

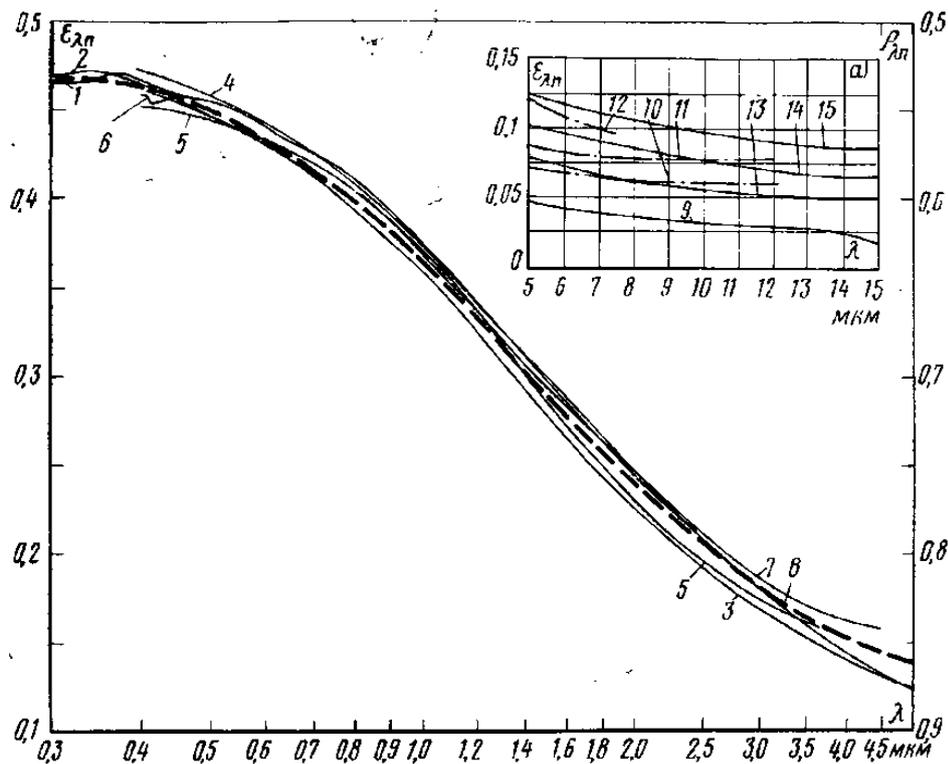


Рисунок 13 – Зависимость  $\epsilon_{\lambda}$  вольфрама от длины волны при  $T=2400$  К [17]

На рисунке 14 приведены кривые монохроматической излучательной/отражательной способности для металлов, в том числе бериллия, при комнатной температуре и полированной поверхности [17].

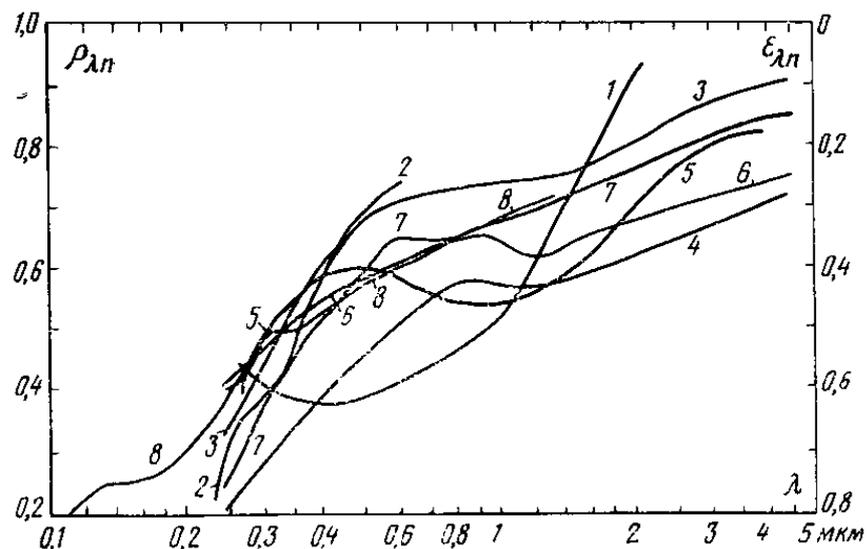


Рисунок 14 – Монохроматическая отражательная/излучательная способность щелочноземельных и редкоземельных металлов при комнатной температуре [17]

(1 – Be; 2 – Mg; 3 – Sr; 4 – Ba; 5 – Lu; 6 – Eu; 7 – Yb; 8 – Gd)

Как показал анализ справочных материалов, как правило, все экспериментальные данные, относятся к чистой полированной поверхности

металла с шероховатостью  $R_z$  от единиц микрон до десятых долей микрона. Для полированного вольфрама при комнатной температуре  $20\text{ }^\circ\text{C}$  монохроматическая излучательная способность  $\varepsilon_\lambda$  изменяется от 0,038 до 0,029 в диапазоне длин волн от 7 мкм до 14 мкм, соответственно [55]. При увеличении температуры полированного образца свыше  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  излучательная способность увеличивается до 0,1 и выше в рассматриваемом диапазоне длин волн от 7 мкм до 14 мкм.

Также во многих источниках для бериллия и вольфрама приводятся значения полной интегральной излучательной способности  $\varepsilon_t$  или же значение  $\varepsilon_\lambda$  на длине волны 0,65 мкм. Данные значения могут достаточно сильно отличаться от значений в другом спектральном диапазоне.

Особым вопросом является излучательная способность жидких металлов и в частности жидкого лития. Полная излучательная способность чистой поверхности жидкого лития составляет 0,05 [56]. Что является достаточно низким значением, при этом поверхность является близкой к зеркальной. Однако, исходя из того, что литий является чрезвычайно активным металлом по отношению к остаточным газам ( $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , пары  $\text{H}_2\text{O}$ ) в камере токамака, следует ожидать образования с течением времени различной толщины поверхностных плёнок продуктов реакции лития с этими газами. Образующийся на литии поверхностный слой является сложной смесью продуктов элементарных реакций, состав которой зависит от состава атмосферы в камере и содержания паров воды. Кроме того, он будет изменяться с течением времени. Исходя из этого, сложно определить и спрогнозировать изменение излучательной способности поверхности. Нельзя исключить и влияние на величину  $\varepsilon$  процесса переноса продуктов эрозии с поверхности других внутрикамерных элементов камеры. При воздействии технологического и рабочего плазменных разрядов на поверхность литиевого элемента можно ожидать изменения её свойств за счёт очистки от продуктов эрозии и химических реакций. В этой связи отработка методики ИК-диагностики литиевых внутрикамерных элементов в условиях реального токамака требует дополнительного особого рассмотрения.

На основании всего выше сказанного, можно отметить, что степень черноты металлов может лежать в достаточно широком диапазоне значений в зависимости от подготовки и состояния поверхности образца, его истории и химического состава.

Практически невозможно найти точные экспериментальные данные по излучательной способности  $\varepsilon$  для всех возможных случаев, например, для диапазона длин волн от 7 мкм до 14 мкм с различной степенью шероховатости поверхности (не полированных с шероховатостью  $R_z \geq 10$  мкм) образцов бериллия и вольфрама.

Таким образом, использование металлической первой стенки приводит к проблеме точного измерения температуры ее поверхности методами оптической термометрии и в частности тепловизионной камерой. Это связано с тем, что металлы не являются «черными» телами, имеют малую излучательную

способность, и зачастую она имеет зависимость от температуры [17, 18]. Также излучательная способность зависит от состояния поверхности материала, и может меняться с течением времени как в связи с модификацией поверхности под действием излучения плазмы, так и в связи с осаждением на поверхности пылевых частиц самого материала, или, например, частиц бериллия на диверторные пластины, изготовленные из вольфрама. При этом погрешность измерений может достигать десятков процентов, особенно в области высоких температур.

Для решения проблемы изменения излучательной способности металла во время нагрева поверхности и изменения его состояния для ИТЭР разрабатывается специальный двуцветный пирометр, использующий принцип пирорефлектометрии [19]. Данный метод находится на стадии НИОКР. Одним из недостатков разрабатываемой диагностики является то, что измерение температуры производится только в одной пространственной точке. Однако на поверхности металлической первой стенки и дивертора имеют место сильные градиенты температур вследствие неравномерного воздействия потоков высокотемпературной плазмы, поэтому разработка способа, позволяющего измерять пространственное распределение температуры на поверхности элементов первой стенки, является крайне актуальным.

#### **1.4 Выводы и постановка задач**

Токамак КТМ является уникальной установкой с конструктивными особенностями, что требует нестандартных решений для обеспечения научно-исследовательских экспериментальных работ на ней.

Как показал литературный анализ, требуется разработка ряда способов и методов измерения, обеспечивающих: измерение реальной конфигурации ноль поля и верификацию соответствующих расчетных кодов; организацию наблюдения за плазменным шнуром, а также изучение воздействия плазмы на материалы первой стенки путем измерения распределения температуры на поверхности исследуемых материалов.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей диссертационной работы является разработка и совершенствование средств измерения и методов диагностики плазмы для проведения исследований на токамаке КТМ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Разработать способ прямого точного измерения конфигурации ноля магнитного поля в вакуумной камере КТМ;
- Экспериментально измерить конфигурацию ноля поля КТМ;
- На основе полученных экспериментальных данных провести верификацию численных кодов расчета распределения полоидальных магнитных полей внутри вакуумной камеры КТМ;
- Разработать систему видеонаблюдения за плазмой КТМ;
- Провести исследование формирования плазменного шнура с использованием системы видеонаблюдения плазмы токамака КТМ;

– Разработать диагностику ИК визуализации для наблюдения за распределением температуры на поверхности исследуемых материалов на токамаке КТМ;

– Разработать способ термографический наблюдений диагностикой ИК визуализации, позволяющий повысить точность измерения температуры материалов, выполненных из металла на токамаке КТМ.

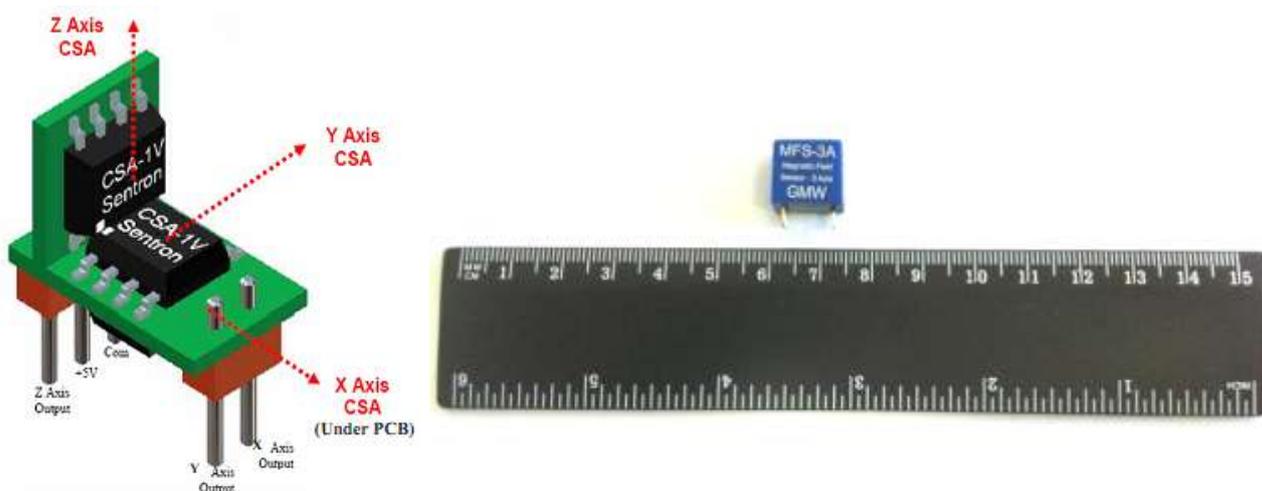
## 2 СПОСОБ ПРЯМОГО ИЗМЕРЕНИЯ НОЛЯ ПОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЦЫ ТРЕХМЕРНЫХ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА

В настоящей главе приводятся основные результаты по разработке способа прямого измерения нуля магнитного поля в установке токамак, а также обобщены полученные экспериментальные результаты измерения конфигурации нуля поля на токамаке КТМ. Результаты работы приведенные в настоящей главе опубликованы в следующих статьях [57-60].

### 2.1 Конструкция и устройство матрицы трехмерных датчиков Холла

Для измерения нуля поля и его конфигурации требуется измерить распределение полоидального магнитного поля внутри вакуумной камеры в предполагаемой области его наличия. Для построения двумерной картины поля необходимо использовать набор датчиков расположенных в полоидальном сечении вакуумной камеры токамака, образующих двумерную сетку. При этом, поскольку для построения и анализа нуля поля используют значение модуля полоидального магнитного поля, то для его вычисления необходимо одновременное ортогональное измерение составляющих поля в выбранной точке пространства. Как правило, в системе координат токамака используют радиальную и вертикальную составляющие поля.

Для измерения нуля магнитного поля были выбраны трехмерные датчики Холла модели MFS-3A компании GMW Associates [61]. Данная модель датчиков имеет высокую чувствительность равную 28 мВ/Гс и диапазон измерений  $\pm 73$  Гаусс. Диапазон измерения датчиков достаточен для измерения нуля магнитного поля, область которого не превышает 20 Гс. На рисунке 15 показан внешний вид трехмерного датчика Холла и его конструкция.



а) конструкция датчика

б) внешний вид датчика

Рисунок 15 – Трехмерный датчик Холла MFS-3A

Трехмерные датчики Холла модели MFS-3A конструктивно представляют собой три идентичных датчика модели CSA-1V ориентированных таким образом, чтобы измерять поле в трех осях, как показано на рисунке 15-а

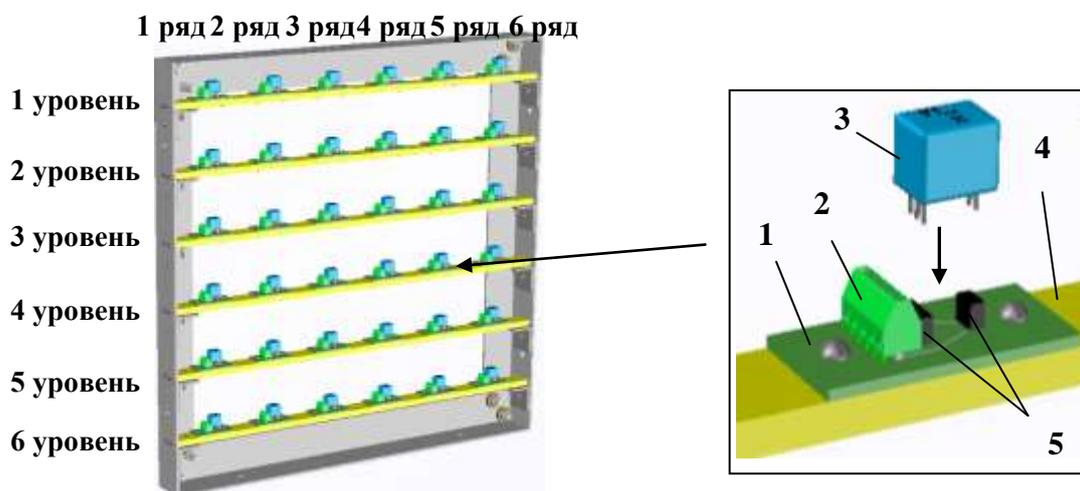
(третьего датчика, ориентированного для измерения поля вдоль оси x, на рисунке не видно он расположен под платой датчика, расположенного в горизонтальной плоскости). Датчики объединены в одном корпусе и имеют единое питание. Датчик MFS-3A имеет относительно небольшие габариты 10x13,5x12 мм (рисунок 15-б). В таблице 3 приведены основные технические характеристики трехмерного датчиков Холла.

Таблица 3 – Технические характеристики трехмерного датчиков Холла MFS-3A

Характеристики	Значение	Единицы
Максимальная амплитуда измеряемого поля	73	Гс
Выходное напряжение при отсутствии магнитного поля	2,5	В
Напряжение питания	5	В
Чувствительность	28	мВ/Гс
Полоса пропускания	100	кГц
Точность	3	%
Угловое смещение	3	градуса

Три датчика внутри корпуса размещены достаточно близко друг к другу, что дает возможность считать их расположенными в одной точке пространства при проведении измерений магнитного поля.

Для проведения магнитных измерений внутри ВК КТМ была разработана специальная конструкция для размещения датчиков Холла, которые образуют двумерную сетку 6x6 – матрицу. На рисунке 16 показана модель конструкции измерительной матрицы.



1 – монтажная плата; 2 – клемма; 3 – трехмерный датчик Холла; 4 – несущая планка; 5 – контактные гнезда для установки ДХ

Рисунок 16 – Конструкция матрицы датчиков Холла

Датчики размещаются на шести планках по шесть на каждой. Шаг между датчиками был выбран равным 70 мм. Датчик устанавливается в специально разработанную монтажную плату, на которой имеются гнезда для установки

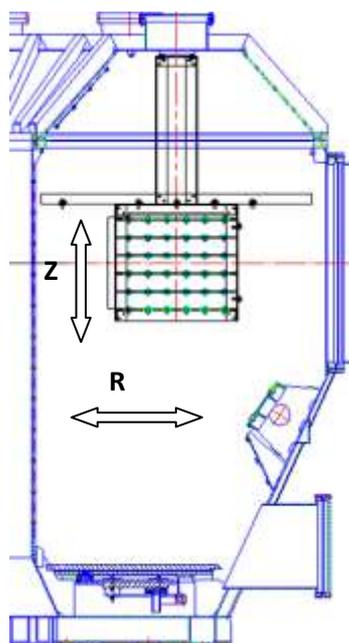
ДХ и клемма для присоединения линий питания и измерения. В конструкции предусмотрено разъемное соединение датчиков с клеммами печатной платы. Что сделано с целью простоты его обслуживания и эксплуатации.

Несущая конструкция была разработана таким образом, чтобы обеспечить ориентацию измерительных осей датчика (X и Z) вдоль соответствующих координат токамака – радиальной R и вертикальной Z.

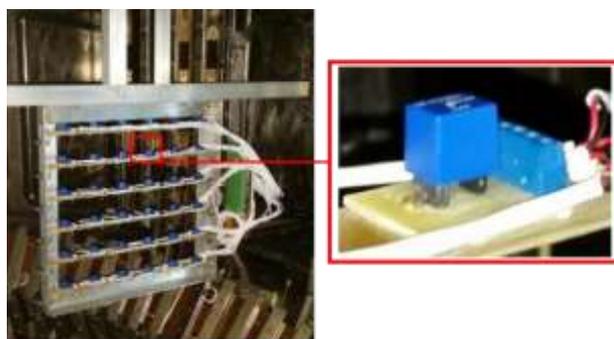
В идеальном и самом простом случае (при отсутствии тороидального магнитного поля) для измерения модуля полоидального магнитного поля можно использовать все три компонента трехмерного ДХ, при этом достаточно точной установки центра датчика в пространстве внутри ВК в заданной координате R и Z токамака без необходимости точного осевого позиционирования самого датчика. Однако как будет показано ниже, в результате проведения экспериментов было обнаружено наличие магнитного поля в тороидальном направлении. Таким образом, использование всех трех компонент ДХ будет приводить к ошибке измерения. В связи с чем, для измерения нуля поля было использовано две компоненты ДХ. При этом, если измерительная плоскость ДХ выставлена точно и отсутствует поворот относительно тороидальной плоскости, то для измерения модуля полоидального поля также достаточно точной установки центра датчика в соответствующей координате внутри ВК. Поскольку в качестве выходных данных расчетных кодов принято выводить значения вертикальной и горизонтальной составляющих полоидального магнитного поля, то для повышения информативности при сравнительном анализе и для последующей более точной оптимизации модели ВК с ЭМС компоненты ДХ были ориентированы вдоль радиальной R и вертикальной Z координат токамака КТМ. В данном случае необходимо было организовать точное позиционирование ДХ не только в пространстве ВК, но и точную ориентацию компонент ДХ вдоль горизонтальной, вертикальной и тороидальной плоскостей токамака КТМ. Так при наличии некоторого угла между измеряемой составляющей поля и нормалью датчика будет паразитное влияние другой компоненты магнитного поля, что приведет к погрешности измерения. При разработке конструкции матрицы датчиков Холла большое внимание было уделено обеспечению ортогональности установки ДХ, как на матрице, так и при установке всей конструкции в вакуумной камере. Также при разработке конструкции основными требованиями к ней были: простота конструкции, технологичность изготовления и доступность материалов. Вся конструкция выполнена из немагнитных материалов. Металлические несущие элементы конструкции электрически развязаны с целью предотвращения образования замкнутого контура и образования наведения токов.

На рисунке 17-а показан эскиз размещения измерительной матрицы внутри ВК. На рисунке 17-б показана фотография установленной матрицы внутри ВК во время проведения ее тестирования и настройки на токамаке КТМ. Также на рисунке 17-б показан ДХ в сборе на монтажной плате, установленной на планке.

Внутри вакуумной камеры матрица устанавливается при помощи специального крепления Т-образной формы. Передвигая матрицу вдоль горизонтальной штанги крепления можно провести измерения распределения поля по всему радиусу ВК. Для изменения вертикальной координаты расположения матрицы используется вертикальный подвес разной длины. Таким образом, при необходимости можно провести измерение распределения полоидального магнитного поля в любой области сечения вакуумной камеры, где будет находиться ноль поля.



а) эскиз размещения матрицы внутри ВК

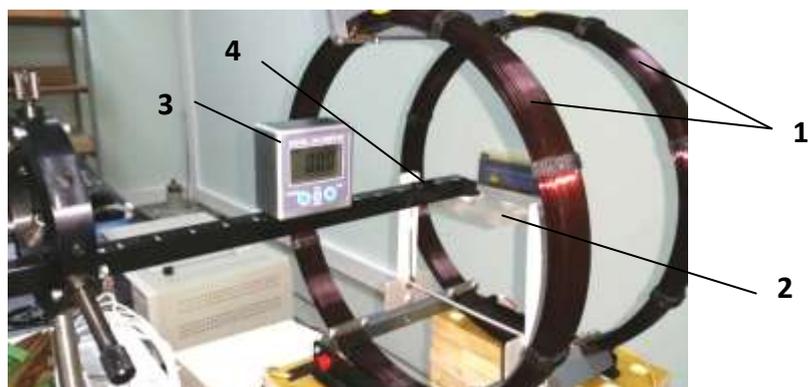


б) Матрица ДХ установленная внутри ВК

Рисунок 17 – Размещение матрицы датчиков Холла внутри ВК КТМ

## 2.2 Калибровка матрицы датчиков Холла

Калибровка всех датчиков Холла осуществлялась при помощи катушки Гельмгольца. На рисунке 18 изображена катушка Гельмгольца производства компании 3V SCIENTIFIC модели U8481500. Данная модель катушки Гельмгольца позволяет получать равномерное магнитное поле до 40 Гс в средней части между двумя катушками при подаче максимального тока 5 А.



1 – катушка Гельмгольца; 2 – основание для установки ДХ; 3 – цифровой угломер; 4 – щуп тесламетра

Рисунок 18 – Катушка Гельмгольца

Для контроля и повышения точности калибровки магнитное поле катушки Гельмгольца измерялось цифровым тесламетром модели U33110-230 компании 3B SCIENTIFIC с неточностью измерения магнитного поля 2% от измеряемой величины. На рисунке 18 показан зонд тесламетра при измерении поля катушки Гельмгольца. Контроль установки угла размещения ДХ и зонда тесламетра в катушке Гельмгольца осуществлялся при помощи компактного цифрового угломера. Цифровой угломер также использовался для установки матрицы ДХ внутри ВК. На рисунке 19 показаны изображения катушки Гельмгольца во время проведения калибровки ДХ. На рисунках 19-а и 19-б показано размещение планки с ДХ при калибровке горизонтальной и вертикальной составляющих датчика Холла, соответственно.



а) калибровка горизонтальной компоненты ДХ



б) калибровка вертикальной компоненты ДХ

Рисунок 19 – Калибровка ДХ в катушке Гельмгольца

Калибровка ДХ в катушке Гельмгольца осуществлялась в сборе с несущей планкой, при этом остальные датчики Холла матрицы во время калибровки были размещены на своих планках и запитаны. Все измерительные линии и линии питания во время проведения калибровки были подключены по штатному варианту, как и при размещении внутри ВК.

Во время калибровки ДХ были проверены и уточнены коэффициенты чувствительности, а также проверена ортогональность установки датчиков внутри корпуса. При наличии в одной из составляющих датчика осевого отклонения более чем на 3 градуса такой датчик отбраковывался и заменялся на аналогичный с требуемыми характеристиками.

Так как чувствительность ДХ несколько изменяется при отклонении напряжения питания и температуры от номинальных параметров, то во время проведения калибровки в катушке Гельмгольца контролировался уровень напряжения питания, а также измерялась температура воздуха. Для достижения точности последующих измерений датчиками Холла все эксперименты проводились при тех же уровнях напряжения питания и температуры.

Во время калибровки было установлено, что для достижения соответствия заводской чувствительности, равной 28 мВ/Гс, требуется обеспечить непосредственно на входе датчика Холла значение напряжения питания равным 5,0 В. Поскольку из-за длины линии питания имеет место небольшое падение напряжения по сравнению со значением напряжения непосредственно на выходе источника питания, то для точного задания необходимого напряжения питания его уровень контролировался непосредственно на входной клемме монтажной платы датчика Холла.

Питание всех 36 трехкомпонентных датчиков матрицы осуществляется от одного стабилизированного источника питания.

После калибровки ДХ в катушке Гельмгольца вся матрица в сборе устанавливается в ВК КТМ. После установки матрицы в вакуумную камеру проводится проверка и тестирование матрицы в сборе путем измерения вертикального поля от последовательно соединенных полоидальных катушек вертикального поля PF3, PF6, и последующего измерения магнитного поля от обмотки тороидального поля TF. На рисунке 20 показано сечение ВК КТМ вместе с электромагнитной системой, а также матрица ДХ, установленной внутри ВК.

Катушки PF3, PF6 имеют одинаковые геометрические параметры, расположены симметрично относительно ВК токамака КТМ и при последовательном соединении представляют собой большой аналог катушки Гельмгольца. Таким образом, при подаче тока на эти катушки в центре ВК образуется практически однородное вертикальное магнитное поле. Измеренные значения вертикального магнитного поля, сравниваются с расчетными значениями магнитного поля в катушке Гельмгольца – PF3, PF6.

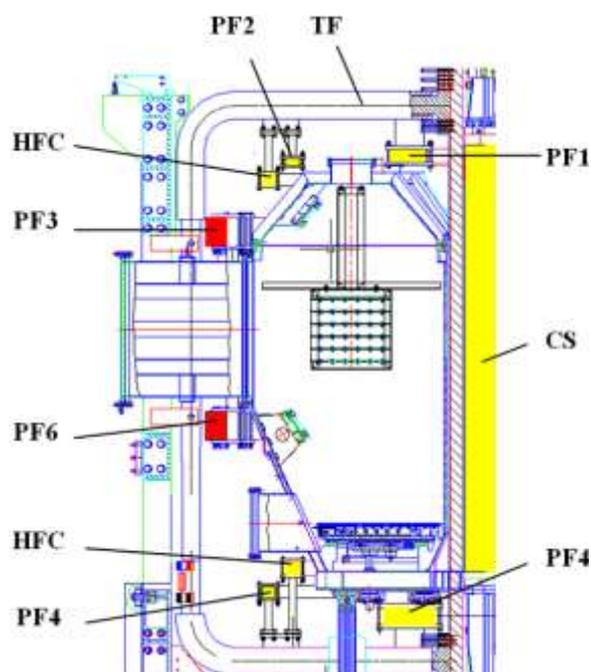


Рисунок 20 – Сечение токамака КТМ с установленной внутри вакуумной камеры матрицы ДХ

При проведении такого тестирования проводится проверка работоспособности всех датчиков, а также сравнение показаний датчиков с расчетным значением и проверка правильности ориентации датчиков путем анализа соответствия измеренных значений вертикального магнитного поля с расчетным. Кроме того, проверяется сигнал на датчике измеряющего перпендикулярную компоненту магнитного поля, на котором при правильном ортогональном расположении сигнал должен отсутствовать. Та же процедура осуществляется с использованием обмотки тороидального поля. При подаче тока в обмотку TF измеряется магнитное поле соответствующей компонентой датчика Холла и осуществляется контроль наличия сигнала на двух других компонентах датчика.

Питание катушек PF3-PF6 и TF осуществляется с использованием стабилизированного источника постоянного тока с достаточными значениями тока и напряжения для достижения необходимого значения магнитного поля.

Для регистрации сигналов с матрицы датчиков Холла используются два восьмидесятиканальных блока первичной обработки сигналов (БПОС), входящих в состав ИИС КТМ и предназначенных для сбора данных с электромагнитных датчиков токамака КТМ. Частота сбора данных составляет 100 кГц на один канал при разрядности аналого-цифрового преобразователя 16 бит. Схема измерительной системы приведена на рисунке 21. Здесь видно, что сигнал с датчиков Холла регистрируется БПОС и далее в реальном времени оцифрованный сигнал передается по волоконно-оптической линии в блок регистрации данных (БРД), где и сохраняется.

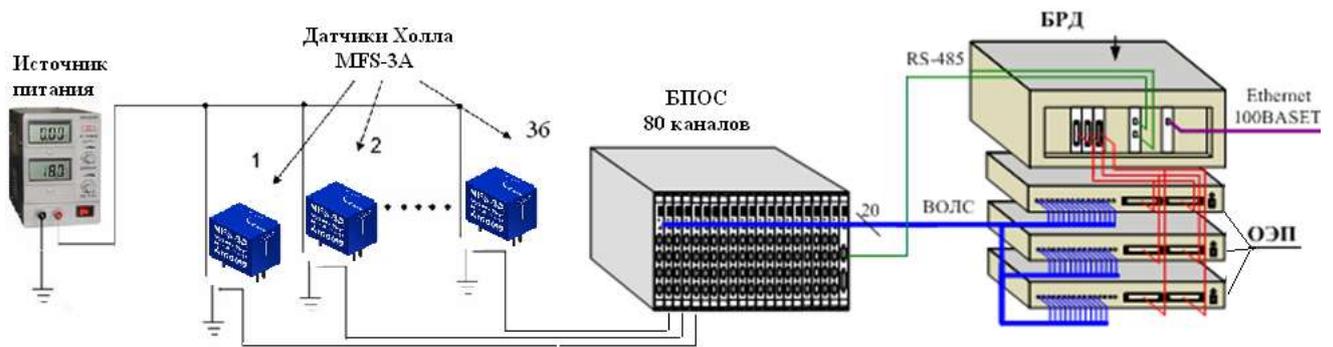


Рисунок 21 – Схема измерения электрических сигналов с матрицы датчиков Холла

### 2.3 Оценка погрешности измерений

Для проведения оценки погрешности измерений датчиками Холла был проведен анализ систематических погрешностей измерений.

Основные систематические погрешности измерений:

1) Угловая неточность установки. Согласно данным производителя максимальное отклонение угла установки каждой компоненты датчика Холла внутри корпуса может составлять  $3^\circ$ . При проведении калибровки ДХ в катушке Гельмгольца было проверено отклонение компонент датчика от ортогональности путем измерения сигнала компоненты датчика, перпендикулярной калибруемой компоненте. Действительно, некоторые датчики показали отклонение в  $3^\circ$  и даже несколько больше. Для уменьшения влияния данного фактора подбирались датчики с минимальным значением угла смещения, которые и были установлены в матрицу.

Также возможна неточность установки (угловое смещение) трехмерного датчика Холла внутри измерительной матрицы и всей матрицы, установленной внутри вакуумной камеры. Как будет показано ниже, по результатам измерений полное угловое отклонение ДХ внутри ВК КТМ не превышает  $3^\circ$ .

2) Шум измерительной системы. Согласно анализу данных среднеквадратичное отклонение (RMS) уровня шума составляет 19 мВ. Для оценки погрешности измерений от помехи возьмем стандартное отклонение в  $3RMS$  для которого доверительный интервал составляет 0,9973. Следует отметить, как было указано выше, система сбора данных имеет частоту регистрации 100 кГц, что, по меньшей мере, на два порядка превышает частотный диапазон измеряемых процессов, лежащих в миллисекундном диапазоне. Обработка данных с датчиков показала, что сигналы достаточно хорошо фильтруются, и общая погрешность при этом значительно уменьшается. На рисунке 22 показан пример сигнала с датчика Холла до фильтрации и после фильтрации. Как видно сигнал хорошо фильтруется. Рассчитанное значение среднеквадратичного отклонения после фильтрации не превышает  $\pm 5$  мВ, что соответствует  $\pm 0,5$  Гс для  $3RMS$ .

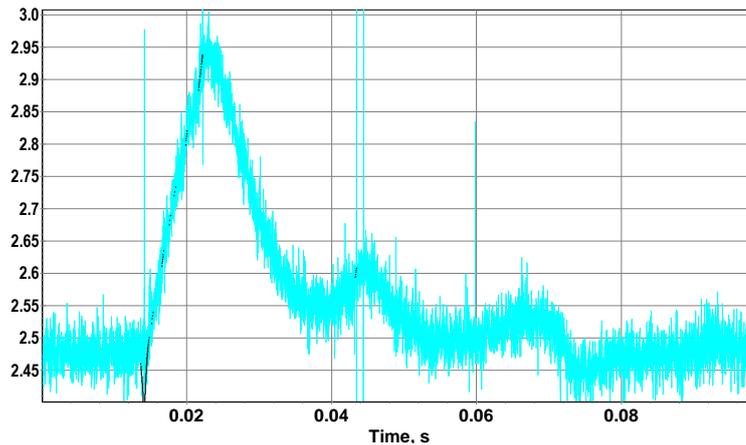


Рисунок 22 – Сигнал с датчика Холла до и после фильтрации  
Голубой – исходный сигнал, черный – сигнал после фильтрации

Отклонение чувствительности ДХ вследствие зависимости от температуры и напряжения питания. Согласно данным производителя датчики Холла имеют слабую зависимость от температуры и напряжения питания. Изменение чувствительности датчика составляет  $\pm 0,02\%$  для изменения температуры на  $\pm 1$  °С. Зависимость чувствительности датчика от напряжения питания составляет  $\pm 0,35\%$  на  $\pm 0,05$  В. В экспериментах ошибка от данных факторов составляла менее  $0,2\%$ , что является очень малой величиной. Таким образом, данная ошибка была опущена при дальнейшем анализе.

Для оценки полной погрешности измерений необходимо учесть все факторы, влияющие на погрешность измерений ДХ.

Измеренное отдельным датчиком Холла значение магнитного поля  $B$  в зависимости от угла смещения нормали датчика от измеряемой составляющей поля можно представить в следующем аналитическом виде:

$$B = B_{\parallel} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \pm B_{\perp} \sin \varphi_1 \quad (1)$$

где  $B_{\parallel}$  – измеряемая датчиком компонента магнитного поля;

$B_{\perp}$  – магнитное поле перпендикулярное измеряемой компоненте;

$\varphi_1$  – угол смещения нормали датчика от вектора измеряемой компоненты магнитного поля в поперечной плоскости;

$\varphi_2$  – угол смещения нормали датчика от вектора измеряемой компоненты магнитного поля в тороидальном направлении.

Знак во втором члене правой части уравнения зависит от рассматриваемой компоненты и направления магнитного поля.

Относительную ошибку измерения в зависимости от угла смещения с учетом выражения (1) можно представить в следующем виде:

$$\frac{\Delta B}{B_{\parallel}} = \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - 1 \pm \frac{B_{\perp}}{B_{\parallel}} \sin \varphi_1 \quad (2)$$

Из выражения (3) видно, что относительные ошибки измерений компонент магнитного поля датчиком Холла зависят от углов отклонения компонент датчика и от соотношений измеряемых магнитных полей.

Оценка относительной погрешности измерений показывает, что максимальная погрешность возникает при максимально возможном отношении компонент магнитного поля, показанном в выражении (2) в третьем члене выражения. Для случая с максимальным отношением  $V_{\perp}/V_{\parallel} = 10$  и  $3^{\circ}$  угла отклонения погрешность измерения компонент магнитного поля достигает 50%. При меньших отношениях компонент магнитных полей, что наиболее вероятно в области нуля поля, относительная погрешность уменьшается и достигает 5% при равных значениях измеряемых компонент магнитного поля.

Для определения полной погрешности была использована алгебраическая сумма погрешностей от отдельных факторов.

Суммарная максимальная погрешность измерения с учетом шума при соотношении 10:1 компонент поля для датчика измеряющего меньшее поле (1 Гс) может составлять 100%, т.е. 1 Гс. А для большего измеряемого поля (10 Гс) – 5,6%, т.е. 0,56 Гс. Таким образом, при анализе экспериментальных данных отдельных компонент поля примем абсолютную погрешность равную  $\pm 1$  Гс.

Однако, в настоящих измерениях наиболее интересным является информация о модуле магнитного поля. Как показал анализ, в случае углового отклонения компонент в  $3^{\circ}$  и отношении составляющих поля в 10 раз относительная погрешность измерения модуля поля  $\Delta|V|/|V_0|$  составляет 0,5%. В этом случае суммарная максимальная относительная погрешность измерения модуля с учетом шума при измерении малых полей (1 Гс) составляет 50,5%, а при измерении больших полей (10 Гс) 1 %.

Следует отметить, что указанное значение погрешности является оценкой сверху. Поскольку для приведенных выше факторов были указаны предельные значения, которые при проведении экспериментов были меньше или находились в пределах такой погрешности.

## **2.4 Измерение нуля поля в токамаке КТМ с использованием матрицы трехмерных датчиков Холла**

Для проведения анализа конфигурации нуля поля был выбран один из расчетных сценариев обеспечивающий значение электрического поля на внутреннем обходе вакуумной камеры равным 7 В. Расчеты токового сценария были проведены с использованием расчетного кода Plasmaless Tokscen [62]. На рисунке 23 приведены картины конфигурации нуля магнитного поля для рассматриваемого сценария, представленные в виде линий уровня модуля магнитного поля. Шаг линий уровня составляет один гаусс, и начинается от первой замкнутой поверхности, расположенной внутри.

Для проведения расчетов использовалась оптимизированная модель вакуумной камеры КТМ. Оптимизация модели ВК для достижения наиболее близкого соответствия результатов расчетов и получаемых экспериментально была проведена в рамках гранта МОН РК 2064/ГФ4 «Разработка численной

модели динамики магнитных полей в вакуумной камере токамака с учетом наведенных вихревых токов, и ее верификация на конфигурациях нуля поля токамака КТМ». Оптимизация модели вакуумной камеры осуществлялась путем сравнения данных, полученных по магнитным измерениям матрицей ДХ.

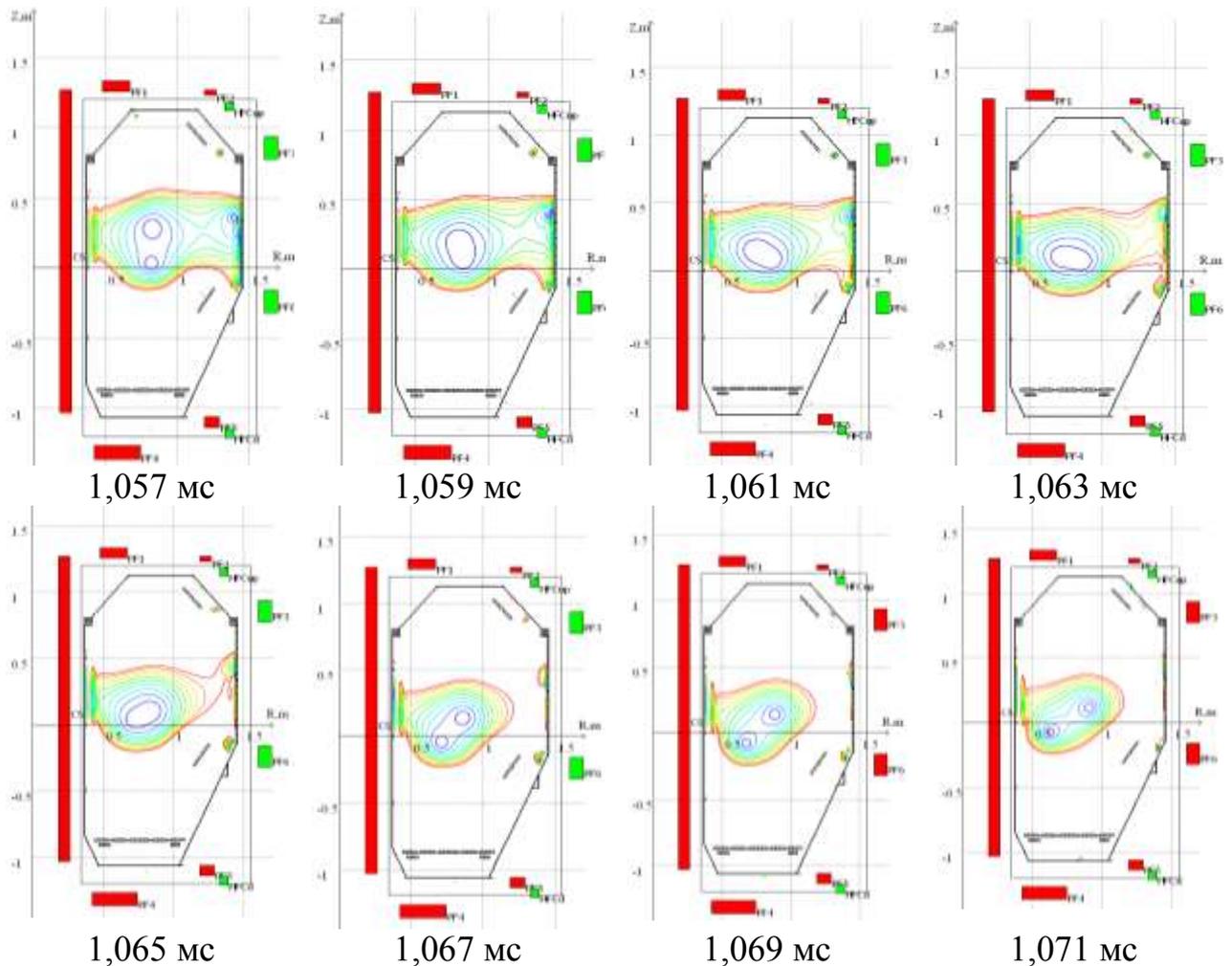
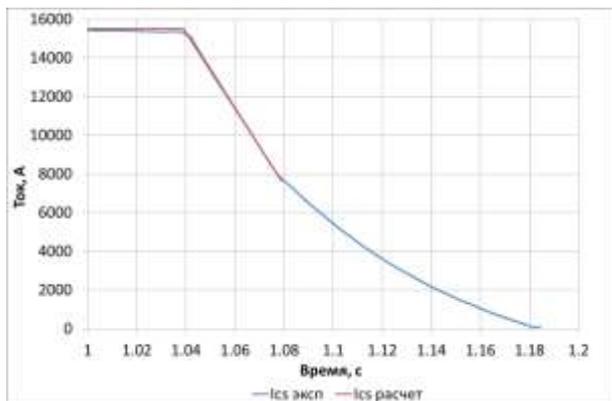


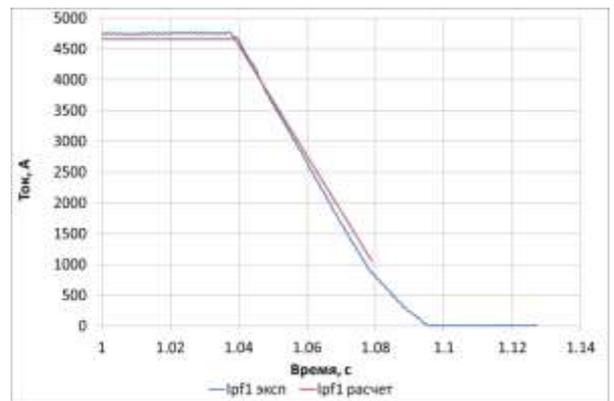
Рисунок 23 – Эволюция ноля поля для сценария с напряжением на обходе 7 В

На рисунке 24 показаны кривые токов в обмотках ЭМС КТМ для рассматриваемого сценария. Как видно из рисунка 24 ноль поля достигается во время спада тока в центральном соленоиде, что соответствует проектному решению.

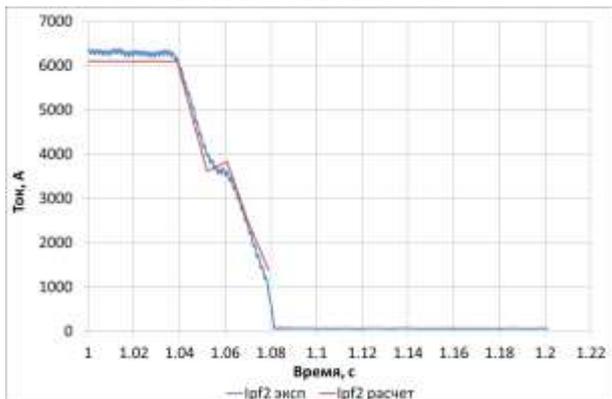
На рисунке 24 также показаны кривые токов в обмотках ЭМС КТМ полученные экспериментально. Для достижения необходимой производной тока в центральном соленоиде (CS) используется специальное подключаемое балластное сопротивление в токовый контур в момент начала вывода тока из обмотки. Как видно из графиков полученные токи достаточно близки к исходным задаваемым, однако есть и некоторые отличия. В дальнейшем для корректности сравнения конфигураций ноль-поля в качестве исходных данных для кода Plasmaless Tokscen использовались экспериментально полученные кривые токов в обмотках.



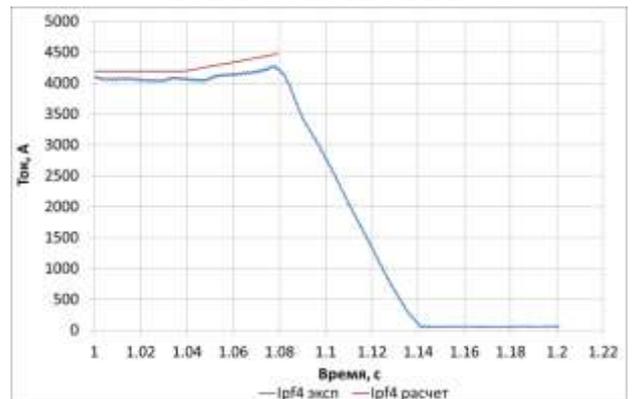
Ток в обмотке CS



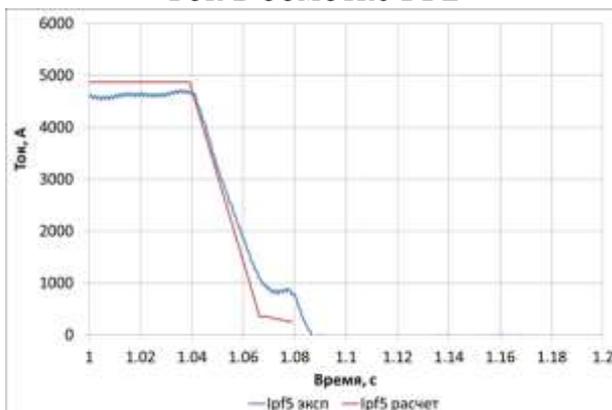
Ток в обмотке PF1



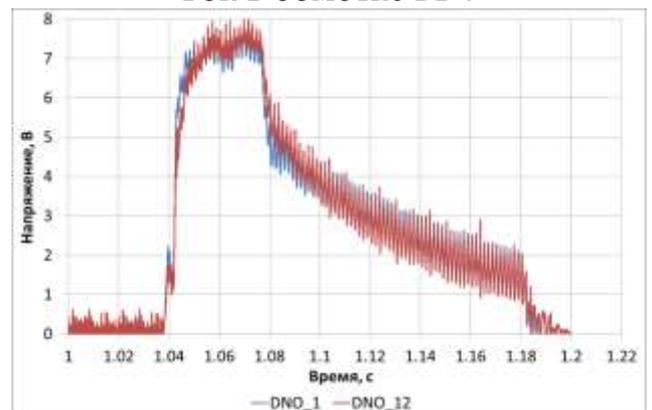
Ток в обмотке PF2



Ток в обмотке PF4



Ток в обмотке PF5



Напряжение на обходе

Рисунок 24 – Токи в обмотках ЭМС КТМ и напряжение на обходе

Для измерения реальной конфигурации ноль поля матрица трехмерных датчиков Холла была установлена в области ожидаемого местонахождения минимума полоидальных полей рассеяния (ноль поля) в соответствии с расчетами по коду Plasmaless Tokscen. Координаты расположения матрицы внутри вакуумной камеры:  $R=581\div 931$  мм,  $Z=0\div 350$  мм.

На рисунке 25 показан эскиз матрицы ДХ расположенной внутри вакуумной камеры КТМ в расчетной области ноль поля.

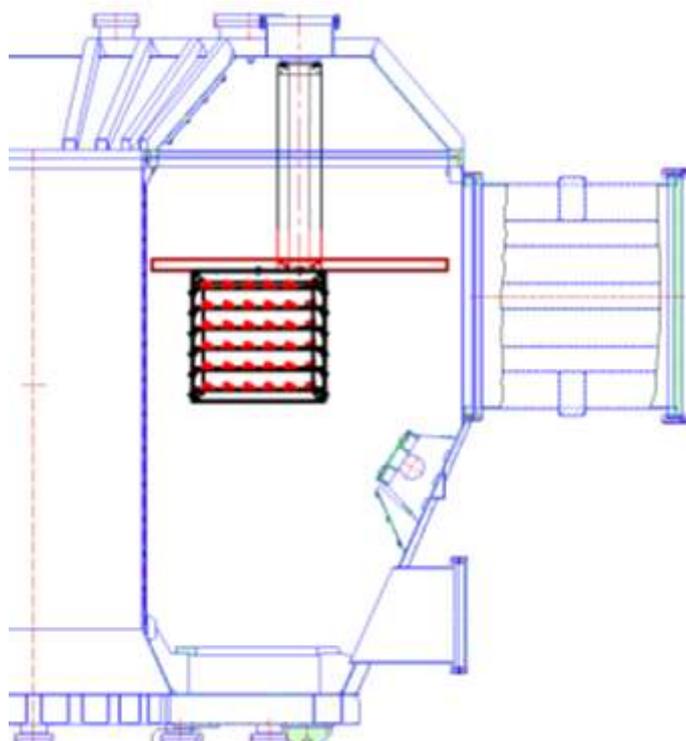


Рисунок 25 – Расположение матрицы ДХ внутри вакуумной камеры КТМ для измерения ноль поля

После установки измерительной сетки ДХ внутри ВК КТМ была проведена окончательная проверка работы датчиков Холла по месту путем поочередной подачи тока в обмотку тороидального поля и последовательно соединенные обмотки PF3 и PF6. Питание данных обмоток осуществлялось от источника постоянного тока модели Varied RD-15-120 с номинальными значениями тока и напряжения 120 А и 15 В соответственно. При этом, как показали контрольные измерения, максимальное значение силы тока, выдаваемое источником питания, составляет 124 А.

В таблице 4 приведены расчетные значения тороидального магнитного поля в координатах размещения датчиков Холла. В таблице 4 приведены значения магнитного поля в зависимости от радиуса, поскольку тороидальное магнитное поле на фиксированном радиусе R не изменяется по Z.

Таблица 4 – Расчетное значение тороидального магнитного поля при токе питания обмотки TF равным 124 А в точках размещения датчиков Холла

R, м	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
Магнитное поле, Гс	21.3	23.0	25.1	27.5	30.5	34.1

В таблице 5-7 приведены результаты измерения тороидального магнитного поля матрицей трехмерных датчиков Холла.

Таблица 5 – Измеренное значение тороидального поля (Гс) тороидальной компонентой  $B_t$  матрицы трехмерных ДХ при токе питания обмотки 124 А.

$\downarrow Z/R \rightarrow, \text{м}$	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	21.5	23.0	25.2	27.7	30.2	34.7
0.28	21.2	22.9	25.1	27.2	30.3	34.5
0.21	20.9	22.6	24.8	27.4	30.4	34.2
0.14	21.2	22.9	24.7	27.4	30.3	34.0
0.07	21.3	22.6	25.4	27.5	30.4	34.3
0	21.2	23.1	25.2	27.3	30.1	33.8

Таблица 6 – Показания вертикальной компоненты  $B_z$  (Гс) трехмерного датчика Холла при измерении тороидального магнитного поля при токе питания обмотки 124 А.

$\downarrow Z/R \rightarrow, \text{м}$	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	-0.1	-0.2	-0.4	-1.2	-1.3	-0.5
0.28	-0.4	1.3	-0.0	0.1	1.4	0.6
0.21	-0.8	-0.2	-0.5	1.3	-0.4	1.4
0.14	-0.3	0.2	0.4	0.9	0.6	1.1
0.07	-0.4	0.6	0.9	0.7	0.6	1.1
0	0.4	1.1	0.1	0.7	1.2	0.6

Таблица 7 – Показания радиальной компоненты  $B_r$  (Гс) трехмерного датчика Холла при измерении тороидального магнитного поля при токе питания обмотки 124 А.

$\downarrow Z/R \rightarrow, \text{м}$	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	-0.4	0.0	0.9	0.4	-0.8	-0.8
0.28	-0.1	0.8	0.8	0.4	0.1	1.2
0.21	0.9	-0.3	-0.1	-0.1	1.0	0.9
0.14	-0.2	-0.2	0.8	-0.3	0.5	1.3
0.07	-1.0	0.7	-0.5	-0.0	-0.0	-0.9
0	0.1	0.3	0.5	-0.3	-0.2	1.2

В таблице 8-9 приведены расчетные значения индукции магнитного поля от последовательно соединенных обмоток PF3-PF6 при токе питания 124 А в точках размещения датчиков Холла.

Таблица 8 – Расчетное значение вертикальной составляющей  $B_z$  (Гс) магнитного поля в точках размещения ДХ от последовательно соединенных обмоток PF3 и PF6 при токе питания 124 А.

$\downarrow Z/R \rightarrow$ , м	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	29.3	29.1	28.9	28.7	28.4	28.2
0.28	29.3	29.1	28.9	28.7	28.4	28.2
0.21	29.3	29.1	28.9	28.6	28.4	28.1
0.14	29.5	29.2	28.9	28.6	28.3	28
0.07	29.7	29.3	28.9	28.5	28.2	27.9
0	29.8	29.3	28.8	28.5	28	27.7

Из таблицы 8 видно, что последовательно соединенные обмотки PF3-PF6 дают почти однородное вертикальное магнитное поле в месте размещения матрицы ДХ. Однако, как видно из таблицы 9, имеется небольшая горизонтальная составляющая поля, увеличивающаяся по мере уменьшения координаты  $Z$  к нулю.

Таблица 9 – Расчетное значение радиальной составляющей  $B_r$  (Гс) магнитного поля в точках размещения ДХ от последовательно соединенных обмоток PF3 и PF6 при токе питания 124 А.

$\downarrow Z/R \rightarrow$ , м	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1
0.28	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
0.21	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3
0.14	-0.4	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
0.07	-0.7	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9
0	-1.2	-1.3	-1.3	-1.3	-1.3	-1.1

Полученные данные по результатам измерения магнитного поля от последовательно соединенных обмоток PF3, PF6 матрицей ДХ приведены в таблицах 10-12.

Таблица 10 – Значение индукции магнитного поля, измеренное вертикальной компонентой  $B_z$  (Гс) матрицы датчиков Холла при последовательно соединенных обмотках PF3 и PF6 (ток питания 124 А)

$\downarrow Z/R \rightarrow$ , м	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	29,0	29,0	28,9	28,4	28,4	28,9
0.28	28,9	29,1	29,4	28,6	28,3	27,9
0.21	29,1	28,9	29,0	28,4	28,3	27,8
0.14	29,3	28,9	28,9	28,8	28,3	27,9
0.07	30,1	29,2	29,1	28,2	27,9	27,6
0	29,6	29,3	28,8	28,1	27,8	27,9

Таблица 11 – Показания радиальной компоненты  $B_r$  (Гс) матрицы трехмерных датчиков Холла при измерении магнитного поля от последовательно соединенных обмоток PF3, PF6 (ток питания 124 А).

$\downarrow Z/R \rightarrow$ , м	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	-0.9	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.3
0.28	-0.4	-0.1	-0.4	-0.4	-0.2	-0.2
0.21	0.2	-0.2	-0.3	-0.4	-0.9	-0.5
0.14	-0.4	-0.7	-0.5	-0.5	0.0	-0.9
0.07	-1.3	-0.8	-0.6	-0.2	-0.8	-1.1
0	-1.0	-1.0	-1.5	-1.6	-1.5	-1.2

Таблица 12 – Показания тороидальной компоненты  $B_t$  (Гс) матрицы трехмерных датчиков Холла при измерении магнитного поля от последовательно соединенных обмоток PF3, PF6 (ток питания обмоток 124 А).

$\downarrow Z/R \rightarrow$ , м	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	-0.1	0.4	-0.5	-1.3	-0.8	-0.9
0.28	0.4	1.1	-0.8	0.2	0.5	0.3
0.21	-1.3	0.0	0.3	-0.3	-0.7	0.3
0.14	0.5	0.4	0.8	0.4	0.6	-0.1
0.07	-0.3	0.3	0.1	0.9	0.3	0.7
0	0.7	0.6	0.5	0.6	1.2	0.3

Как видно из таблиц 4-12 неточность измерения магнитного поля не превышает 0,5 Гс. При этом отклонение от ортогональности компонент датчиков Холла не превышает 3 градуса, что дает максимальную паразитную составляющую 1,5 Гс от перпендикулярной компоненты магнитного поля равной 30 Гс.

После проведенной проверки и настройки измерительной матрицы датчиков Холла были проведены эксперименты по измерению поля магнитного поля.

Обработка и анализ результатов измерений выявил один неожиданный эффект, проявляющийся в наличие дополнительного тороидального магнитного поля во время пуска. В таблицах 13-15 приведены измеренные значения поля всех трех компонент матрицы датчиков Холла взятые на стадии полки тока в обмотках ЭМС КТМ на временной точке 1,025 с пуска 3410, когда наведенные вихревые токи по вакуумной камере спадают до нуля.

Таблица 13 – Значения магнитного поля (Гс) измеренные тороидальной компонентой  $V_t$  матрицы трехмерных датчиков Холла при измерении поля магнитного поля ( $t=1,025$  с).

$\downarrow Z/R \rightarrow$ , м	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	3.4	3.4	6.2	8.9	9.5	11.9
0.28	2.8	1.9	5.9	5.5	6.2	8.7
0.21	5.7	3.9	3.8	6.2	8.0	7.6
0.14	2.1	3.0	2.2	4.4	4.2	7.4
0.07	3.0	2.5	3.9	2.4	4.7	6.3
0	1.4	1.9	2.4	3.1	2.3	4.2

Таблица 14 – Значения магнитного поля (Гс) измеренные радиальной компонентой  $V_r$  матрицы трехмерных датчиков Холла при измерении поля магнитного поля ( $t=1,025$  с).

$\downarrow Z/R \rightarrow$ , м	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	-4.5	-3.5	-0.8	2.9	6.2	10.7
0.28	-3.4	-3.9	-2.9	-1.5	0.3	2.2
0.21	-4.2	-4.8	-5.5	-6.1	-5.2	-6.2
0.14	-2.8	-5.6	-8.6	-11.1	-14.4	-14.8
0.07	-2.2	-7.5	-12.4	-17.9	-20.8	-23.7
0	-3.1	-9.6	-15.4	-21.3	-27.9	-35.2

Таблица 15 – Значения магнитного поля (Гс) измеренные вертикальной компонентой  $V_z$  матрицы трехмерных датчиков Холла при измерении поля магнитного поля ( $t=1,025$  с).

$\downarrow Z/R \rightarrow$ , м	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	-55.3	-53.0	-53.9	-55.9	-61.3	-71.9
0.28	-54.3	-54.8	-57.1	-59.3	-64.5	-71.8
0.21	-53.9	-54.5	-56.8	-60.3	-64.1	-73.5
0.14	-53.2	-52.9	-55.9	-60.5	-66.1	-73.7
0.07	-51.9	-50.3	-53.1	-57.5	-64.4	-73.3
0	-44.9	-46.3	-49.3	-54.4	-61.5	-71.9

Как видно из таблицы 13 тороидальное магнитное поле имеет тенденцию к увеличению по мере приближения к внутреннему обводу камеры и увеличению координаты по высоте. Разумно предположить, что наличие тороидальной составляющей магнитного поля связано с угловым отклонением тороидальной компоненты ДХ. Однако, как видно из таблицы 15, максимальное значение вертикальной составляющей магнитного поля составляет около 70 Гс, что при  $3^\circ$  угловой неточности установки тороидальной компоненты ДХ дает около 3,5 Гс паразитного поля. Что никак не объясняет наличия магнитного поля на уровне 10 Гс. При этом радиальная компонента не вносит значительного вклада (Таблица 14) в показания тороидальной компоненты ДХ, вследствие относительно не большого значения радиальной составляющей магнитного

поля, не превышающего 10-20 Гс. Также хорошо прослеживается тенденция к увеличению магнитного поля по мере увеличения координаты по Z. Подобная тенденция отсутствует в показаниях двух других компонент датчиков Холла, что свидетельствует о действительном наличии тороидальной составляющей магнитного поля. В связи с этим, для повышения точности измерений, в дальнейшем для обработки и анализа конфигурации ноль поля использовались только две компоненты ДХ – радиальная и вертикальная.

В качестве дополнительного подтверждения наличия тороидальной составляющей магнитного поля можно привести результаты пуска другого сценария разряда (пуск №3402), в котором также на полке тока отчетливо наблюдается практически такой же эффект наличия тороидального магнитного поля и его распределения, описанный выше. При этом значения радиальной и вертикальной составляющей полоидального магнитного поля не превышают 30 Гс. На рисунке 26 приведены графики тока, измеренные на пуске №3402. В таблицах 16-18 приведены значения поля всех трех компонент матрицы датчиков Холла взятые также на стадии полки тока в обмотках ЭМС КТМ разряда №3402.

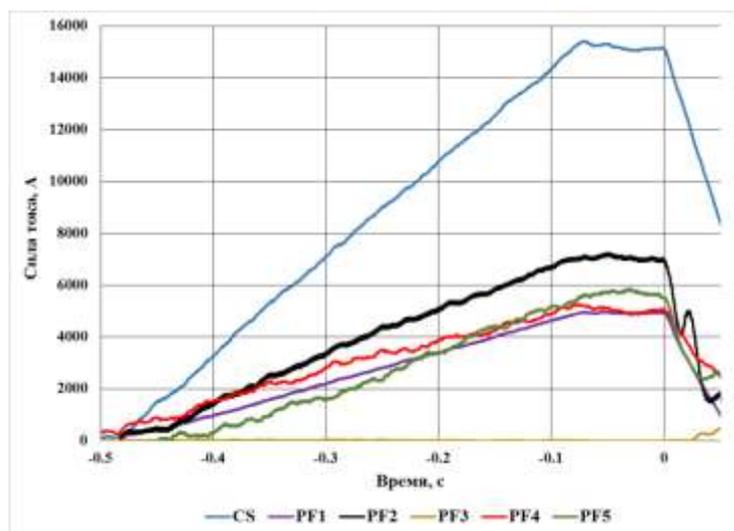


Рисунок 26 – Графики токов в обмотках ЭМС КТМ разряда №3402

Таблица 16 – Значения индукции магнитного поля (Гс) измеренные тороидальной компонентой  $B_t$  матрицы трехмерных датчиков Холла на пуске № 3402 ( $t=1,025$  с)

$\downarrow Z/R \rightarrow$ , м	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	3.2	4.1	5.2	6.9	8.3	10.6
0.28	3.1	2.8	5.2	5.5	6.6	8.9
0.21	4.4	3.8	3.9	5.6	6.8	8.0
0.14	2.6	2.9	3.2	4.7	5.2	7.4
0.07	2.4	2.6	3.6	3.6	4.9	6.9
0	2.1	2.6	2.9	3.7	4.1	5.1

Таблица 17 – Значения индукции магнитного поля (Гс) измеренные радиальной компонентой  $B_r$  матрицы трехмерных датчиков Холла на пуске № 3402 ( $t=1,025$  с)

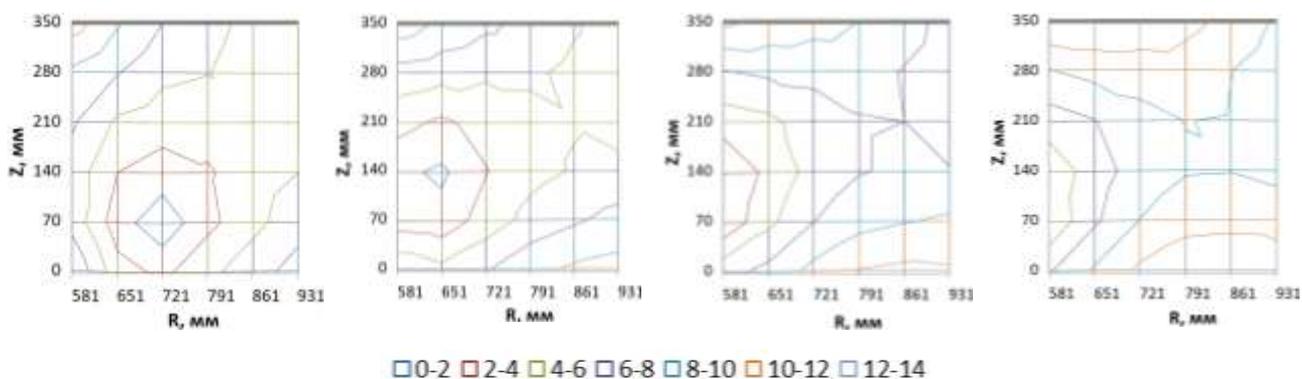
$\downarrow Z/R \rightarrow$ , м	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	-5.7	-5.2	-3.7	-0.8	3.0	7.6
0.28	-2.0	-2.6	-1.9	-1.4	0.1	1.6
0.21	0.7	-0.3	-1.4	-2.4	-2.8	-3.7
0.14	4.4	1.8	-1.3	-3.9	-7.2	-9.2
0.07	8.3	2.9	-1.5	-6.6	-10.7	-14.9
0	10.7	4.9	-1.6	-7.9	-15.1	-22.4

Таблица 18 – Значения магнитного поля (Гс) измеренные вертикальной компонентой  $B_z$  матрицы трехмерных датчиков Холла при измерении поля магнитного поля ( $t=1,025$  с).

$\downarrow Z/R \rightarrow$ , м	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	-26.9	-22.5	-20.7	-19.4	-21.2	-26.1
0.28	-27.1	-24.2	-22.4	-22.3	-24.5	-28.2
0.21	-26.0	-23.3	-22.3	-22.7	-24.2	-29.5
0.14	-24.2	-21.2	-20.4	-21.7	-24.4	-28.9
0.07	-20.7	-17.6	-17.1	-18.0	-21.4	-26.8
0	-14.4	-12.2	-11.3	-13.1	-16.9	-23.4

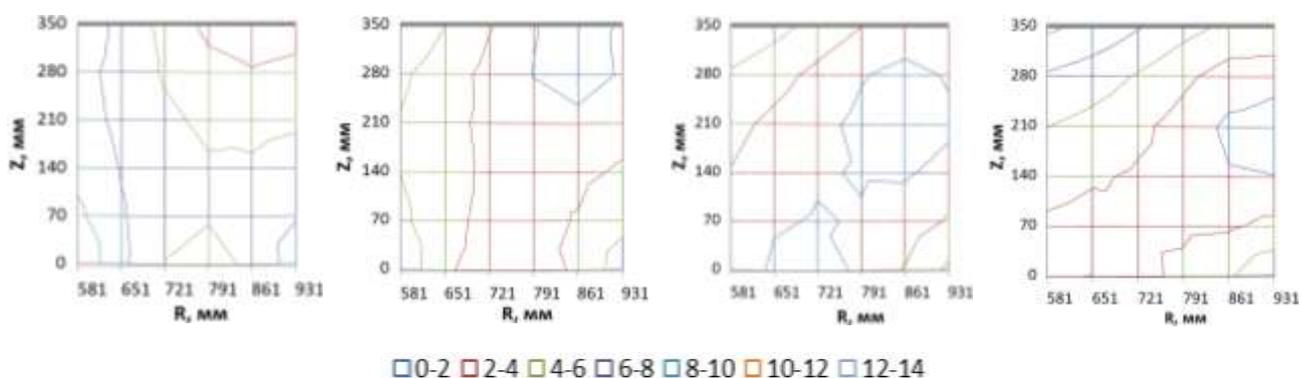
Из сравнения данных таблиц 13,16 можно увидеть одинаковую тенденцию увеличения поля по мере движения от внешнего обвода к внутреннему и при перемещении снизу-вверх. При этом значение амплитуды тороидального магнитного поля в одних и тех же точках сравниваемых пусков отличаются не значительно. Однако, значения радиальных составляющих полоидального поля меньше в разряде 3402 в два раза.

На рисунках 27,28 приведены картины поля магнитного поля, построенные по результатам измерений матрицей ДХ и по данным полученным по коду Plasmaless Tokscen.



а)  $t=1,058$  мс      б)  $t=1,061$  мс      в)  $t=1,064$  мс      г)  $t=1,067$  мс

Рисунок 27 – Линии уровня модуля магнитного поля (Гс), измеренные матрицей ДХ, для четырех временных точек



а)  $t=1,058$  мс      б)  $t=1,061$  мс      в)  $t=1,064$  мс      г)  $t=1,067$  мс

Рисунок 28 – Линии уровня модуля магнитного поля (Гс), построенные по данным расчетного кода Plasmaless Tokscen, для четырех временных точек

В таблицах 19 и 20, для примера, приведены измеренные значения вертикального и горизонтального магнитного поля датчиками Холла в момент времени  $t=1,058$  мс рассматриваемого пуска №3410. По измеренным значениям компонент вертикального и горизонтального поля рассчитывалось значение модуля магнитного поля в местах расположения ДХ. По рассчитанным значениям модуля магнитного поля строились линии уровня магнитного поля, как показано на рисунке 27 и 28.

Таблица 19 – Значения магнитного поля (Гс) измеренные радиальной компонентой  $B_r$  матрицы трехмерных датчиков Холла при измерении поля магнитного поля ( $t=1,058$  с).

$\downarrow Z/R \rightarrow$ , м	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	2,6	4,1	4,7	5,4	5,3	3,
0.28	2,9	3,4	4,0	3,4	2,6	0,9
0.21	3,5	3,8	3,1	2,0	0,6	-1,3
0.14	4,7	4,1	2,9	1,6	-1,2	-3,8
0.07	6,8	5,2	3,5	0,6	-2,7	-6,3
0	8,6	7,2	4,3	0,5	-4,1	-9,9

Таблица 20 – Значения магнитного поля (Гс) измеренные вертикальной компонентой  $B_z$  матрицы трехмерных датчиков Холла при измерении поля магнитного поля ( $t=1,058$  с).

$\downarrow Z/R \rightarrow$ , м	0.931	0.861	0.791	0.721	0.651	0.581
0.35	-3,3	-3,8	-4,6	-5,9	-8,8	-12,4
0.28	-3,8	-3,8	-4,6	-5,5	-7,7	-9,6
0.21	-3,9	-3,7	-3,4	-4,5	-5,6	-8,2
0.14	-3,7	-2,6	-2,4	-2,6	-3,8	-6,1
0.07	-2,7	-1,0	-0,1	-0,0	-0,9	-3,7
0	-1,4	1,1	3,2	3,5	2,6	0,2

Результаты измерений магнитного поля с использованием матрицы датчиков Холла (Рисунок 27) показали наличие поля в рассматриваемый промежуток времени. Линии уровня поля образуют гантелевидную, раздвоенную форму.

Также можно увидеть из сравнения картин модуля магнитного поля (рисунок 27, 28) имеются отличия картины, измеренной с помощью матрицы датчиков Холла и получаемой по расчетному коду Plasmaless Tokscen. В целом область поля магнитного поля по расчетному коду занимает большую область и отличается положением в рассматриваемые моменты времени.

На рисунке 6 приведены для сравнения картины модуля магнитного поля для одной из временных точек рассматриваемого разряда, полученные с помощью кодов Plasmaless Tokscen с оптимизированной моделью вакуумной камеры КТМ (Рисунок 29-а) и без оптимизации (Рисунок 29-б), а также картина поля, полученная по расчетно-восстановительному коду MMF [63].

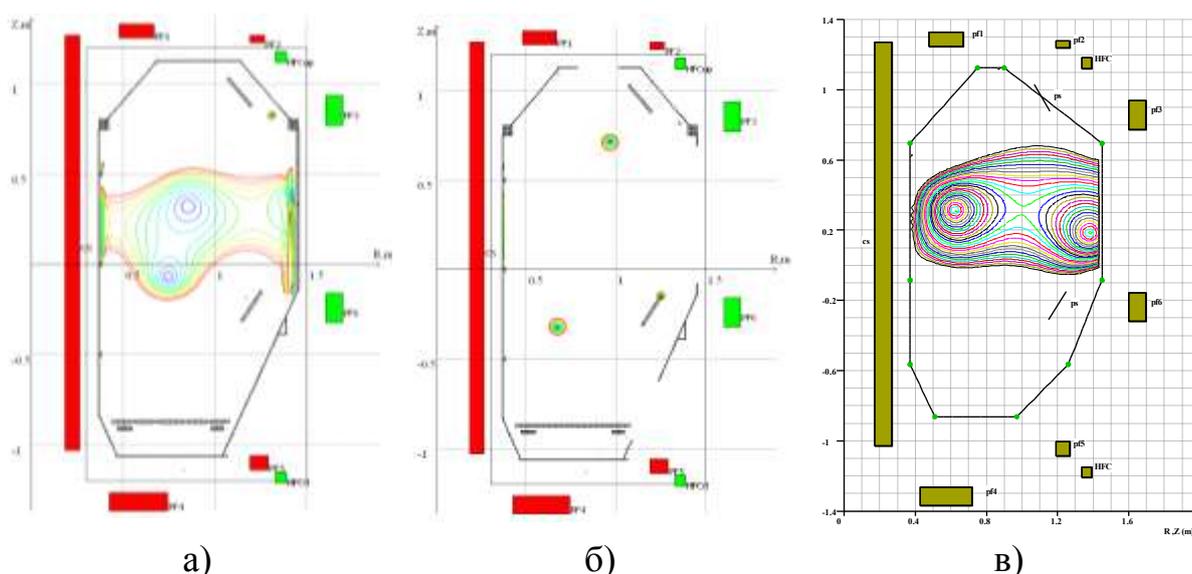


Рисунок 29 – Конфигурации магнитного поля в момент времени  $t=1,061$  с, рассчитанные по кодам: а) Plasmaless Tokscen с оптимизированной моделью ВК, б) Plasmaless Tokscen без оптимизации модели ВК, в) MMF

Расчетный код ММФ использует экспериментальные данные с датчиков напряжения на обходе для восстановления магнитной конфигурации поля внутри вакуумной камеры токамака.

Как видно из рисунка 29-б при использовании не оптимизированной модели ВК КТМ в рассматриваемый момент времени практически отсутствует область ноль поля внутри вакуумной камеры. Результаты расчетов по коду ММФ (рисунок 29-в) показали наличие ноль поля, однако его форма и размеры заметно отличаются от конфигурации поля, рассчитанной по коду Plasmaless Tokscen и полученной по магнитным измерениям датчиков Холла. Ноль поля по коду ММФ находится выше и имеет меньшую область по сравнению с конфигурацией поля полученной по коду Plasmaless Tokscen и измерениям по ДХ.

Еще одним подтверждением корректности и эффективности проводимых измерений по разработанному способу, как будет показано в следующей главе, является достижение лавинного омического пробоя рабочего газа на токамаке КТМ по результатам расчета соответствующего сценария пробоя по коду Plasmaless Tokscen с оптимизированной моделью ВК КТМ на основе измерений матрицей трехмерных ДХ.

## **2.5 Выводы по разделу**

Таким образом, на основе полученных результатов работ, приведенных во второй главе можно сделать следующие выводы:

1. Разработан способ прямого измерения ноль поля в установке токамак с использованием трехмерных датчиков Холла;
2. Проведены измерения конфигурации ноль поля в токамаке КТМ с использованием матрицы трехмерных ДХ.
3. На основе полученных результатов была проведена верификация численных кодов для расчета и восстановления ноль поля. В результате анализа было обнаружено сильное расхождение расчетной конфигурации ноль поля и измеренной при помощи матрицы ДХ.
4. Проведенные расчеты сценария плазменного пробоя для токамака КТМ с использованием оптимизированной расчетной модели ВК КТМ позволили достичь лавинного пробоя.

### **3 СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА КТМ**

В настоящей главе приводятся основные результаты по разработке системы визуализации плазмы токамака КТМ и экспериментальным измерениям плазменного разряда на токамаке КТМ, которые опубликованы в следующих работах [64-69].

#### **3.1 Разработка конструктивной концепции системы визуализации плазменного шнура и требований к ней**

При разработке системы визуализации плазменного шнура были сформулированы следующие основные требования, предъявляемые к ней:

- обеспечение максимально возможного угла обзора, позволяющего проводить наблюдения за как можно большим объемом вакуумной камеры и соответственно плазменным шнуром;
- получение качественного изображения с высоким разрешением;
- возможность одновременной регистрации изображения быстрой и медленной видеокамерами;
- возможность использования оптических фильтров;
- использование усилителя яркости изображения для наблюдения быстрых процессов с использованием скоростной видеокамеры;
- гибкость и функциональность системы;
- максимальная унификация элементов и минимизация стоимости всей системы;
- формат изображения 1/2" (4,8x6,4 мм), тип крепления элементов системы C-mount.

В связи с наличием относительно длинных экваториальных патрубков вакуумной камеры токамака КТМ, ограничивающих проведение визуальных наблюдений за плазмой и процессами в ней, существует необходимость в создании эндоскопической системы, которая позволит поместить собирающий объектив как можно ближе к плазменному шнуру и уменьшить ограничивающее влияние экваториального патрубка. Как было показано в разделе 1 данный подход не редко применяется в современных токамаках [38-42]. Такой же метод планируется использовать в создающемся сейчас международном экспериментальном термоядерном токамаке реакторе ИТЭР [50, 51], а также на токамаке JT-60SA [49].

Принципиально возможны два варианта исполнения эндоскопической системы:

- на основе системы линз для транспортировки изображения;
- с использованием оптоволоконного световода для передачи изображения.

Каждая из этих систем имеет свои преимущества и недостатки. В системе на основе линз возможно достижения высокого коэффициента передачи и хорошего разрешения. Однако проблемным местом в такой системе является организация больших углов обзора и получения качественного изображения из-

за возможных оптических искажений, связанных как с неточностью проектирования оптической системы, изготовления и сборки, так и несовершенством оптических элементов. Стоимость разработки и изготовления такой системы будет высока. К тому же такая система будет жестко привязана к месту расположения.

Системы на основе оптоволоконного световода обладают гибкостью и позволяют: транспортировать изображение на большие расстояния без потери качества изображения, использовать стандартные серийные широкоугольные и ультра широкоугольные объективы и снизить затраты на проектные работы. К недостаткам оптоволоконных световодов можно отнести относительно невысокий коэффициент передачи – не более 50-60 %, и ограничение по разрешению связанное с размерами единичного волокна в мультиэлементной структуре световода. Однако на сегодняшний день технология изготовления оптоволоконных световодов позволяет производить световоды с диаметром единичного оптоволокна от 3 до 11 мкм, что дает разрешение от 40 до 100 пар штр./мм и более, что уже сравнимо с разрешением хорошего объектива. К тому же, такие же размеры ячейки имеют матрицы современных видеокамер. Таким образом, теоретически можно достичь высококачественного изображения.

С учетом последних достижений в области производства оптоволоконных световодов, их гибкости, относительно невысокой стоимости, перспективности использования, а также минимизации затрат на разработку было решено создать эндоскопическую систему на основе оптоволоконного световода.

Проведенный анализ производителей показал, что на сегодняшний день наилучшим вариантом доступным на рынке являются оптоволоконные световоды для передачи изображения от компании SCHOTT Inc. (США). Основные характеристики оптоволоконных световодов компании SCHOTT Inc. приведены в таблице 21 [69].

Таблица 21 – Технические характеристики оптоволоконного световода для передачи изображения компании SCHOTT Inc.

Характеристика	Значение
Разрешение	50 пар штр./мм
Числовая апертура	60
Размер единичного волокна	10 мкм
Коэффициент передачи	50 %
Максимально допустимая температура прогрева	120 °С

Световоды фирмы SCHOTT на сегодняшний день являются лучшим предложением, соответствующим необходимым техническим требованиям. Как видно из таблицы 21 размер одиночного оптоволокна в жгуте составляет 10 мкм. Следует отметить, что есть производители световодов изготавливающие оптоволокна с меньшими диаметрами единичного волокна, однако

технологически не имеющие возможность изготовить шнур диаметром передающей области больше 3 мм. Фирма SCHOTT имеет возможность производить световоды размером передающей области вплоть до 25x25 мм.

Исходя из того, что формат изображения на имеющихся в распоряжении медленной видеокамере JAI CB-140GE и высокоскоростной Fastec Inline составляет 1/2", что соответствует размеру матрицы 4,8x6,4 мм, была выбрана стандартная модель оптоволоконного световода IG-567-48, размером рабочей области 5x6,7 мм и длиной 1200 мм. Следует отметить, что данные световоды оснащаются присоединительными концевиками типа C-mount, что даёт возможность использовать стандартные и широко распространённые телевизионные объективы и другие оптические элементы.

Следующим этапом стал подбор входных объективов, разработка оптической схемы передачи изображения от оптоволоконного световода к видеокамере (-ам) и выбор необходимых комплектующих.

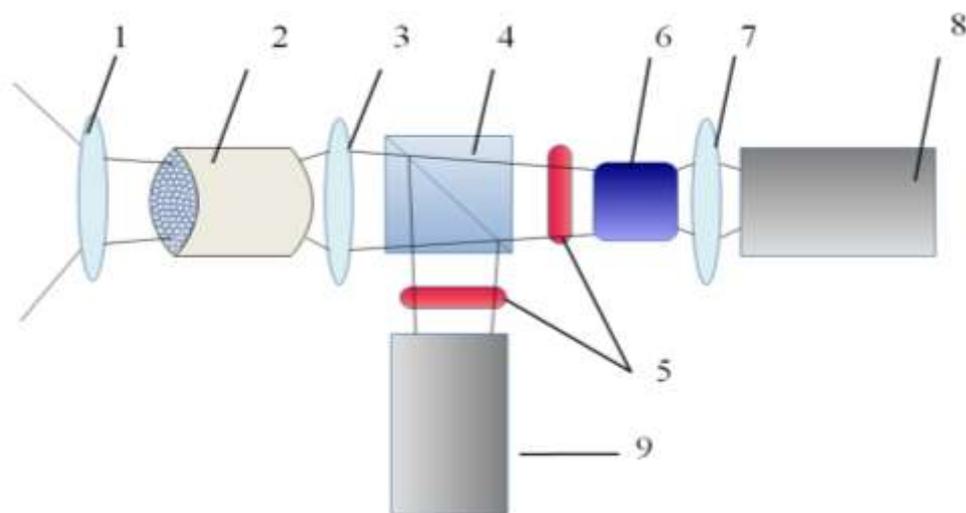
В качестве входных собирающих объективов были выбраны два телевизионных объектива: широкоугольный KOWA LM4NCL и «рыбий глаз» Fujinon FE185C086HA-1. Основные характеристики указанных объективов приведены в таблице 22. Данные объективы имеют наибольшие углы обзора для формата изображения 1/2" из представленных на рынке.

Таблица 22 – Основные технические характеристики объективов KOWA LM4NCL и Fujinon FE185C086HA-1

Характеристика	KOWA LM4NCL	Fujinon FE185C086HA-1
Формат изображения	1/2"	1/2"
Размер изображения, мм	4,8x6,4	4,8x6,4
Углы обзора ГxВ, градусы	104°x77°	136°x102°
Относительное отверстие (диафрагма)	1,4	1,8–16
Разрешение, пар штр./мм	100	100
Диапазон фокусировки (от передней стороны объектива), м	0,2–∞	0,2–∞
Фокусное расстояние, мм	3,5	2,7

На рисунке 30 показана принципиальная оптическая схема системы визуализации плазменного шнура. Как видно из рисунка 30 изображение с выхода оптоволоконного световода при помощи специального объектива передающего изображение без увеличения, пройдя через оптический разветвитель, проецируется на матрицу медленной видеокамеры и фотокатод электронно-оптического преобразователя (ЭОП). С выхода ЭОП усиленное изображение будет передаваться на матрицу быстрой видеокамеры с помощью оборачивающего объектива с увеличением 1:1. Следует отметить, что

использование электронно-оптического преобразователя вызвано необходимостью усиления яркости изображения, чтобы получить контрастное и четкое изображение с быстрой видеокамеры. Предварительные эксперименты показали, что при непосредственном наблюдении за плазмой с частотой регистрации 500-1000 кадров/с изображение получается блеклым и слабо видимым. Это связано с короткой экспозицией (1-2 мс) и возможно не лучшим показателем чувствительности матрицы видеокамеры. Учитывая будущее использование световода в системе, коэффициент передачи которого составляет 50 %, а так же деление изображения пополам, при прохождении оптического разветвителя, то использование ЭОП является необходимым условием для проведения наблюдений за плазмой с использованием скоростной видеокамеры. Медленная видеокамера в использовании ЭОП не нуждается, так как яркости свечения плазмы достаточно для 30 мс экспозиции.



1 – входной объектив; 2 – оптоволоконный световод; 3 – проецирующий объектив;  
4 – оптический разветвитель; 5 – фильтры; 6 – ЭОП; 7 – оборачивающий объектив; 8 –  
быстрая видеокамера; 9 – медленная видеокамера

Рисунок 30 – Принципиальная оптическая схема системы визуализации плазменного шнура

Схема с разделением изображения позволит проводить одновременную видеосъемку быстрой и медленной видеокамерами с одним и тем же ракурсом и полем зрения. Такая схема дает несколько возможностей:

- проводить сравнительный анализ изображений и всегда иметь картинку в неискаженном видимом спектре на медленной видеокамере;
- выводить изображение с медленной видеокамеры в реальном времени на панель коллективного пользования и проводить послепусковой анализ данных с быстрой видеокамеры;
- всегда иметь идентичное полноразмерное изображение с медленной видеокамеры, так как быстрая видеокамера на частоте 500 и 1000 к/с работает с уменьшенным видеокадром, что приводит к уменьшению размера поля изображения.

После выработки требований и концептуального дизайна системы были выбраны оптические комплектующие необходимые для ее построения.

Основные оптические компоненты системы:

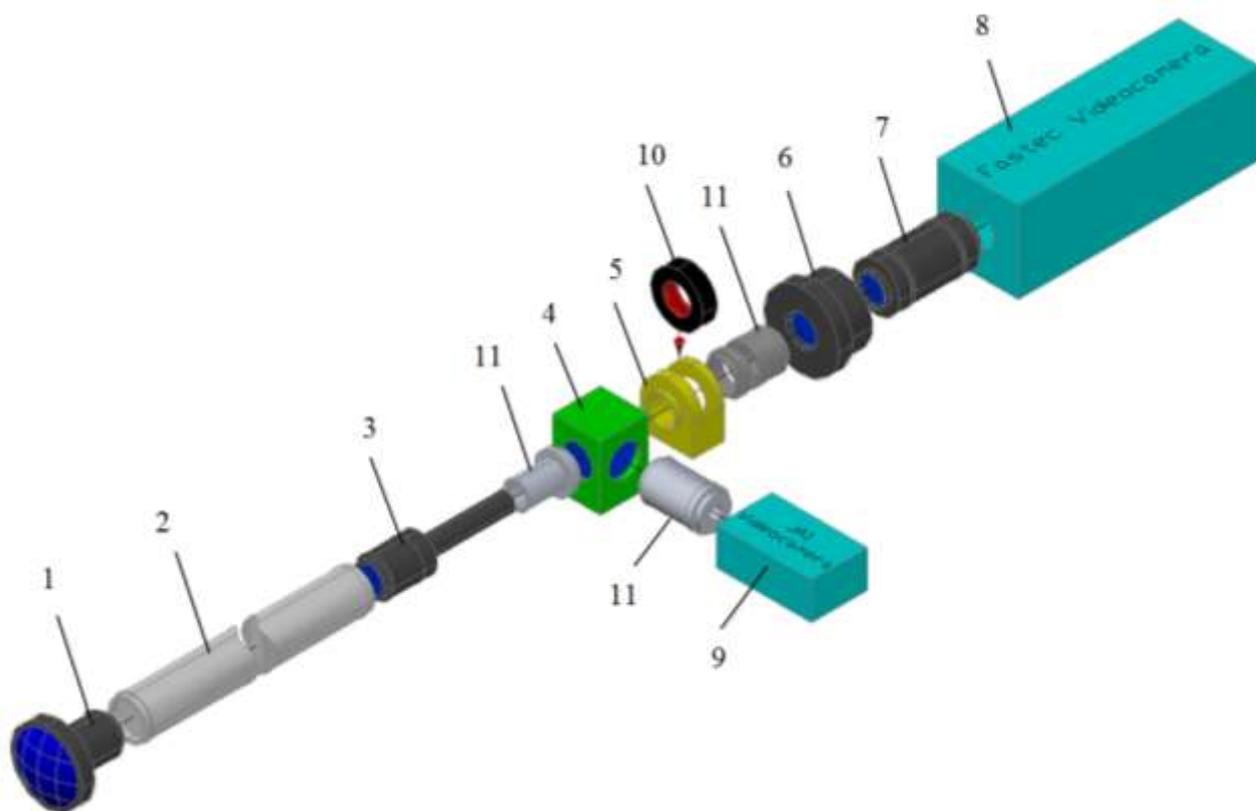
- проецирующий телевизионный объектив Infinistix компании Edmund optics для передачи изображения с выхода оптоволоконного световода на медленную камеру и экран ЭОП. Имеет рабочее расстояние 94 мм, увеличение 1:1, форматом изображения 1/2" и C-mount креплением. Объектив имеет разрешение равное 150 пар штр./мм [71];

- ЭОП поколения 2+ с мультищелочным катодом S-25, микроканальной пластиной, люминофором типа P-43 и стеклянным входом/выходом. Разрешение ЭОП 50-60 пар штр./мм [72];

- оптический разветвитель с половинным отражением падающего света на 90° и прямым пропусканием второй части светового потока.

Так же были выбраны оборачивающие объективы и оптические трубки, предназначенные для соединения и юстировки основных оптических элементов. На рисунке 31 показана компоновка оптических элементов системы визуализации плазменного шнура.

Компоненты оптической схемы подобраны таким образом, чтобы обеспечить максимальную гибкость системы. Так в оптическом тракте возможно использование сменных оптических фильтров, для чего в схеме предусмотрена возможность установки специального держателя фильтров. Разработанная оптическая схема позволит, в случае необходимости, производить установку держателя фильтров непосредственно за оптическим разветвителем для каждой из камер, или же непосредственно на входе оптического разветвителя. Так же, в случае необходимости можно исключить из схемы оптический разветвитель с медленной камерой, что приведет к увеличению яркости изображения падающего на ЭОП – в два раза. И наконец, возможна конфигурация с непосредственной пристыковкой видеокамеры через оборачивающий объектив к выходу световода. Такая конфигурация будет необходима на стадии поэтапной настройки и тестирования оптической схемы и, при необходимости, в будущем.



1 – входной объектив; 2 – оптоволоконный световод; 3 – проецирующий объектив Infinistix (1:1); 4 – оптический разветвитель; 5 – держатель фильтров в оправе; 6 – ЭОП; 7 – оборачивающий объектив (1:1); 8 – быстрая видеокамера; 9 – медленная видеокамера; 10 – оправа для фильтров; 11 – оптические соединительные трубки

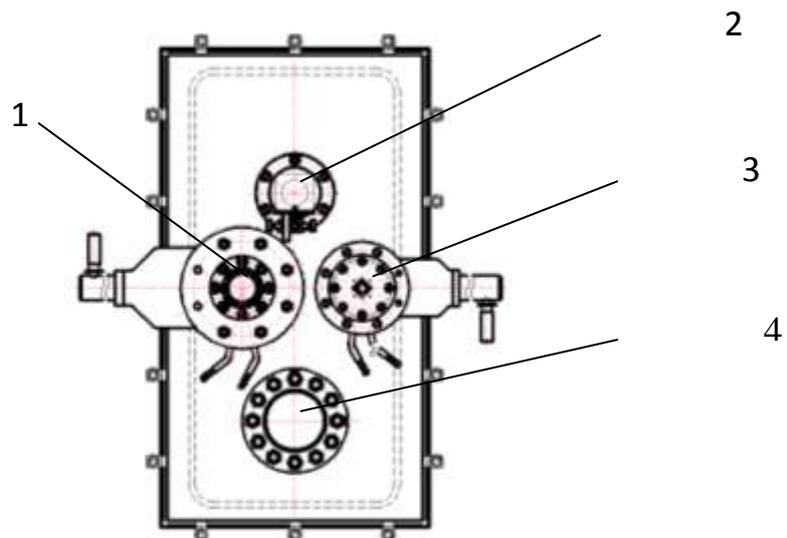
Рисунок 31 – Компоновка оптических элементов системы визуализации плазменного шнура

### 3.2 Разработка конструкции и элементов системы визуализации плазменного шнура токамака КТМ

На данном этапе работ было выбрано место для расположения системы визуализации плазменного шнура на вакуумной камере КТМ, разработан вакуумный смотровой патрубок для установки системы на ВК, выполнено трехмерное моделирование поля изображения, получаемого при использовании планируемых входных объективов, разработан магнитный экран и опора для размещения системы на рабочем месте.

Для установки системы был выбран один из экваториальных патрубков 360x720 мм, который расположен в восьмом секторе вакуумной камеры КТМ. В данном патрубке предусмотрено смотровое окно с диаметром на просвет 80 мм. В этом же патрубке установлены: монитор профиля энергетических потерь плазмы (АХUV), болометр и зондовая диагностика. На рисунке 32 показан внешний вид заглушки экваториального патрубка.

В месте расположения смотрового окна было решено поместить патрубок для установки волоконно-оптического световода с широкоугольным объективом. Эскиз вакуумного патрубка со смотровым окном и установленным объективом с оптоволоконным световодом показаны на рисунке 33.



1 – AXUV монитор; 2 – смотровое окно; 3 – болометр; 4 – зонд Ленгмюра  
 Рисунок 32 – Вид заглушки экваториального патрубка № 8 с диагностическими портами

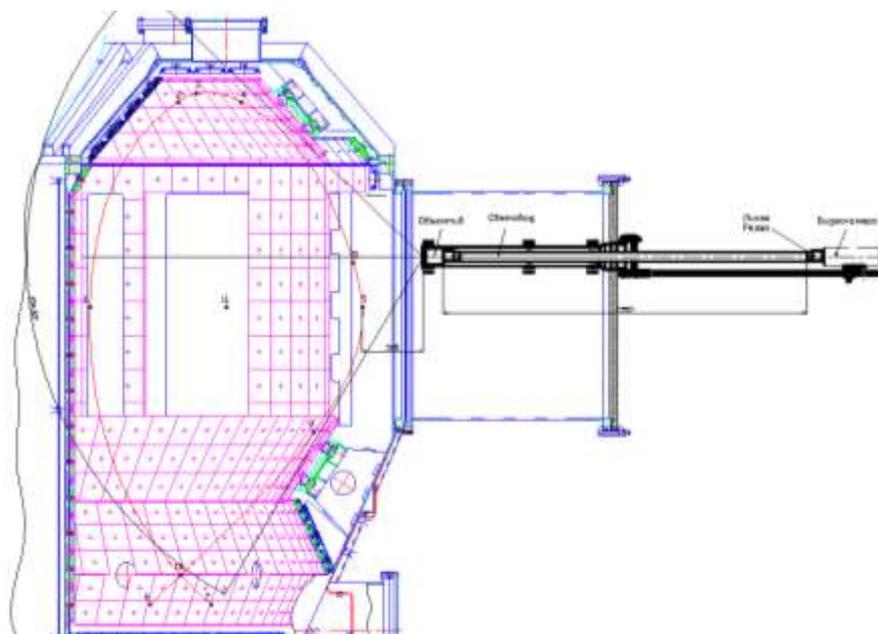


Рисунок 33 – Эскиз размещения системы визуализации плазменного шнура в ВК КТМ

Исходя из задачи получения оптимального угла обзора и организации достаточного зазора плазма – смотровое окно, для ограничения воздействия тепловых потоков на смотровое окно, зазор между границей плазмы и фланцем со стеклом был выбран равным 200 мм. Смотровое окно будет оснащено шторкой, предназначенной для защиты стекла от напыления в технологических режимах подготовки первой стенки – тлеющий разряд, индукционно плазменный разряд, прогрев.

Была разработана компьютерная трёхмерная модель вакуумной камеры с внутрикамерными элементами и уточнено поле зрения, получаемое при использовании широкоугольного объектива Kowa LM4NCL и Fujinon «рыбий глаз», при планируемом размещении внутри патрубка на расстоянии 200 мм от плазмы. Ожидаемое поле зрения, получаемое при использовании широкоугольного объектива Kowa LM4NCL и Fujinon «рыбий глаз» показано на рисунке 34. На рисунке 34 так же показано поле зрения, получаемое при повороте матрицы видеокамеры на 90° с использованием объектива Fujinon. Это позволит увеличить обзор поверхности вакуумной камеры, в частности ближней части диверторного стола.

Полученные модельные поля зрения показали, что получаемое изображение удовлетворяет заложенным требованиям и позволяет достичь максимально полного обзора вакуумной камеры и, следовательно, плазменного шнура.

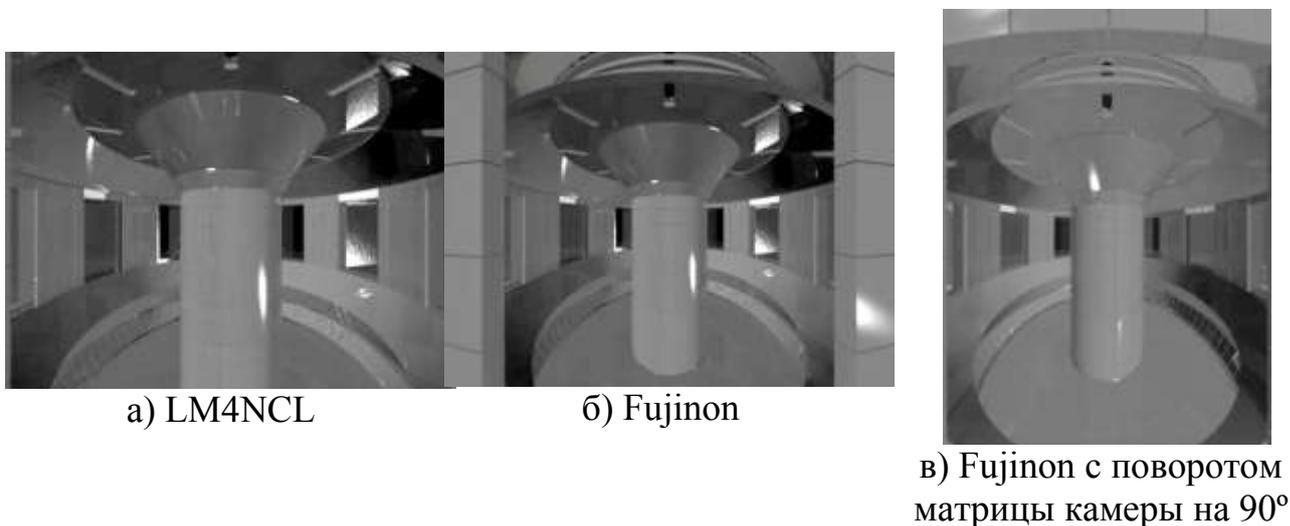


Рисунок 34 – Поле зрения системы визуализации плазменного шнура при использовании разных объективов

На основе полученных результатов, был разработан и изготовлен вакуумный смотровой патрубок, предназначенный для размещения на ВК КТМ и проведения наблюдений за плазменным шнуром системой визуализации плазменного разряда. На рисунке 35 приведен сборочный чертеж патрубка (поз. 44) со смотровым окном (поз. 6) с размещенным внутри него объективом и оптоволоконным световодом, разработанный в результате проведения проектно-конструкторских работ. В конструкции предусмотрена возможность оперативного извлечения и установки световода с объективом при помощи направляющей трубки (поз. 8), внутри которой размещается световод, а за один из ее концов крепится объектив при помощи специальной насадки. При необходимости объектив можно заменить, используя другую насадку. Для защиты смотрового окна от напыления в процессе чистки ВК предусмотрена шторка (вид Е), приводимая в движение вакуумным вводом вращения (поз. 45).

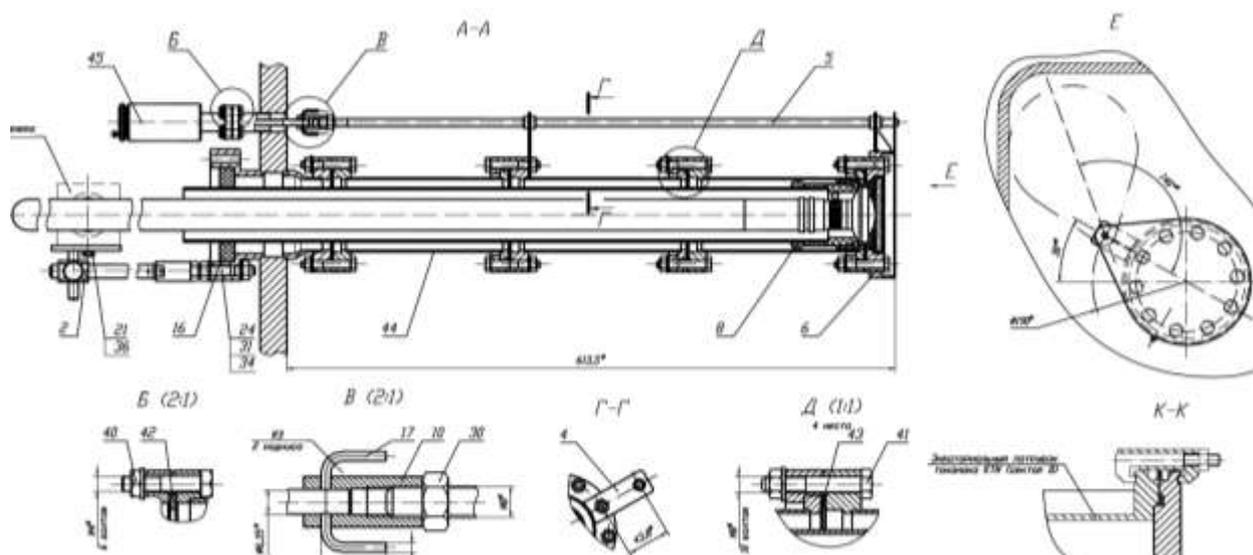


Рисунок 35 – Вакуумный патрубок системы визуализации плазменного шнура

На рисунке 36 показан вакуумный патрубок системы визуализации плазмы в сборе на заглушке экваториального патрубка.



Рисунок 36 – Вакуумный смотровой патрубок системы визуализации плазменного шнура

После завершения комплектации всех необходимых оптических элементов системы визуализации плазменного шнура, в лабораторных условиях была проведена ее сборка, настройка, тестирование и проверка рабочих характеристик. На рисунке 37 показана система в сборе.

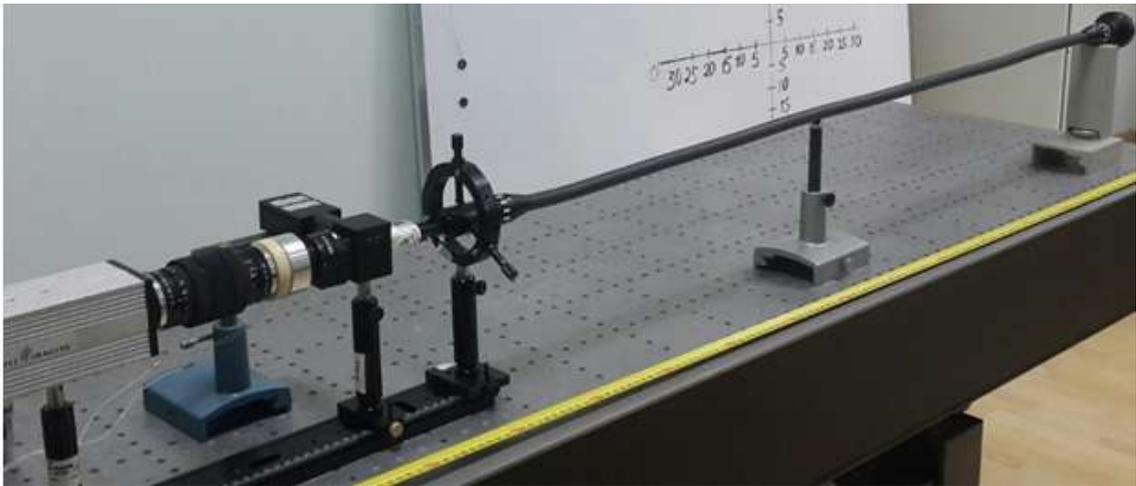


Рисунок 37 – Система визуализации плазменного шнура в сборе

*Разработка магнитного экрана и несущей конструкции системы визуализации плазменного шнура токамака КТМ*

Для размещения системы визуализации плазмы на рабочем месте в центральном зале токамака КТМ необходимо было разработать несущую опорную конструкцию для размещения приемных оптических элементов и видеокамер системы визуализации плазменного шнура, а также защитный короб. Защитный короб выполняет несколько функций: защита оптических элементов системы от случайных механических повреждений; дополнительное затемнение с целью уменьшения фоновой засветки усилителя яркости изображения; и защита усилителя яркости изображения с видеокамерами от магнитных полей, возникающих во время работы установки.

Для расчета магнитного экрана и выбора его конструкции был проведен анализ максимальных магнитных полей, которые могут возникнуть во время работы токамака КТМ в местах размещения электроники системы визуализации [73]. В ходе расчетов были определены возможные материалы и их толщина для изготовления магнитных экранов. Использование магнитных экранов вызвано необходимостью снижения индукции магнитного поля в месте размещения электронного оборудования системы во избежание выхода его из строя, предотвращения влияния на работу и увеличения его срока службы.

Ниже в таблицах 23-25 представлена карта модуля индукции магнитного поля по мере удаления от установки КТМ для трех моментов времени, соответствующих пробое, выходу на плато тока плазмы и сходу с плато разряда. Шаг по радиусу  $R$  и вертикали  $Z$  равен 1 м. Исследованный диапазон изменения  $R$  и  $Z$ :  $2 \leq R \leq 10$  м,  $-3 \leq Z \leq 3$  м.

Наибольшая величина модуля магнитного поля вдали от установки КТМ наблюдается для стадии схода с плато тока (время  $t = 4,5$  с, когда центральный соленоид практически перемангнитился).

Таблица 13 – Карта модуля магнитного поля (Гауссы), время  $t = 0$  (пробой)

R↓/Z→,m	-3	-2	-1	0	1	2	3
2	163,5	281,9	293,7	194,6	348,3	286,2	170,8
3	81,9	106,3	109,6	102,3	110,8	108,2	84,1
4	43,9	50,7	52,1	51,2	52,2	51,3	44,7
5	25,6	27,8	28,3	28,2	28,4	28,1	25,8
6	15,9	16,8	17	16,9	17,1	16,8	16,1
7	10,5	10,8	10,9	10,9	10,9	10,8	10,5
8	7,2	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,3
9	5,1	5,3	5,3	5,3	5,2	5,3	5,2
10	3,8	3,8	3,8	3,9	3,8	3,8	3,8

Таблица 24 – Карта модуля магнитного поля (Гауссы),  $t = 0,4$  с (начало плато)

R↓/Z→,m	-3	-2	-1	0	1	2	3
2	66,8	186,7	451,6	541,7	690,4	240,2	106,4
3	47,1	83,1	121,4	116,4	113,5	94,4	61,2
4	28,5	39,4	46,9	47,1	45,7	41,7	33,3
5	17,2	20,8	22,8	23,0	22,5	21,4	18,9
6	10,8	12,1	12,8	12,8	12,7	12,3	11,5
7	7,1	7,6	7,9	7,9	7,8	7,7	7,4
8	4,8	5,1	5,2	5,2	5,2	5,1	5,0
9	3,4	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,5
10	2,5	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5

Таблица 25 – Карта модуля магнитного поля (Гауссы),  $t = 4,5$  с (конец плато)

R↓/Z→,m	-3	-2	-1	0	1	2	3
2	161,3	297,4	578,2	611,7	978,1	436,3	224,4
3	95,3	140,7	185,2	185,4	191,1	169,6	119,3
4	55,5	70,0	79,3	80,7	80,8	76,5	63,9
5	33,3	38,4	41,0	41,4	41,4	40,3	36,4
6	21,0	23,0	23,8	24,0	24,0	23,6	22,2
7	13,9	14,7	15,0	15,1	15,1	14,9	14,4
8	9,6	9,9	10,1	10,1	10,1	10,0	9,8
9	6,8	7,0	7,1	7,1	7,1	7,1	6,9
10	5,0	5,1	5,2	5,2	5,2	5,2	5,1

При не очень большом удалении от установки магнитное поле «чувствует» близость полоидальных обмоток, что проявляется в сильной зависимости модуля поля от  $Z$ . На большом удалении ( $R \geq 5$  м) зависимость от  $Z$  практически отсутствует.

В результате анализа распределения магнитных полей вокруг установки были определены максимальные поля в месте расположения системы визуализации плазменного шнура.

Координаты размещения системы визуализации плазменного шнура:  $R = 3$  м;  $Z = 0,475$  м.

Как видно из таблицы 25 максимальное значение магнитного поля в месте расположения системы визуализации плазменного шнура составляет 200 Гс.

После определения максимального уровня полей, которые будут возникать в процессе работы КТМ в месте расположения электроники системы визуализации, был проведен расчет магнитных экранов.

В процессе расчета магнитных экранов был определен коэффициент ослабления экрана (уровень магнитного поля) в зависимости от типа материала, его толщины и геометрических размеров.

Согласно [74-77] проникновение магнитного поля через отверстия и щели зависит от толщины стенок, так как отверстие в реальном экране имеет три измерения, но если не «углублять» отверстие с помощью специальных патрубков, то эта зависимость играет очень малую роль. В целях упрощения задачи вполне допустимо рассматривать проникновение поля сквозь толщину стенок и через отверстия и щели независимо друг от друга, полагая в первом случае экран замкнутым, а во втором случае очень тонкостенным, но изготовленным из идеально проводящего материала (сверхпроводник), при этом проникновение сквозь толщину стенок оказывается исключенным поскольку магнитное поле полностью вытесняется – эффект Майснера. Составляющие этих полей складываются арифметически, что приводит к простой формуле для оценки результирующей эффективности [75]

$$\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_z \cdot \mathcal{E}_{отв}}{\mathcal{E}_{отв} + \mathcal{E}_z}, \quad (3)$$

$\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_z \cdot \mathcal{E}_{отв}}{\mathcal{E}_z + \mathcal{E}_{отв}}$  где  $\mathcal{E}_z$  – эффективность замкнутого экрана из того же материала с той же толщиной стенок и той же формы, что и реальный экран;

$\mathcal{E}_{отв}$  – эффективность экрана той же формы, с теми же отверстиями и щелями и с той же толщиной стенок, что и реальный экран, но изготовленный из идеального проводящего материала.

Согласно формуле (1), если  $\mathcal{E}_{отв} \gg \mathcal{E}_z$ , то  $\mathcal{E} \approx \mathcal{E}_z$ , если же  $\mathcal{E}_z \gg \mathcal{E}_{отв}$ , то  $\mathcal{E} \approx \mathcal{E}_{отв}$ . В обоих случаях, когда  $\mathcal{E}_z \approx \mathcal{E}_{отв}$ , погрешность оценки  $\mathcal{E}$  может оказаться заметно большей, чем погрешность определения каждой из этих двух величин отдельно.

$$\mathcal{E}_3 = 0,22\mu \left[ 1 - \left( 1 - \frac{d}{R} \right)^3 \right], \quad (4)$$

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость,

$d$  – толщина экрана,

$R$  – радиус эквивалентной сферы (практически среднее значение размеров экрана мало влияет на эффективность магнитного экрана).

$$\mathcal{E}_{отв} = 0,25 \left( \frac{\sum S}{S_{отв}} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (5)$$

где  $\sum S$  – полная площадь поверхности магнитного экрана,

$S_{отв}$  – площадь отверстия.

В качестве возможных рассматриваемых материалов для изготовления экранов были выбраны углеродистая сталь марки Ст.3, электротехническая сталь и пермаллой. В таблице 26 приведены значения относительной магнитной проницаемости рассматриваемых материалов.

Таблица 26 – Магнитная проницаемость кандидатных материалов

Наименование	Относительная магнитная проницаемость $\mu$
Сталь 3	220
Электротехническая сталь	4000
Пермаллой	8000

Сталь марки Ст.3 является самой распространенной и широко используемой, имеет относительно невысокую магнитную проницаемость. Электротехническая сталь имеет достаточно высокую магнитную проницаемость. Пермаллой имеет самую высокую магнитную проницаемость из рассматриваемых сталей.

Предполагаемые размеры магнитных экранов, по которым проводился расчет представлены в таблице 27.

Таблица 27 – Ориентировочные размеры магнитного экрана системы визуализации плазменного шнура

Наименование системы	Габариты (ДхШхВ), мм	Диаметр входного торцевого отверстия, мм
Система визуализации плазменного шнура	700x400x300	20

Подставляя необходимые значения в уравнения (3) – (5) были найдены коэффициенты экранирования  $\mathcal{E}$  и соответственно значения магнитного поля  $B_3$  внутри магнитного экрана для рассматриваемых материалов с различной

толщиной. В таблице 28 приведены результаты расчета коэффициентов экранирования для систем визуализации плазменного шнура.

Таблица 28 – Коэффициенты экранирования магнитного экрана системы визуализации плазменного шнура в зависимости от материала и его толщины (значение воздействующего магнитного поля 200 Гс)

d, мм	Сталь 3		Электротехническая сталь		Пермаллой	
	Э	$B_{э}$ , Гс	Э	$B_{э}$ , Гс	Э	$B_{э}$ , Гс
1	1,6	123,3	12,3	16,2	23,6	8,5
2	2,2	89,1	23,6	8,5	46,2	4,3
3	2,9	69,8	34,9	5,7	68,8	2,9
4	3,5	57,3	46,2	4,3	91,4	2,2
5	4,1	48,7	57,5	3,5	114,0	1,8
6	4,7	42,3	68,8	2,9	136,6	1,5
7	5,4	37,3	80,1	2,5	159,1	1,3
8	5,9	33,5	91,4	2,2	181,7	1,1
9	6,6	30,3	102,7	2	204,2	1
10	7,2	27,7	114,0	1,8	226,8	0,9

Как видно из таблицы 28 наилучший эффект дает экран из пермаллоя при одинаковой толщине рассматриваемых материалов. Чуть хуже работает экран из электротехнической стали.

Исходя из требований к уровню магнитных полей для используемого оборудования, а также опыта эксплуатации видеокамер и подобных систем на других токамаках [78], в качестве максимально допустимого магнитного поля было принято значение 50 Гс. На основе этого был произведен выбор материала и соответствующая толщина стенок магнитного экрана.

Основными критериями выбора материала экрана были:

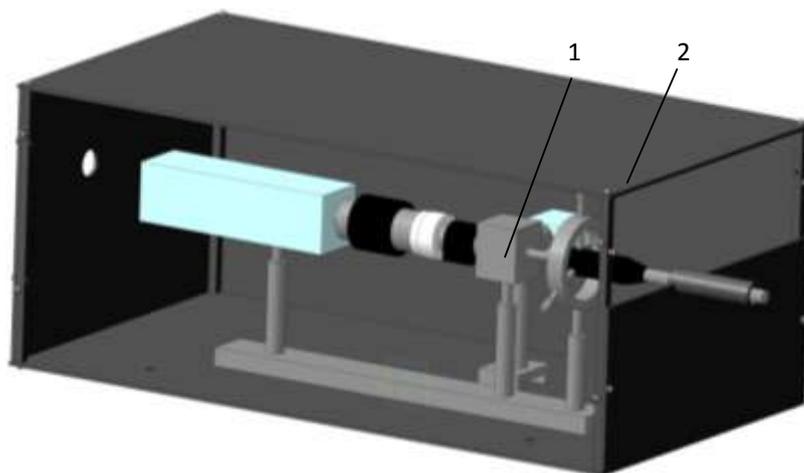
- 1) снижение индукции магнитного поля до допустимого уровня;
- 2) доступность и наличие материалов;
- 3) экран системы визуализации плазменного шнура должен выполнять также защитную функцию – предохранять систему от случайных механических повреждений и пыли;

Учитывая все выше перечисленные требования, а также количество материала, необходимого для изготовления магнитных экранов, и их наличия, было решено:

– для системы визуализации плазменного шнура использовать материал из Ст.3 толщиной 4 мм.

После проведения расчетов и выбора материалов была проведена конструкторская разработка магнитного экрана.

На рисунке 38 показана модель магнитного экрана разработанного для системы визуализации плазменного шнура.



1 – система визуализации плазменного шнура; 2 – магнитный экран

Рисунок 38 – Модель магнитного экрана системы визуализации плазменного шнура

Экран разработан по каркасному типу. К четырем вертикальным брускам крепятся стальные экранирующие листы. На входном торцевом отверстии размещена трубка для уменьшения магнитного поля, проходящего через отверстие. Для наглядности на модели убраны боковой и половина переднего листов экрана.

На рисунке 39 показан изготовленный магнитный экран системы визуализации плазменного шнура в сборе.



Рисунок 39 – Магнитный экран системы визуализации плазменного шнура

Для размещения приемных оптических элементов и видеокамер системы визуализации плазменного шнура с магнитным экраном в центральном зале был разработан специальный стол. Изготовленный стол показан на рисунке 10.

На рисунке 41 показана система визуализации плазменного шнура на столе с магнитным экраном, установленная на штатном месте в центральном зале КТМ.



Рисунок 10 – Стол для размещения системы визуализации плазменного шнура

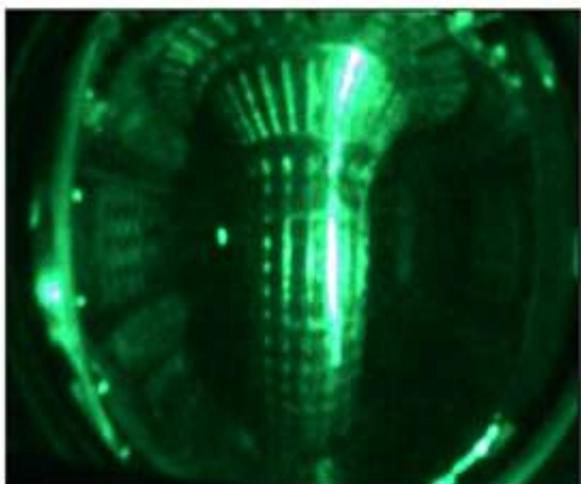


Рисунок 41 – Система визуализации плазменного шнура в экране на оптическом столе на штатном месте

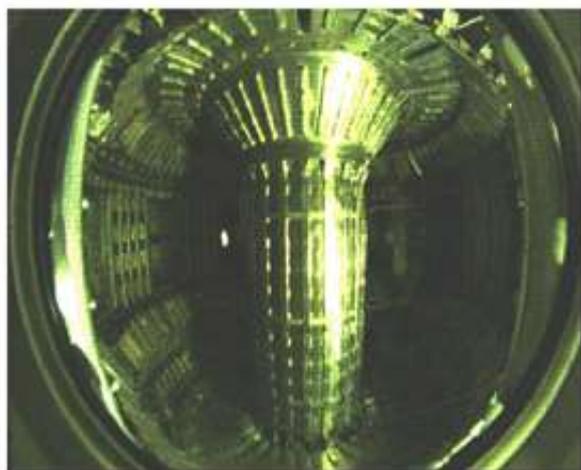
Размеры столешницы подобраны под размеры магнитного экрана. В конструкции стола предусмотрена регулировка высоты столешницы, что позволяет размещать на одной оси все оптические элементы системы (оптоволоконный световод и приемные оптические элементы), что необходимо во время ее монтажа и настройки. Для оптимального использования пространства на эстакаде в центральном зале в конструкции стола также предусмотрены две дополнительные полки для размещения измерительного блока и источника питания зондовой диагностики, располагающейся в том же экваториальном патрубке. Конструкция крепления полок также позволяет проводить регулировку по высоте. Конструкция стола выполнена из немагнитных материалов. Полки выполнены из стеклотекстолита.

### **3.3 Настройка, тестирование и экспериментальная отработка системы визуализации плазменного шнура**

На данном этапе после сборки системы в лабораторных условиях, она была установлена в изготовленный и размещенный ранее на вакуумной камере смотровой патрубок. После установки системы в смотровом патрубке была проведена юстировка системы, а так же её настройка. В процессе настройки была проверена работа системы и качество получаемого изображения. На рисунке 42 показаны видеокadres изображений полученных во время проведения настройки. Во время настройки системы на вакуумной камере была проверена работа системы на двух объективах, выбранных ранее: Kowa LM4NCL и Fujinon FE185C086HA-1.



а) Скоростная камера



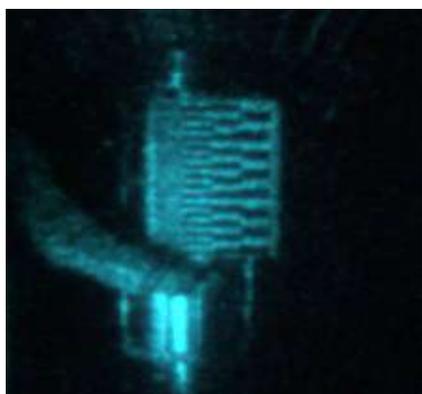
б) Медленная камера

Рисунок 42 – Изображение с системы визуализации плазменного шнура при использовании объектива Fujinon

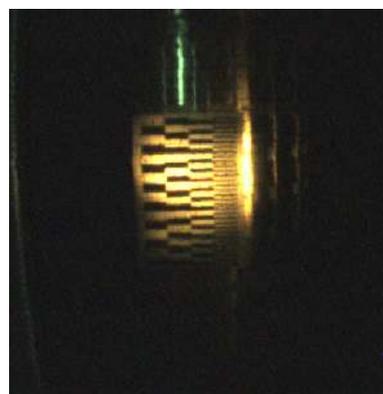
Сравнение модельных изображений (рисунок 34) и полученных непосредственно системой визуализации (рисунок 42), показывает хорошее совпадение поля зрения.

Также были проведены измерения пространственного разрешения системы.

На рисунке 43 приведены изображения с каждой из видеокамер при проведении такого измерения.



а) Скоростная камера



б) Медленная камера

Рисунок 43 – Измерение пространственного разрешения системы

По результатам измерения пространственное разрешение скоростной и медленной камеры составили 15 мм и 8 мм соответственно.

В целом по результатам проведенной установки и настройки системы на вакуумной камере можно сказать, что качество получаемого изображения является хорошим и система соответствует заданным техническим требованиям.

Проведены экспериментальное тестирование и настройка системы визуализации плазменного шнура в различных режимах работы установки

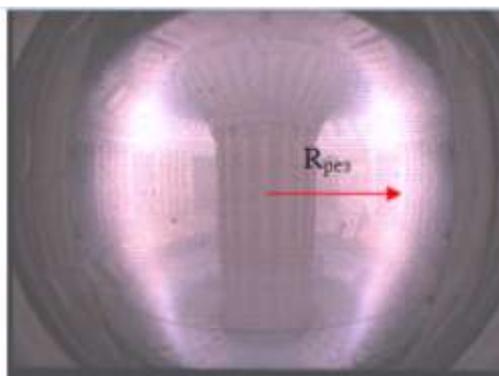
КТМ: во время работы тлеющего разряда в процессе подготовки поверхности вакуумной камеры КТМ; во время работы системы предионизации, а также при получении плазменных конфигураций.

На рисунке 44 показаны видеокадры с быстрой видеокамеры во время работы электрода тлеющего разряда. На изображениях виден искровой разряд, приходящийся на различные области вакуумной камеры. Сам электрод тлеющего разряда не видно, поскольку он находится за центральным цилиндром вакуумной камеры КТМ. Видеосъемка проводилась со скоростью 250 к/с.

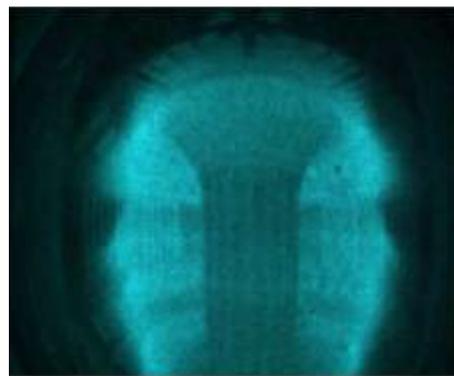


Рисунок 44 – Видеокадры изображения с быстрой камеры системы визуализации плазменного шнура во время работы тлеющего разряда

На следующем этапе была проведена видеосъемка свечения рабочего газа во время работы системы предионизации. Свечение газа наблюдается вследствие ионизации за счет возникновения электронно-циклотронного резонанса при зондировании СВЧ излучением на частоте 2,45 ГГц и включении тороидального магнитного поля. На рисунках 45, 46 показаны видеокадры изображения, снятые быстрой и медленной камерами.

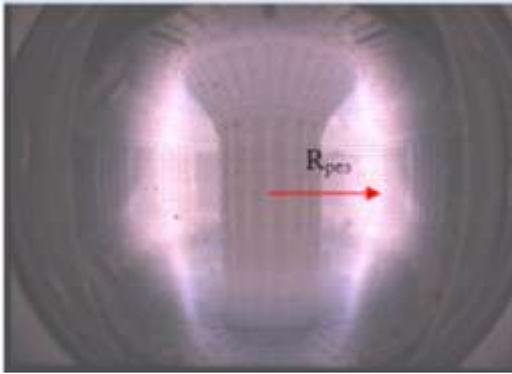


а) медленная камера – 30 к/с

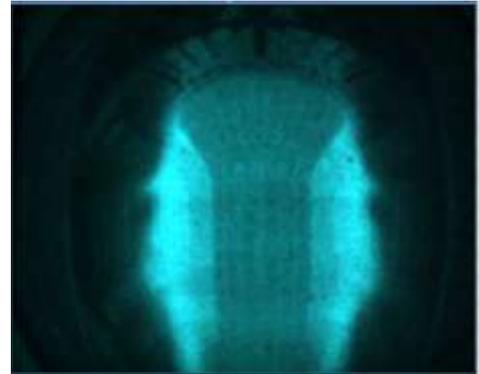


б) скоростная камера – 250 к/с

Рисунок 45 – Свечение рабочего газа во время работы системы предионизации при токе в тороидальной катушке 4,4 кА



а) медленная камера – 30 к/с



б) скоростная камера – 250 к/с

Рисунок 46 – Свечение рабочего газа во время работы системы предионизации при токе в тороидальной катушке 3,8 кА

Тестирование системы проводилось при разном уровне тока питания тороидальной обмотки, что приводит к смещению радиуса зоны свечения (ионизации). Смещение связано с тем, что для используемой частоты СВЧ-излучения предионизации (2,45 ГГц) значение резонансного магнитного поля составляет  $B_{рез} = 875$  гаусс, и при изменении тока в тороидальной катушке магнитное поле с данным значением смещается радиально.

Положение резонансного магнитного поля  $R_{рез}$  можно определить из простого соотношения для определения тороидального магнитного поля

$$R_{рез} = \mu_0 \frac{NI_t}{2\pi B_t} \quad (6)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;

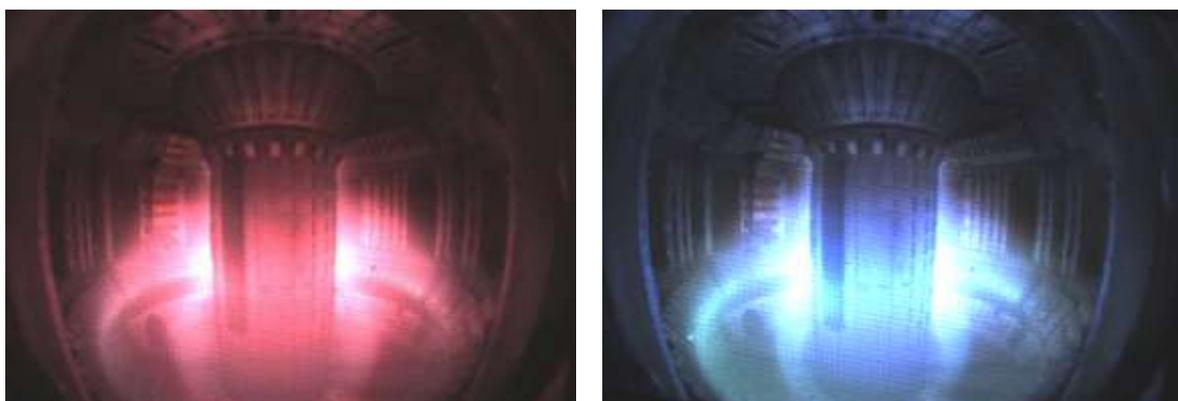
$NI_t$  – ток тороидальной обмотки, Ампер·витков;

$B_t$  – тороидальное магнитное поле (в данном случае резонансное поле  $B_{рез} = 875$  Гс).

Как видно из соотношения (6), радиус резонанса прямо пропорционален току в тороидальной обмотке. На рисунках 45, 46 хорошо видно, как изменяется радиус области свечения при разном токе в тороидальной катушке. Для тока тороидальной катушки  $I_t = 4,4$  кА радиус резонанса равен 80 см, а для тока  $I_t = 3,8$  кА радиус резонанса равен 70 см.

После проведения предварительного тестирования и настройки системы на предионизации и тлеющем разряде была проведена экспериментальная проверка работы системы на стадии инициации плазмы (пробоя).

На рисунке 47 приведены кадры видеоизображения с медленной камеры во время пробоя плазмы с использованием разных рабочих газов, водорода и аргона соответственно.



а) на водороде (пуск № 3490)

б) на аргоне (пуск № 3488)

Рисунок 47 – Видеокадры плазменного разряда с медленной камеры (30 к/с)

На рисунке 47 показана последовательность видеокadres со скоростной камеры для пуска на водороде.

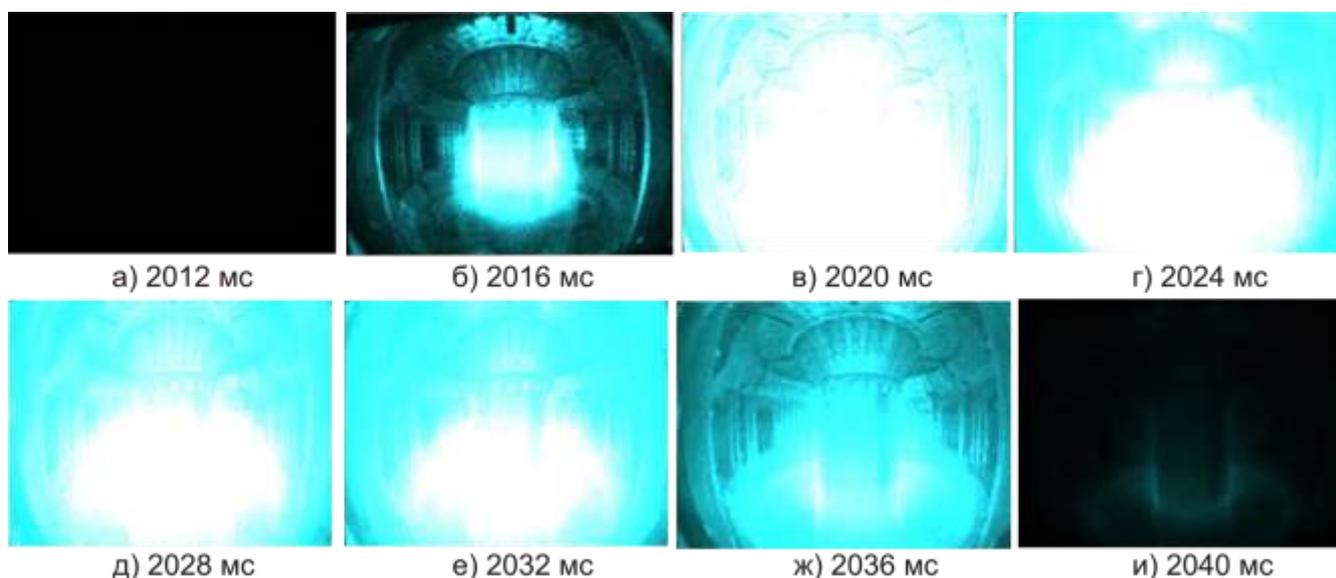


Рисунок 48 – Видеокадры изображения плазменного разряда (пуск № 3490)

Во время проведения экспериментов быстрая камера работала с частотой 250 к/с и экспозицией 4 мс, а медленная камера с частотой 30 к/с. Поскольку частота регистрации быстрой камеры намного выше медленной, то на каждый кадр медленной камеры приходится около 7 кадров быстрой.

Длительность приведенных плазменных разрядов не превышала 30 мс, что соответствовало 1-2 кадрам для медленной камеры и 7-8 кадрам скоростной камеры в зависимости от времени старта регистрации.

В целом на получаемых изображениях достаточно отчетливо видны процессы, протекающие в вакуумной камере при организации пробоя.

### 3.4 Выводы по разделу

Таким образом, на основе полученных результатов работ, приведенных в третьей главе можно сделать следующие выводы:

1. Разработана система визуализации плазменного шнура для токамака КТМ на основе гибкого оптоволоконного световода для передачи изображения;
2. Система позволяет проводить широкоугольную видеосъемку и получать изображение двух полусечений вакуумной камеры с одновременной регистрацией скоростной и медленной видеокамерами. В состав скоростной камеры установлен усилитель яркости изображения, что позволяет проводить наблюдение за плазмой на высоких частотах, и работать на отдельных оптических линиях;
3. Использование промышленных оптических элементов позволило минимизировать затраты и уменьшить время разработки системы;
4. Сочетание всех элементов в составе системы было впервые использовано на установке токамак;
5. Система показала свою работоспособность и эффективность и внедрена на токамаке КТМ;
6. Подобная система может быть использована на других установках УТС.

## 4 СПОСОБ ТЕРМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В настоящей главе приводятся основные результаты по разработке диагностики ИК визуализации токамака КТМ, а также способа повышения ее точности при измерении температуры поверхности материалов изготовленных из металла. Результаты исследования изложены в следующих работах [79-88].

### 4.1 Диагностика ИК визуализации токамака КТМ

Поскольку токамак КТМ предназначен для изучения взаимодействия плазма-стенка и проведения исследования стойкости кандидатных материалов под действием тепловых нагрузок плазмы и их взаимного влияния друг на друга. Одними из важных контролируемых параметров при изучении взаимодействия плазма-стенка является значение воздействующих тепловых потоков плазмы и температура нагрева поверхности, обращенных к плазме материалов. Максимальные тепловые потоки плазмы будут приходиться в диверторную область.

Использование термографических (теповизионных) камер для измерения распределения температуры на поверхности исследуемых материалов под действием плазменных потоков дает возможность получать двумерную картину температурного поля. Это дает преимущество по сравнению с использованием пирометров, позволяющих измерять температуру только в одной пространственной точке на поверхности исследуемого материала. В условиях установки типа токамак с диверторной конфигурацией плазменного шнура имеет место неравномерно распределенный тепловой поток на дивертор, максимум которого приходится в точке пересечения сепаратрис и поверхности дивертора. Причем, на внешнюю сепаратрису приходится около 70% от всего теплового потока, приходящегося на дивертор [89]. Более того, точка пересечения сепаратрисы с дивертором может меняться в течение плазменного разряда. Таким образом, использование термографической камеры дает возможность получать полную картину распределения температуры, определять и контролировать места максимального воздействия тепловых потоков плазмы на поверхности исследуемых материалов.

Как было показано в первой главе, дизайн системы ИК визуализации определяется целями и задачами проводимых исследований и во многом зависит от конструкции токамака, условий работы и бюджета.

Исходя из исследовательских задач, планируемых на токамаке КТМ можно сказать, что в качестве объекта наблюдений системы ИК визуализации является дивертор. На диверторном столе планируется установка различных кандидатных материалов и изучение их поведения под действием тепловых потоков плазмы, а также изучение взаимодействие плазма-стенка. Согласно проекта [90] на КТМ планируется получение потоков на дивертор до  $20 \text{ МВт/м}^2$ . Как показано в оценочных расчетах [91], проведенных для

графитовых пластин в качестве элементов облицовки дивертора, их температура может достигать 2000 °С в процессе плазменного разряда.

Одним из требований, предъявляемых к системе, является получение изображения всей поверхности диверторного стола в радиальном направлении, что даст возможность восстанавливать радиальный профиль распределения тепловых нагрузок на дивертор.

На рисунке 49 показано изображение вакуумной камеры токамака КТМ с вакуумными патрубками. На рисунке 50 изображение конструкции трекового патрубка со смотровыми окнами для размещения ИК диагностик.

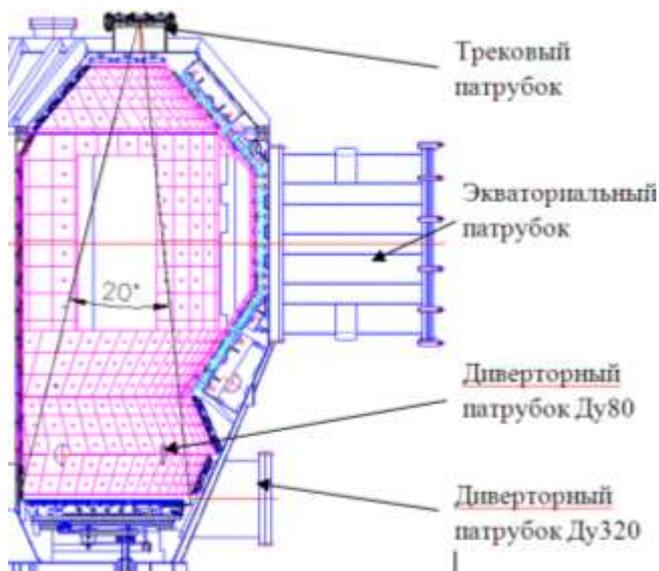


Рисунок 49 – Сечение вакуумной камеры токамака КТМ

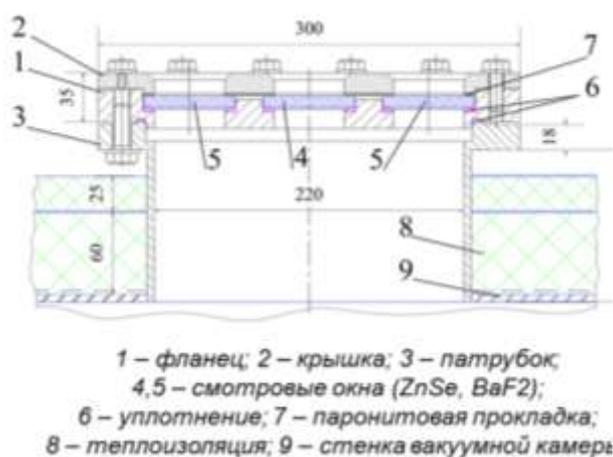


Рисунок 50 – Конструкция трекового смотрового патрубка ИК диагностик КТМ

В конструкции ВК предусмотрено три типа патрубков: горизонтальный экваториальный, вертикальный трековый и горизонтальный диверторный. Как видно из рисунка возможных мест для размещения системы ИК визуализации не много. С учетом требования обеспечения наблюдения за диверторными пластинами, размещение в экваториальном патрубке является не целесообразным. Поскольку в этом случае, в связи с наличием достаточно длинных патрубков, необходимо использовать перископическую систему. К тому же в этом случае наблюдение будет проводиться под некоторым углом к наблюдаемой поверхности, что может создать дополнительные трудности при измерении температуры, поскольку в общем случае коэффициент излучения тела также зависит от угла наблюдения.

Диверторные патрубки также не являются лучшим местом для размещения, так как в этом случае наблюдение будет проводиться под достаточно большим углом и может привести к большим погрешностям и неудобству интерпретации полученных данных.

Оптимальным местом для размещения ИК системы является вертикальный трековый патрубок. Трековые патрубки расположены

непосредственно над дивертором, на котором и будут размещаться исследуемые материалы. В данном случае будет обеспечиваться хороший обзор дивертора, к тому же наблюдение будет проводиться под прямым углом. Более того, в данном варианте наблюдение будет проводиться непосредственно только за интересующей поверхностью, без захвата других внутрикамерных элементов, что позволит использовать стандартные объективы с небольшим углом обзора и достичь высокого пространственного разрешения при относительно небольшом разрешении матрицы. Как показано на рисунке 49 для охвата диверторного стола в радиальном направлении достаточно иметь угол обзора в  $20^\circ$ .

На рисунке 50 показана конструкция трекового вертикального смотрового патрубка ИК диагностик. В конструкции смотрового патрубка предусмотрены три смотровых окна с диаметром на просвет 50 мм. Окна изготовлены из оптически прозрачного материала для инфракрасного диапазона длин волн – фтористый барий (BaF<sub>2</sub>). Расстояние от смотрового окна до диверторного стола около 2 м.

Исходя из проведенного анализа, а также выбранного места наблюдения были рассмотрены возможные варианты исполнения системы ИК визуализации. Возможны два варианта исполнения: с непосредственным размещением ИК камеры с объективом у смотрового окна и с реализацией специальной эндоскопической системы.

Преимуществом использования эндоскопической системы является снижение уровня магнитных полей, воздействующих на ИК камеру за счет ее удаления от установки. Одним из негативных моментов использования эндоскопа является снижение яркости излучения за счет поглощения и отражения излучения в оптических элементах системы.

С учетом имеющегося бюджета, условий работы токамака и отсутствия достаточного опыта работы с ИК камерами – разработка эндоскопической системы является не целесообразной, по крайней мере, на первой стадии планируемых исследований. Размещение ИК камеры непосредственно у смотрового окна является экономически и технически оправданным. Снизить уровень магнитного поля, генерируемого в процессе разряда до приемлемого значения возможно за счет использования магнитного экрана.

Для решения всех возможных задач, в том числе изучения быстрых переходных процессов необходимо иметь частоту регистрации до нескольких кГц. Однако высокоскоростные ИК камеры весьма дорогостоящие (стоимость самых продвинутых может достигать нескольких сотен тысяч долларов). Поэтому выбор камеры зависит, в том числе, от имеющегося бюджета. В качестве минимального необходимого значения, чтобы иметь достаточное временное разрешение, при исследовании процессов нагрева/охлаждения первой стенки необходимо иметь частоту не менее 100 Гц, учитывая длительность разряда КТМ.

Для получения информации о пространственном распределении температуры на поверхности исследуемых образцов для токамака КТМ была

разработана система ИК визуализации. Учитывая ограниченность бюджета система ИК визуализации была реализована на основе термографической камеры модели A655SC производства компании FLIR. В таблице 29 приведены основные технические характеристики данной модели камеры.

Таблица 29 – Технические характеристики термографической камеры FLIR A655SC

Характеристика	Значение
Диапазон измеряемых температур	-20 °С до 2000 °С
Быстродействие	от 50 до 200 к/с
Разрешение	640x480 (640x120)
Рабочий спектральный диапазон	7,5-14 мкм
Угол обзора, ГxВ	25x19°
Габариты, ДxШxВ	216×73×75 мм

На рисунке 51 показан внешний вид термографической камеры FLIR A655SC.



Рисунок 51 – Термографическая камера токамака КТМ модели FLIR A655SC

Камера построена на основе микроболометров и работает в длинноволновой области ИК диапазона. Имеет широкий температурный диапазон измерений от -20 °С до 2000 °С и практически перекрывает возможный диапазон температур нагрева поверхности исследуемых материалов. Камера имеет достаточно хорошее временное разрешение равное 5 мс в режиме с уменьшенным кадром 640x120. Объектив камеры сделан из германия с просветляющим покрытием обеспечивающий угол обзора 25x19°, в горизонтальном и вертикальном направлении соответственно.

На рисунке 52 показан эскиз размещения диагностики ИКВ на вакуумной камере КТМ, непосредственно у смотрового окна, также показан угол обзора, получающийся при таком размещении. Как видно из рисунка 52, в поле зрения ИК камеры попадает практически весь диверторный стол в радиальном направлении.

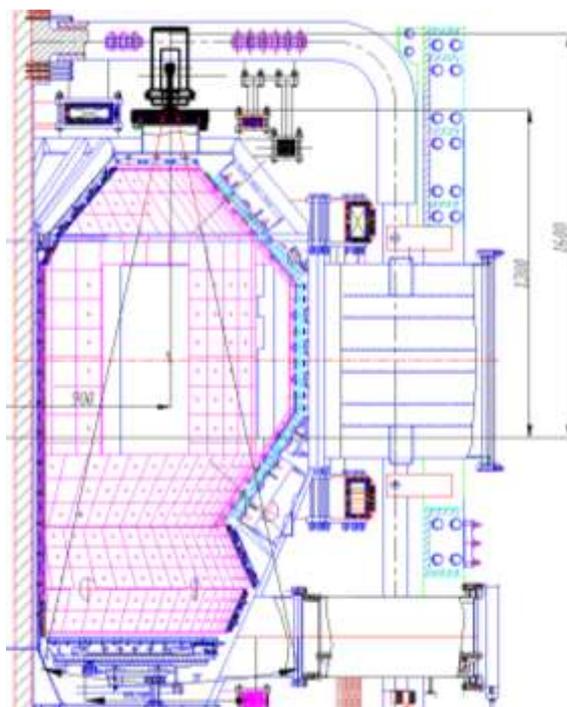


Рисунок 52 – Размещение диагностики ИК визуализации на токамаке КТМ

Поскольку окно из  $\text{BaF}_2$  прозрачно до диапазона 12 мкм, то для обеспечения пропускания всего рабочего диапазона длин волн диагностики ИКВ было изготовлено центральное смотровое окно из селенида цинка ( $\text{ZnSe}$ ). Селенид цинка имеет высокий коэффициент пропускания 70%, постоянный в рабочей области спектра термографической камеры. При таком размещении диагностики ИКВ геометрическое пространственное разрешение составляет 1,5 мм и эффективное реальное 4,5 мм [92].

При непосредственном размещении диагностики ИКВ у смотрового патрубка, как показано на рисунке 52 будут иметь место сильные магнитные поля от электромагнитных катушек токамака КТМ. Как показали расчеты на основе анализа проектного сценария разряда токамака КТМ [73] максимальное поле в районе размещения ИК камеры от полоидальных обмоток будет составлять 0,2 Тл и иметь радиальное направление. При этом значение вертикального поля не будет превышать 0,02 Тл.

Специально для термографической камеры был разработан и изготовлен магнитный экран, предназначенный для снижения уровня магнитного поля до допустимых значений. Магнитный экран состоит из пяти коаксиальных цилиндров, изготовленных из стали марки Ст3 с фланцами на торцах. На фланцах имеются отверстия для обеспечения обзора диагностики с одной стороны и прокладки линий синхронизации, передачи данных и питания с другой. Использование магнитного экрана позволяет снизить уровень магнитного поля от полоидальных обмоток в десять раз с 0,2 Тл до 0,02 Тл.

На рисунке 53 показан эскиз магнитного экрана с размещенной внутри термографической камерой с объективом.

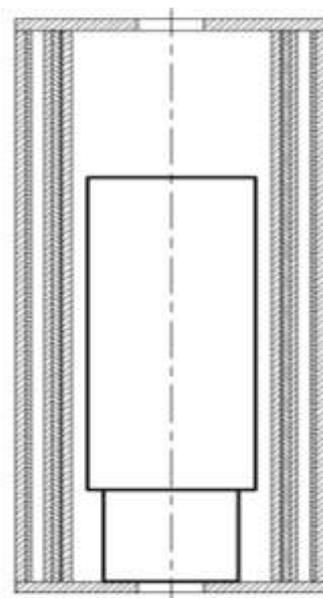


Рисунок 53 – Эскиз магнитного экрана диагностики ИКВ

На рисунке 54 показано размещения ИК камеры в сборе с магнитным экраном, установленной на трековый смотровой патрубке ВК КТМ.

В конструкции магнитного экрана предусмотрена возможность регулировки по высоте, а также по углу наклона. Вся конструкция гальванически развязана от вакуумной камеры при помощи специальных изолирующих втулок и проставки.

На рисунке 55 показано изображение, получаемое с ИК камеры, установленной на трековый смотровой патрубке. На изображении 55 можно увидеть кольцевой диверторный стол. Прямоугольником выделена область изображения, получаемая при максимальной частоте регистрации 200 кадров/с и разрешении 640x120 пикселей.



Рисунок 54 – Диагностика ИКВ с магнитным экраном на трековом патрубке КТМ

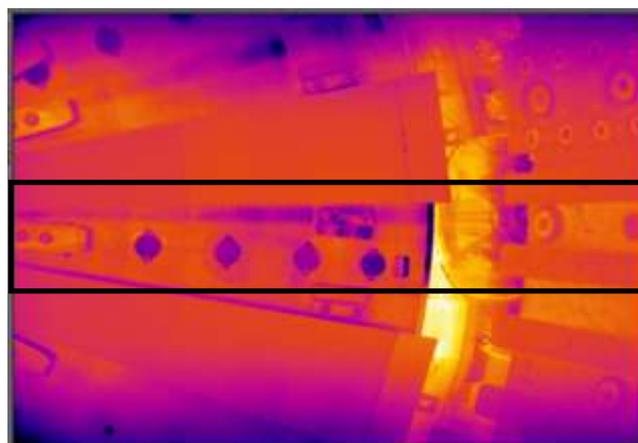


Рисунок 55 – Изображение, получаемое с диагностики ИКВ

Позже, более детальный анализ электромагнитной обстановки в токамаке КТМ показал, что при анализе магнитных полей не было учтено магнитное поле от тороидальной обмотки в месте размещения диагностики ИКВ.

На рисунках 52,54 видно, что диагностика ИКВ находится между двух тороидальных витков тороидальной обмотки. В связи с этим был проведен расчет распределения тороидального магнитного поля в месте размещения диагностики ИКВ. Расчет распределения тороидального поля в месте размещения диагностики проводился для номинальных параметров тока питания 58 кА. Результаты расчетов приведены на рисунке 55.

Как видно из графиков на рисунке 56 магнитное поле от тороидальной обмотки в месте размещения диагностики на радиусе  $R=0,9$  м на высоте  $Z=1,3\div 1,6$  м изменяется от 1 Тл до 0,35 Тл соответственно. Таким образом, магнитное поле в месте размещения диагностики значительно превосходит максимальное значение поля, на которое рассчитан ее магнитный экран.

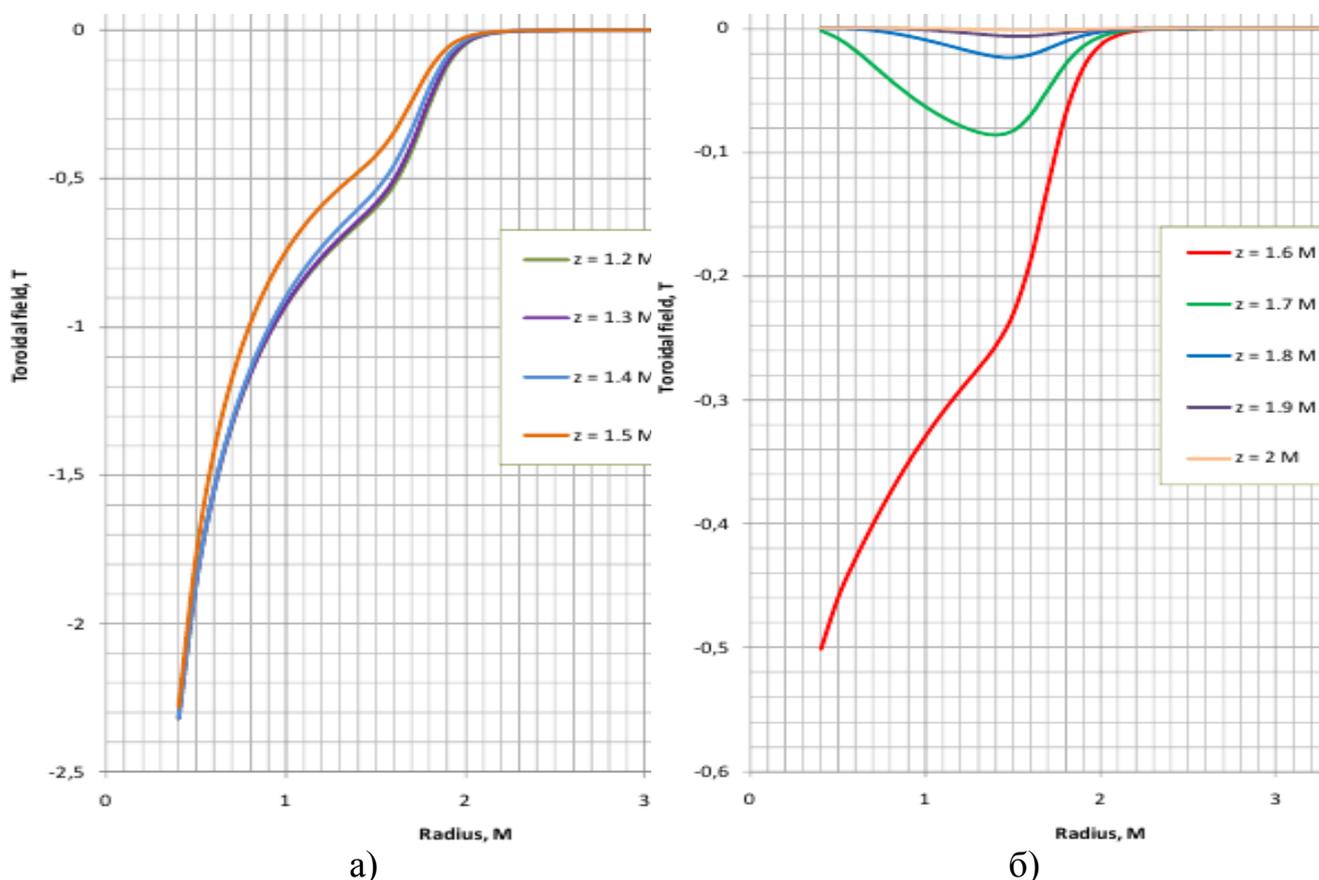


Рисунок 56 – Изменение тороидального магнитного поля вдоль большого радиуса установки в плоскости между катушек на разных высотах

Поскольку разработать экран позволяющий снизить магнитное поле с 1 Тл до 0,02 Тл не представляется возможным из-за отсутствия материала имеющего высокую магнитную проницаемость и отсутствия магнитного насыщения в области 1 Тл, авторами было предложено изменить место размещения диагностики, подняв ее выше по оси Z.

На рисунке 56 приведен эскиз размещения диагностики ИКВ с новым расположением по оси  $Z$ . При этом диагностика отнесена в точку  $Z=1,7$  м. Как видно из графика на рисунке 6-б в координате  $R=0,9$  м,  $Z=1,7$  м величина магнитного поля составляет менее 0,06 Тл, что более чем в три раза меньше максимального поля, на которое рассчитан магнитный экран. Это обеспечит еще более надежную работу диагностики, вследствие меньшего воздействующего поля на нее.

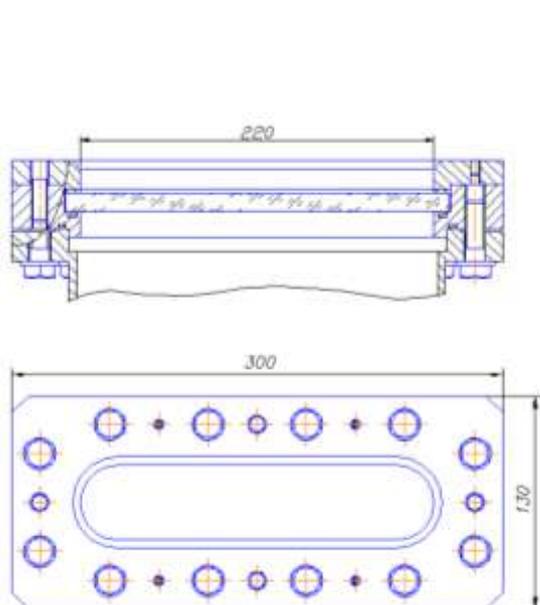


Рисунок 57 – Конструкция смотрового окна с увеличенным размером для диагностики ИКВ

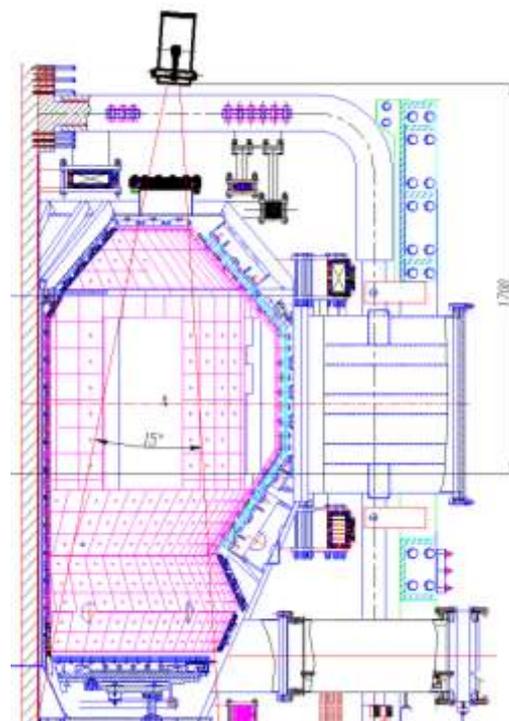


Рисунок 58 – Схема размещения диагностики ИКВ на токамаке КТМ с расположением по  $Z=1,7$  м

При дистанционировании диагностики от смотрового патрубка возникает проблема доступа для наблюдения, вследствие удаления диагностики от смотрового окна. Для обеспечения наблюдения за дивертором, при отнесении диагностики ИКВ, было разработано новое смотровое окно с максимально возможным размером. На рисунке 57 показан сборочный чертеж нового фланцевого соединения со смотровым окном. Данное фланцевое соединение имеет окно увеличенных размеров трековой формы размерами 220x50 мм, по сравнению с предыдущим окном, имеющим диаметр 50 мм. Материал окна выполняется из селенида цинка (ZnSe).

Также для обеспечения наблюдения за дивертором был заменен объектив ИК камеры с углом обзора  $25^\circ$  на объектив с углом обзора  $15^\circ$ . На рисунке 58 показан ход лучей наблюдения с новым объективом. Как видно из рисунка 58, угол обзора не ограничивается новым смотровым окном и практически сохраняется поле зрения, т.е. обеспечивается обзор всего дивертора по радиусу.

## 4.2 Способ повышения точности термографических измерений

Для повышения точности измерения температуры материалов с низкой излучательной способностью, в первую очередь металлов, диагностикой ИК визуализацией на токамаке КТМ автором была предложена методика позволяющая отслеживать изменение степени черноты во время эксперимента и тем самым вносить коррекции в температурные измерения.

### 4.2.1 Основные принципы предлагаемого способа измерения

Основная идея предлагаемого способа заключается в использовании импульсного лазерного излучения, проецируемого на поверхность тела в поле зрения инфракрасной термографической камеры. При импульсном облучении поверхности измеряемого тела происходит частичное отражение лазерного излучения. Поскольку для непрозрачных тел имеется прямая зависимость между излучательной способностью (степенью черноты)  $\varepsilon$  и отражательной способностью (коэффициентом отражения)  $\rho$ :

$$\rho + \varepsilon = 1, \quad (7)$$

то при изменении значения одного из слагаемых, например, с ростом температуры, соответственно пропорционально изменяется и второй. Таким образом, контролируя значение отражающей способности тела можно определить значение излучательной способности.

Коэффициент отражения  $\rho$  поверхности тела можно определить, как отношение мощности отраженного излучения  $W_{отр}$  к мощности падающего излучения  $W_{пад}$

$$\rho = \frac{W_{отр}}{W_{пад}}. \quad (8)$$

Измерение температуры объекта термографической камерой основано, прежде всего, на детектировании и измерении мощности излучения с поверхности тела  $W_{изл}$ , которая потом пересчитывается с использованием определенного алгоритма в значение температуры.

В случае воздействия дополнительного излучения на поверхность тела, в нашем случае от лазера, полная мощность  $W_{изл}$  детектируемая ИК камерой будет складываться из собственной мощности излучения самого тела  $W_{тела}$  и мощности отраженного лазерного излучения  $W_{отр}$

$$W_{изл} = W_{отр} + W_{тела} \quad (9)$$

При зондировании поверхности импульсным инфракрасным лазером со стабильной мощностью излучения легко отследить изменение мощности отраженного лазерного излучения по показаниям ИК камеры, соответственно

измеряя полную мощность излучения тела  $W_{изл}$  при воздействии лазера и без него. На рисунке 59 показана оптическая схема предлагаемого способа.

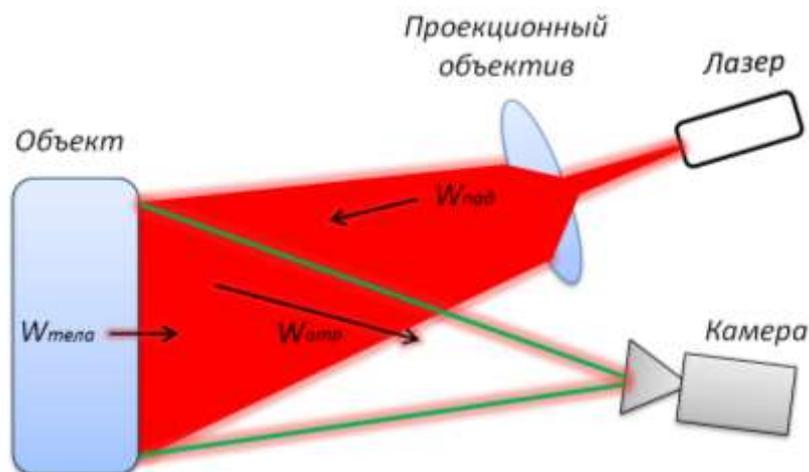


Рисунок 59 – Принципиальная оптическая схема измерения предлагаемого способа

Лазерное излучение  $W_{пад}$  проецируется на поверхность исследуемого объекта в поле зрения ИК камеры. Другими словами, можно сказать, что лазерное излучение используется для подсветки поверхности объекта. Отраженное от поверхности тела лазерное излучение  $W_{отр}$  детектируется ИК камерой.

При использовании специального проекционного объектива узкий лазерный луч расширяется и проецируется на всю поверхность наблюдения ИК камеры. Таким образом, в перспективе такой подход позволит контролировать изменение степени черноты на всей наблюдаемой ИК камерой поверхности тела. В условиях реального эксперимента (установок УТС и в частности КТМ) имеются зоны с крайне неравномерным нагревом под действием потоков плазмы. Это приводит к большим температурным градиентам на поверхности материала и возникновению локальных зон перегрева. Использование предлагаемого способа может позволить точно восстанавливать температурное поле на всей наблюдаемой поверхности и контролировать зоны нагрева.

Для контроля коэффициента отражения предлагается воздействовать периодическими короткими импульсами ИК лазера длительностью не превышающей экспозиции одного кадра и с максимальной частотой повторения  $\frac{1}{2}$  частоты регистрации камеры. При этом импульсы лазера должны быть строго синхронизированы с экспозицией кадра. На рисунке 60 показана предлагаемая временная диаграмма работы ИК камеры и лазера. Как видно из рисунка 60 при использовании такой временной схемы работы ИК камеры и ИК лазера обеспечивается измерение мощности излучения непосредственно как самого тела  $W_{тела}$ , так и излучение совместно с отраженным лазерным излучением  $W_{изл}$ . При этом максимальная эффективная частота работы камеры снижается в два раза.

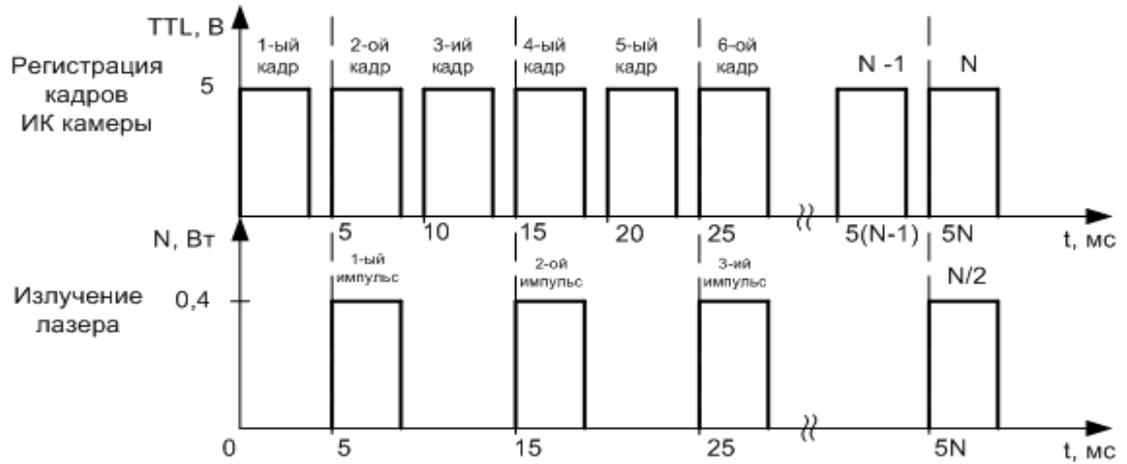


Рисунок 60 – Временная диаграмма работы ИК камеры и CO<sub>2</sub> лазера

В зависимости от скорости процесса нагрева поверхности тела частота импульсов лазера может варьироваться от максимальной, равной половине максимальной частоты кадров ИК камеры до минимально необходимой для контроля скорости нагрева.

Для определения изменения коэффициента отражения по данным ИК камеры измеряется исходная мощность отраженного лазерного излучения  $W_{omp}(T_0)$  при температуре  $T_0$  в отсутствии нагрева. Далее измеряя мощность отраженного лазерного излучения  $W_{omp}(T_i)$  в процессе нагрева при температуре  $T_i$  можно определить изменение коэффициента отражения  $\Delta\rho$ . Изменение коэффициента отражения  $\Delta\rho$  из уравнения (2)

$$\Delta\rho(T_i - T_0) = \frac{W_{omp}(T_0)}{W_{над}} - \frac{W_{omp}(T_i)}{W_{над}} \quad (10)$$

Поскольку основным условием предлагаемого способа является использование постоянной и стабильной мощности излучения лазера  $W_{над}$ , то уравнение (4)

$$\Delta\rho(T_i - T_0) = \frac{W_{omp}(T_0) - W_{omp}(T_i)}{W_{над}} \quad (11)$$

Разделив уравнение (11) на коэффициент отражения, определяемый (8) получим выражение для относительного изменения коэффициента отражения в зависимости от изменения мощности отраженного лазерного излучения

$$\frac{\Delta\rho(T_i - T_0)}{\rho(T_0)} = \frac{W_{omp}(T_0) - W_{omp}(T_i)}{W_{над}} \bigg/ \frac{W_{omp}(T_0)}{W_{над}} = \frac{W_{omp}(T_0) - W_{omp}(T_i)}{W_{omp}(T_0)}, \quad (12)$$

откуда абсолютное значение изменения коэффициента отражения

$$\Delta\rho(T_i - T_0) = \frac{W_{omp}(T_0) - W_{omp}(T_i)}{W_{omp}(T_0)} \cdot \rho(T_0) \quad (13)$$

Таким образом, как видно из уравнений (12 – 13), по изменению мощности отраженного лазерного излучения теоретически можно определить изменение коэффициента отражения и соответственно изменение степени черноты тела из выражения (7).

Из уравнения (13) также видно, что для определения абсолютного значения изменения коэффициента отражения  $\Delta\rho(T_0 - T_i)$  необходимо исходное значение коэффициента отражения  $\rho(T_0)$  в отсутствии нагрева. Поскольку изначально значение  $\rho(T_0)$  исследуемого образца не известно, то он определяется экспериментально перед непосредственным проведением плазменных экспериментов, что не является проблемой.

#### 4.2.2 Расчетно-аналитическое обоснование возможности использования предлагаемого способа

Для оценки возможности использования предлагаемого способа измерений и условий его реализации были решены две задачи:

- оценка мощности лазерного излучения необходимой для детектирования отраженного сигнала в поле зрения камеры в диапазоне различных температур от металлической поверхности;
- степень нагрева поверхности тела от импульсного лазерного воздействия.

Перед проведением расчетов было сформулировано требование к состоянию поверхности и в частности ее шероховатости. С точки зрения отражения лазерного излучения возможны два варианта: зеркальное направленное и диффузное. Зеркальное отражение не является хорошим вариантом в первую очередь в связи с тем, что лазерный луч будет строго отражаться в одном направлении в зависимости от угла падения исходного луча. В данном случае необходима точная оптическая юстировка лазера и камеры для обеспечения детектирования излучения, что создает большие трудности в настройке и неудобство в использовании. К тому же повышается риск выхода из строя матрицы камеры из-за большой мощности отраженного излучения.

Диффузное отражение имеет преимущество, поскольку в данном случае лазерное излучение рассеивается во все стороны. Для обеспечения диффузного отражения, поверхность материала должна иметь шероховатость, сравнимую с длиной волны падающего излучения:  $R_z \geq \lambda_{\text{лазер}}$ .

Для проведения измерений по предлагаемому способу необходимо использовать лазер с определенной рабочей длиной волны. Поскольку ИК камера работает в конкретном диапазоне инфракрасного спектра, то для обеспечения проведения измерений по предлагаемому способу необходимо

использовать лазер с длиной волны, лежащей в рабочем диапазоне длин волн камеры.

Поскольку имеющаяся тепловизионная камера работает в диапазоне длин волн от 7,5 мкм до 14 мкм, то для реализации предлагаемого способа необходимо использовать лазер с длиной волны лежащей в данном диапазоне. Лазером с подходящей длиной волны является газовый углекислотный CO<sub>2</sub>.

Для проведения работы был выбран имеющийся в распоряжении промышленный CO<sub>2</sub> лазер модели L3S производства компании Access Laser. В таблице 30 приведены технические характеристики ИК лазера L3S.

Таблица 30 – Технические характеристики лазера модели L3S

Характеристика	Значение
Длина волны, мкм	10,3 – 10,8 мкм
Мощность в непрерывном режиме, Вт	1 Вт
Стабилизация мощности	±2 %
Выходной диаметр луча, мм	2,4 мм
Качество моды, M2	<1,1
Расходимость луча	5,5 рад
Коэффициент заполнения	0 – 100 %
Частота работы	до 100 кГц
Время нарастания/спада	200 мкс
Размеры (ДхШхВ)	190x102x64 мм

Лазер работает на длине волны 10,6 мкм с мощностью в непрерывном режиме 1 Вт и возможностью задания длительности и частоты излучения путем подачи внешних TTL импульсов. Лазер имеет компактные размеры. Стабилизация мощности излучения ± 2 % достигается за счет температурной стабилизации лазера путем использования соответствующего контроллера температуры. На рисунке 61 показан внешний вид лазера L3S.



1 – контроллер температуры лазера, 2 – лазер, 3 – ВЧ драйвер

Рисунок 61 – Внешний вид CO<sub>2</sub> лазера L3S

### Расчет мощности отраженного лазерного излучения

Для оценки мощности отраженного лазерного излучения по сравнению с мощностью излучения тела для разных температур необходимо рассчитать мощность излучения тела в рабочем диапазоне ИК камеры.

Для расчета мощности излучения тела в интересующем спектральном диапазоне можно воспользоваться уравнением Планка для спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела в зависимости от длины волны  $\lambda$

$$r(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \quad (14)$$

Проинтегрировав уравнение (8) в интервале рассматриваемых длин волн можно найти энергетическую светимость АЧТ  $R(T)$

$$R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \quad (15)$$

При этом для тел с излучательной способностью  $\varepsilon$  отличной от единицы энергетическая светимость будет равна

$$R = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda, T) = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (16)$$

Таким образом, можно оценить мощность излучения тела с единицы площади в любом диапазоне длин волн и степенью черноты  $\varepsilon$ .

Для проведения расчетов был взят диаметр лазерного луча падающего на поверхность тела равным 30 мм. Поскольку до такого диаметра произойдет уширение лазерного луча на длине равной 2 м. Именно такое расстояние от смотрового окна до диверторного стола при размещении лазера непосредственно у смотрового окна вертикального трекового патрубка (рисунок 58).

Как было показано выше максимальная мощность лазера составляет 1 Вт. Однако, для проведения расчетов было принята мощность 0,5 Вт, для того чтобы иметь запас по мощности в случае использования проекционного объектива.

Также для проведения расчетов, для оценки сверху, была принята степень черноты тела  $\varepsilon=0,5$ . Поскольку в данном случае будет происходить наименьшее отражение от поверхности тела. Данная степень черноты ориентировочно будет соответствовать окисленной матовой металлической поверхности.

Исходя из принципа работы тепловизионной камеры, при детектировании дополнительного отраженного лазерного излучения на тепловом изображении, если говорить о температуре, это будет проявляться в резком повышении температуры в месте отражения лазерного луча. Назовем измеренную температуру тела при детектировании отраженного лазерного излучения кажущейся температурой. При проведении расчетов, для наглядности и анализа результатов расчетов, будет удобнее переводить суммарную мощность излучения тела и отраженного лазерного излучения в значение температуры, т.е. по полученной суммарной мощности определяется температура тела.

При определении мощности излучения тела и расчете эффективной кажущейся температуры, вызванной дополнительным отраженным лазерным излучением, все расчеты приводились к площади диаметром 30 мм. При этом считалось, что профиль мощности лазера не имеет пиков, а равномерно распределен по диаметру луча. Для проведения оценочных расчетов такое предположение допустимо, в реальности же лазерный луч имеет неравномерный профиль мощности с пиком в районе оси.

Также при проведении расчетов примем, что падение лазерного луча и наблюдение ИК камерой осуществляется нормально (перпендикулярно) к поверхности тела.

Пример расчета:

Для АЧТ при температуре 20 °С мощность излучения рассчитанная по (9) в диапазоне длин волн от 7,5 мкм до 14 мкм будет иметь значение  $W_{\text{ачт}}=165,8$  Вт/м<sup>2</sup>. Соответственно, для тела с  $\varepsilon=0,5$  мощность излучения будет равна  $W_{\varepsilon 0,5}=82,9$  Вт/м<sup>2</sup>.

Мощность отраженного лазерного излучения с учетом  $\rho=50$  % составит  $W_{\text{отр}}=250$  мВт. Мощность отраженного лазерного излучения в пересчете на единицу площади, с учетом диаметра подающего луча 30 мм, составит 352 Вт/м<sup>2</sup>.

Сложив собственную мощность излучения тела и отраженную от лазера получим суммарную мощность равную  $W=434,9$  Вт/м<sup>2</sup>. Такой мощности излучения соответствует температура тела равная 165 °С. Таким образом, под действием лазерного излучения при реальной температуре тела равной 20 °С за счет детектирования отраженного лазерного излучения будет наблюдаться кажущаяся температура равная 165 °С. Прирост кажущейся температуры  $\Delta T$  составляет 145 °С за счет отраженного лазерного излучения.

В таблице 31 сведены результаты расчетов для разных температур тела до 1000 °С.

Таблица 31 – Кажущаяся температура тела вследствие измерения ИК камерой отраженного лазерного излучения мощностью 0,5 Вт при разных температурах и степени черноты тела

Температура тела, °С	Изменение кажущейся температуры $\Delta T$ вследствие лазерного излучения на тело с $\varepsilon=0,1$ , °С	Изменение кажущейся температуры $\Delta T$ вследствие лазерного излучения на тело с $\varepsilon=0,3$ , °С	Изменение кажущейся температуры $\Delta T$ вследствие лазерного излучения на тело с $\varepsilon=0,5$ , °С	Изменение кажущейся температуры $\Delta T$ вследствие лазерного излучения на тело с $\varepsilon=0,7$ , °С
20	757	262	165	79
200	623	174	82	37
300	499	150	68	30
700	422	114	50	23
1000	400	106	45	20

Как видно из таблицы 31 при воздействии лазера и невысоких значениях излучательной способности (в области до  $\varepsilon=0,5$ ) будет иметь место достаточно высокое значение кажущейся температуры в диапазоне температур до 1000 °С и выше. Также можно заметить, что при увеличении степени черноты при одной и той же температуре имеет место заметное снижение кажущейся температуры, достаточное для измерения изменения степени черноты.

Изменение кажущейся температуры зависит от коэффициента отражения и мощности зондирующего луча лазера. Как показал расчет мощности лазера 0,5 Вт должно быть более чем достаточно для работы, поскольку для большинства реальных металлических поверхностей излучательная способность  $\varepsilon$  будет намного меньше 0,5. Таким образом, как показал расчет, мощности излучения, имеющегося СО<sub>2</sub> лазера достаточно для отработки предлагаемого способа в диапазоне температуры до 1000 °С и выше.

На основании проведенного расчета, можно сделать вывод о применимости предлагаемого способа.

*Расчет температуры нагрева поверхности тела при импульсном воздействии лазера*

При воздействии лазерного излучения возможен нагрев поверхности тела при использовании лазера достаточно большой мощности.

Максимальную температуру тела при импульсном нагреве лазерным излучением (на поверхности тела в центре облученной области в виде круга радиуса  $r_0$  в момент окончания воздействия), для случая постоянной по времени и по площади облученной зоны плотности мощности падающего излучения  $q_0$  можно оценить согласно [27]

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_n, \quad (17)$$

где  $q_0$  – плотность мощности падающего лазерного излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $R$  – коэффициент отражения поверхности;  
 $a$  – температуропроводность материала;  
 $k$  – теплопроводность материала;  
 $\tau$  – длительность импульса.

Как показал проведенный расчет по уравнению (17) для вольфрама со степенью черноты  $\varepsilon=0,5$  и импульсном воздействии лазера длительностью 5 мс и радиусом падающего луча 15 мм нагрев поверхности будет составлять  $9 \cdot 10^{-4}$  °С. Что является крайне малой величиной. Таким образом, нагрев поверхности под действием импульсного лазерного излучения будет пренебрежимо мал.

На основании выполненных расчетов по обоснованию использования предлагаемого способа было установлено, что при импульсном воздействии луча СО<sub>2</sub> лазера длительностью несколько миллисекунд на изображении ИК камеры будет регистрироваться пятно от отраженного лазерного луча, с кажущейся температурой превышающую температуру поверхности измеряемого материала. Кажущаяся температура зависит от мощности лазерного луча и температуры поверхности материала. При этом, как показали расчеты, способ позволяет измерять изменение степени черноты рассматриваемых материал до температуры более 1000 °С, в зависимости от мощности лазерного излучения и степени черноты поверхности материала.

Также было установлено, что при импульсном воздействии лазера длительностью 5 мс и мощностью 0,5 Вт на рассматриваемые поверхности материалов, температура нагрева поверхности не превышает  $1 \cdot 10^{-3}$  °С. Что является пренебрежимо малым значением.

#### 4.2.3 Отработка схемы и режимов измерения в лабораторных условиях

На данном этапе работ проведен выбор и разработка оптической схемы измерения на основании планируемого размещения оборудования на токамаке КТМ. Выбрана оптическая схема проведения измерений по предлагаемому способу. Определены элементы и геометрия их размещения.

СО<sub>2</sub> лазер с термографической камерой предполагается размещать в вертикальном смотровом трековом патрубке вакуумной камеры токамака КТМ. Такое размещение обеспечивает оптимальное перпендикулярное наблюдение за поверхностью исследуемых образцов материалов, размещаемых на диверторном столе токамака КТМ, а также обеспечивается наибольшая мощность отраженного лазерного луча, попадающая на детектор ИК камеры. Как уже было сказано выше расстояние от смотрового окна до диверторного стола составляет ~ 2 м. На таком расстоянии падающий луч СО<sub>2</sub> лазера имеет диаметр около 30 мм. Для пропускания дальнего ИК излучения от СО<sub>2</sub> лазера (10,6 мкм), а также для обеспечения проведения измерений ИК камерой (7,5 – 14 мкм) используется смотровое окно, изготовленное из селенида цинка (ZnSe).

На рисунке 62 показана схема планируемого размещения оборудования для проведения термографических измерений на токамаке КТМ.

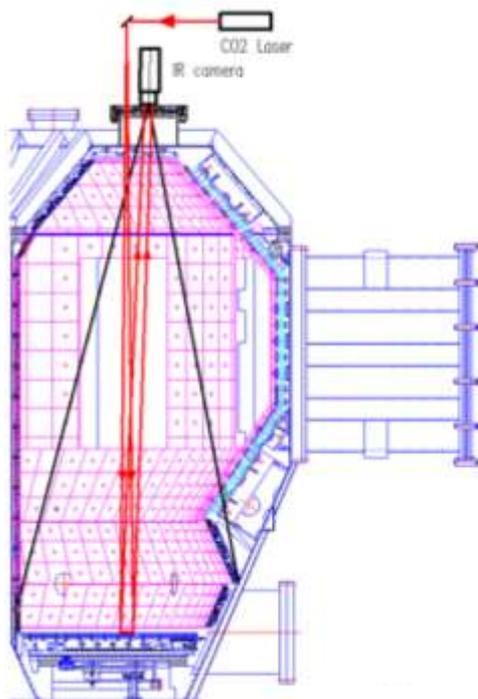


Рисунок 62 – Схема термографических измерений на токамаке КТМ с использованием CO<sub>2</sub> лазера для контроля степени черноты  $\varepsilon$

Как видно из рисунка 62 наблюдение ИК камерой за образцами, размещаемыми на диверторе, будет производиться с вертикального смотрового трекового патрубка. Через этот же патрубок будет производиться передача лазерного луча. Таким образом, наблюдение будет производиться по нормали к поверхности измерения. Данное размещение является наиболее оптимальным, с точки зрения организации измерений.

В рамках отработки предлагаемого способа термографических измерений на токамаке КТМ в лабораторных условиях была проведена отработка схемы и режимов измерения с учетом планируемой схемы размещения измерительного оборудования на токамаке КТМ.

Проведена настройка и юстировка оптической схемы измерения. Проведена настройка системы синхронизации. Подобраны и настроены режимы работы CO<sub>2</sub> лазера и термографической камеры.

На рисунке 63 показано размещение оборудования во время проведения отработки схемы измерения и настройки режимов работы оборудования.

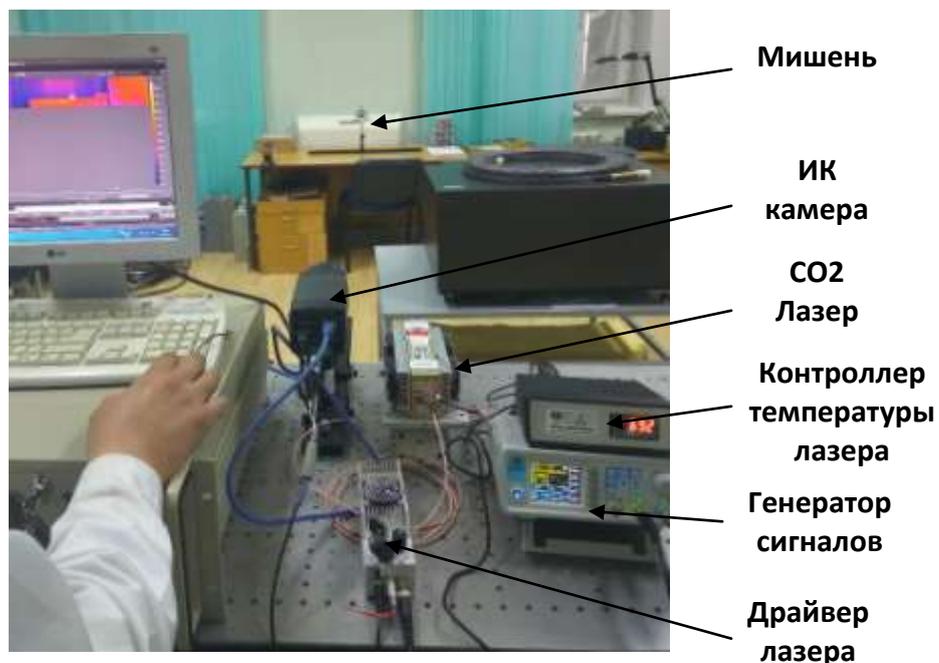


Рисунок 63 – Размещение оборудования при отработке схемы измерения

При проведении экспериментов мишень была расположена на расстоянии около 2 м от лазера, что соответствует планируемому размещению на токамаке КТМ. На таком расстоянии диаметр лазерного пятна СО<sub>2</sub> лазера составляет около 30 мм. В качестве мишени использовались различные материалы, такие как: графит, металлы с разным состоянием поверхности, т.е. с различным коэффициентом отражения (степени черноты).

На рисунке 64 приведен пример термографического изображения с ИК камеры во время проведения экспериментов. На изображении видна мишень, закрепленная в штативе.

Температура мишени, измеряемая ИК камерой, показана на тепловом изображении в прямоугольном окошке. Первые две цифры в скобках являются координатами выбранного пикселя, а следующая цифра, непосредственно измеряемая температура данного пикселя в поле изображения камеры.

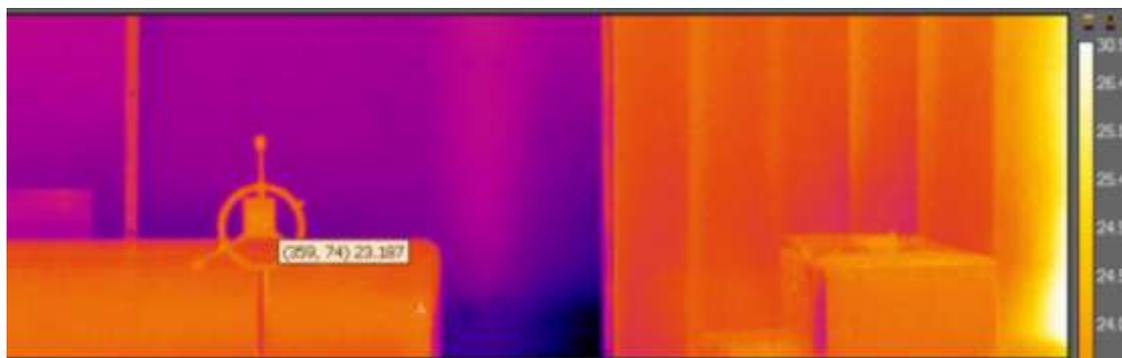


Рисунок 64 – Тепловое изображение мишени с ИК камеры

Для синхронизации запуска и работы ИК камеры и СО<sub>2</sub> лазера использовался двухканальный генератор сигналов модели JDS6600,

показанный на рисунке 63. С помощью генератора сигналов задавались тактирующие прямоугольные импульсы необходимой длительности и скважности.

Во время экспериментов длительность импульса лазера была выбрана 3 мс и частота кадров ИК камеры 200 кадров/с. Длительность импульса лазера была уменьшена с 5 мс до 3 мс для гарантированного попадания всего импульса излучения лазера в длительность экспозиции ИК камеры. Поскольку реальная экспозиция ИК камеры несколько меньше 5 мс, что связано с временем передачи и обработкой сигнала с детектора.

На рисунке 65 приведено изображение с ИК камеры при детектировании лазерного луча, попадающего на мишень.

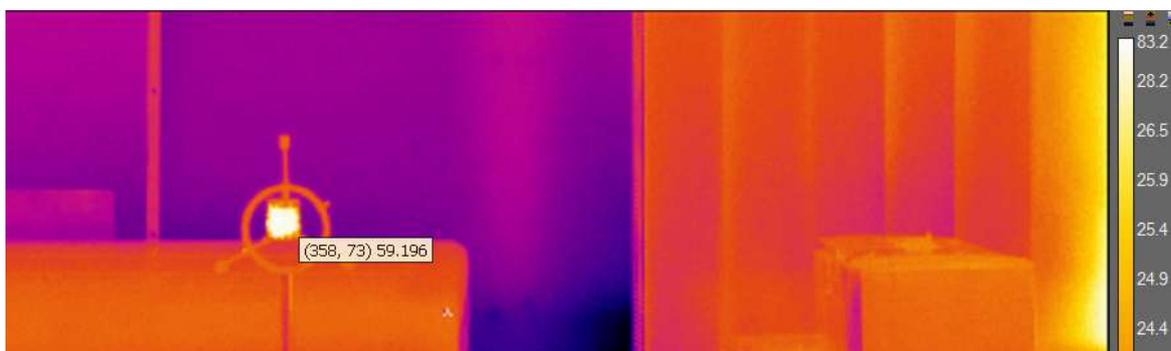


Рисунок 65 – Изображение с ИК камеры во время зондирования мишени CO<sub>2</sub> лазером

Как видно из рисунка 65 кажущаяся температура во время облучения мишени лазером выше реальной (рисунок 64) в два раза в рассматриваемой точке (пикселе). Следует отметить, что значение кажущейся температуры зависит от мощности лазера, материала мишени и состояния поверхности образца.

Во время проведения настройки и отработки схемы измерения было обнаружено несколько нюансов в работе ИК камеры и CO<sub>2</sub> лазера.

Особенность работы ИК камеры заключается в наличии инерционности матрицы. Инерционность проявляется в задержке спада сигнала детектируемого лазерного излучения. В целом, при работе камеры с максимальной частотой 200 к/с и длительности лазерного излучения 3 мс на изображении с ИК камеры это проявляется следующим образом: имеется первый кадр с непосредственным лазерным излучением на мишени, далее следует последовательность из 8 кадров с постепенным спадом яркости излучения, хотя в эти моменты времени лазерное излучение отсутствует. Затухание сигнала происходит в течение 40 мс. На рисунке 66 показана последовательность кадров, иллюстрирующих спад сигнала от детектируемого лазерного излучения вследствие инерционности матрицы ИК камеры.

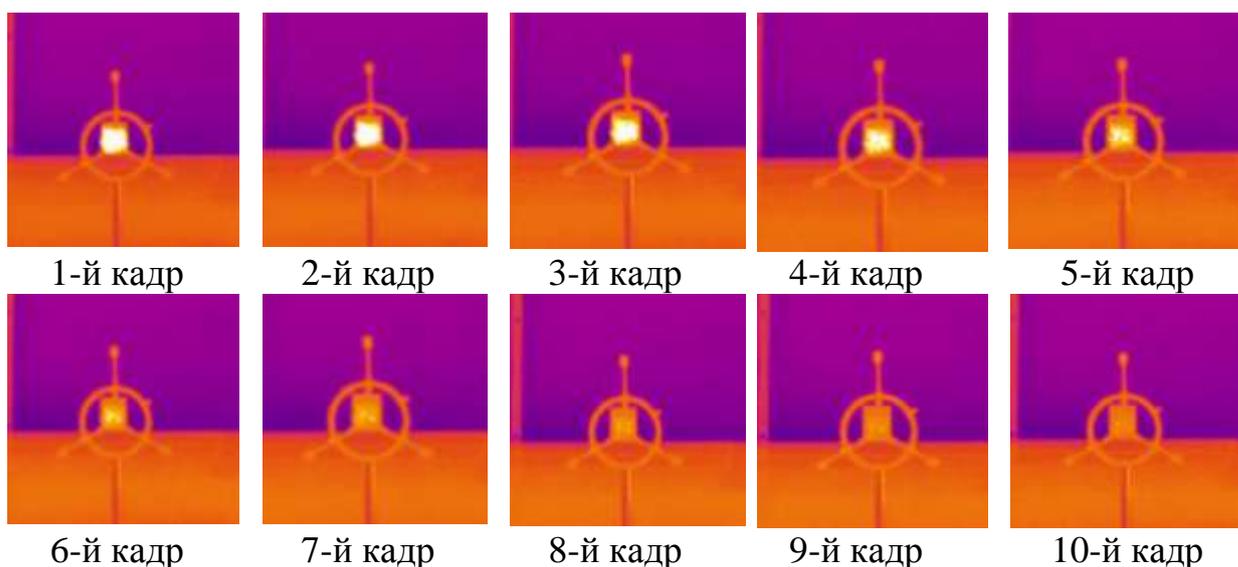


Рисунок 66 – Последовательность кадров с ИК камеры при детектировании отраженного излучения CO<sub>2</sub> лазера (длительность импульса лазера 3 мс)

В связи с инерционностью ИК камеры, приводящей к соответствующему эффекту спада сигнала, была выбрана временная схема работы, позволяющая реализовать предлагаемую методику измерения. При этом минимальное время между импульсами составляет 50 мс, вместо планируемых изначально 10 мс.

Особенность работы CO<sub>2</sub> лазера связана с профилем мощности лазерного луча, точнее наличием неоднородности профиля мощности лазерного излучения. Неоднородность профиля мощности лазерного излучения приводит к наличию точек с большой плотностью мощности излучения на изображении ИК камеры, связанного с наличием пика профиля. В итоге это дает большую разницу в показаниях по сравнению с другими точками (пикселями). Физически это проявляется в наличии нескольких точек (пикселей) на изображении с ИК камеры с очень большим значением температуры и даже в превышении максимального измеряемого диапазона температуры (мощности ИК излучения). Этот эффект особенно проявляется при использовании металлических мишеней с гладкой поверхностью. При использовании полированных образцов данный эффект может привести к выгоранию матрицы ИК камеры.

На рисунке 67 показано изображение с ИК камеры с детектируемым лазерным излучением и наличием точек с большой высокой температурой (свыше 160 °С) – пик плотности излучения.

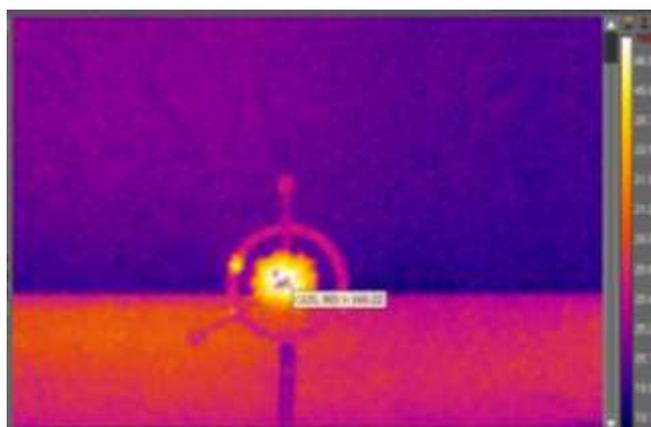
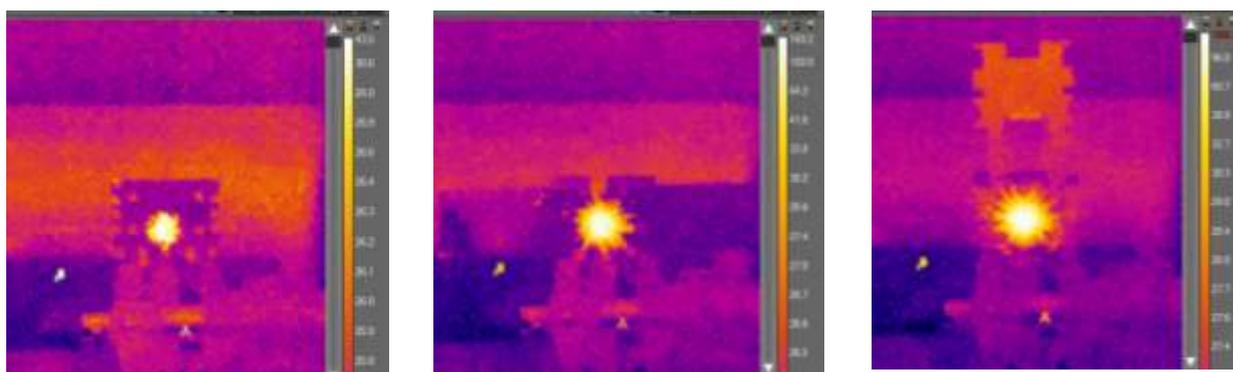


Рисунок 67 – Особенность детектирования отраженного излучения CO<sub>2</sub> лазера ИК камерой (четырёхкратное увеличение)

Особенность использования полированных металлов также приводит к необходимости дополнительной настройки ИК камеры и лазера для организации точного попадания отраженного луча в объектив ИК камеры. Поскольку в данном случае имеем дело с зеркальным отражением, в отличие от неполированной поверхности, когда имеет место диффузное отражение. При диффузном отражении положение наблюдателя не имеет значения, так как диффузно отраженный свет рассеивается по всем направлениям. При этом угол наблюдения влияет на интенсивность детектируемого света.

В экспериментах также было измерено отражение лазерного луча от различных материалов. На рисунке 68 приведены изображения детектированного ИК камерой отраженного лазерного луча от различных материалов.



а) Нержавеющая сталь

б) Медь

в) Алюминий

Рисунок 68 – Тепловое изображение отраженного лазерного луча CO<sub>2</sub> лазера от различных материалов

В данном эксперименте использовались следующие металлы: нержавеющая сталь, медь, алюминий. Все поверхности выбранных материалов были неполированными, матовыми. Мощность лазера была стабилизирована и постоянна для всех измерений. Из рисунка 68 видно, что имеется разница

кажущейся температуры для разных материалов. Что подтверждает правильность предлагаемой методики.

Как видно из рисунка 68, наибольшая мощность отражённого лазерного луча наблюдается от алюминия (что проявляется в большей кажущейся температуре), наименьшая от нержавеющей стали.

Полученные результаты согласуются со справочными данными для рассматриваемых материалов. Как показал анализ возможной степени черноты приведенных металлов, нержавеющая сталь имеет наибольшее значение степени черноты и соответственно дает наименьшее отражение, алюминий имеет наименьшее значение степени черноты и соответственно, от его поверхности имеет место наибольшее отражение. Также заметно, что с уменьшением степени черноты наблюдается увеличение диаметра отраженного излучения.

На основе проведенной настройки и отработки схемы измерения были подтверждены основные идеи предлагаемого способа.

#### 4.2.4 Система синхронизации работы ИК камеры и лазера

Во время проведения работ по настройке схемы и режимов измерения в рамках этапа 2018 года для синхронного запуска термографической камеры и ИК лазера использовался двухканальный генератор сигналов. Однако при анализе получаемых данных было установлено, что при таком запуске имеется некоторая временная неопределенность запуска ИК камеры в пределах 5 мс. Это связано с особенностью устройства электронной схемы камеры имеющей внутренний генератор для тактирования и управления сбором данных АЦП с камеры. Внутренний генератор камеры выдает импульсы с частотой 200 Гц и длительностью около 200 мкс. В связи с этим при подаче на камеру внешнего импульса запуск регистрации первого кадра происходит по первому ближайшему импульсу синхронизации внутреннего генератора. В связи с этим при таком запуске камеры и лазера имеет место неопределенность запуска камеры по отношению к лазеру в пределах 5 мс в зависимости от того на какое время пришелся сигнал внешнего запуска по отношению к ближайшему импульсу синхронизации внутреннего генератора. Что даст, при периодически повторяющихся запусках регистрации камеры, отличие в мощности регистрируемого отраженного лазерного излучения во всех файлах регистрации данных.

Для повышения точности запуска, синхронности работы лазера и ИК камеры, и достижения соответствующей стабилизации регистрируемой мощности отраженного лазерного излучения было предложено использовать сигналы внутреннего генератора ИК камеры. У используемой модели ИК камеры есть техническая возможность вывода тактовых импульсов внутреннего генератора для синхронизации другого оборудования. На рисунке 69 приведена схема цифровых входов/выходов используемой термографической камеры модели FLIR A655 SC.

Как видно из рисунка 69 при подаче постоянного напряжения в диапазоне 6-24 В на контакты 5,6 можно вывести импульсы синхронизации при подключении к контактам 3,6. При этом амплитуда выходных сигналов равна амплитуде опорного питающего напряжения на входе камеры.

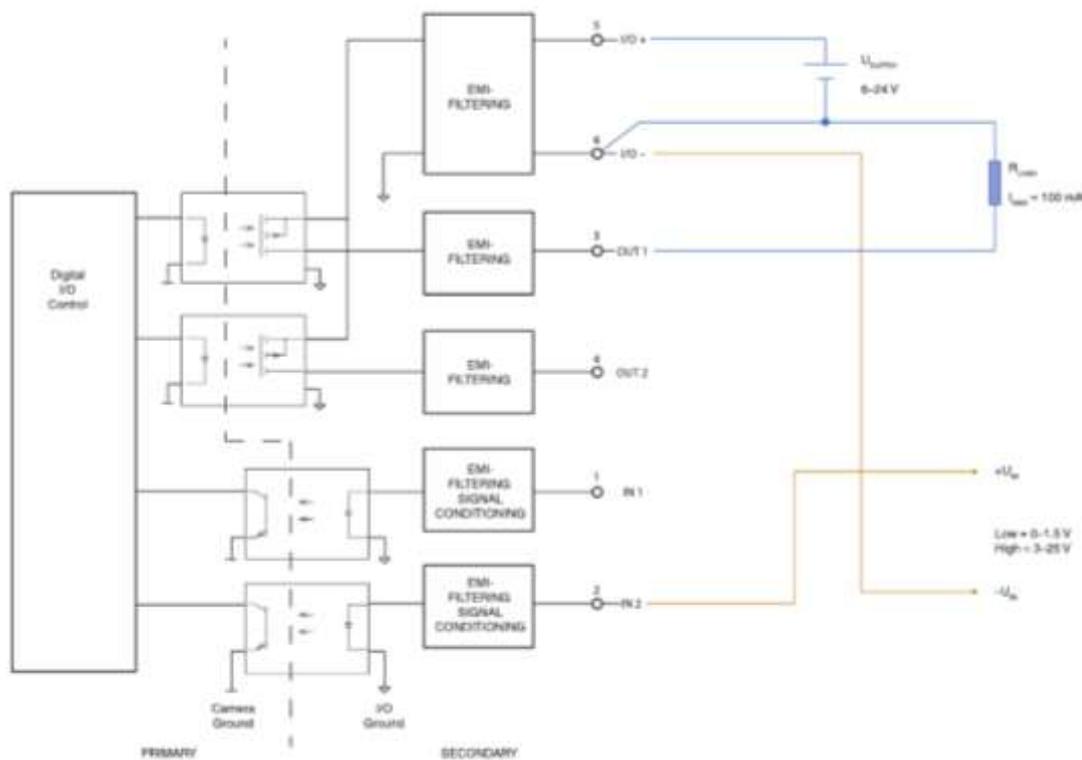
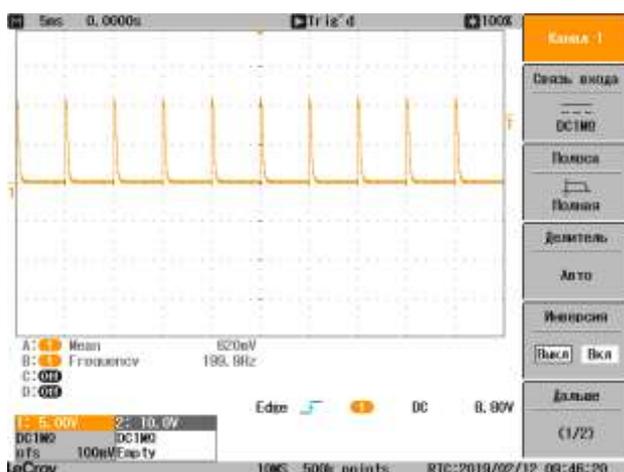
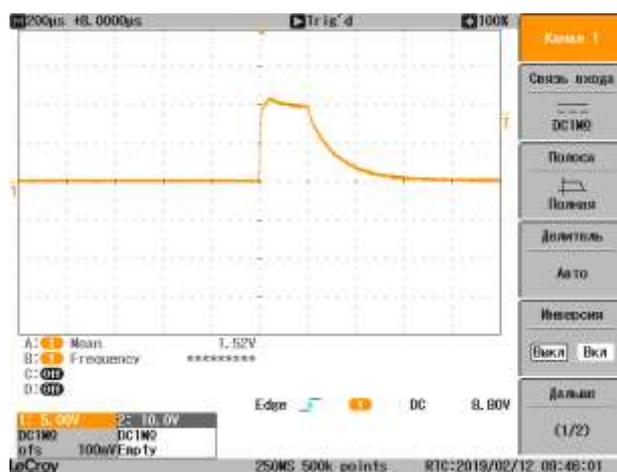


Рисунок 69 – Схема цифровых входов/выходов термографической камеры FLIR A655 SC

На рисунке 70 показаны выходные сигналы синхронизации с ИК камеры при подаче опорного напряжения равного 10 В.



а) внешний вид выходных импульсов (временной шаг – 5 мс/деление)



б) форма одиночного импульса (временной шаг – 200 мкс/деление)

Рисунок 70 – Выходные сигналы синхронизации с термографической камеры FLIR A655 SC

Как видно из рисунка 70 выходные импульсы с термографической камеры имеют форму квазипрямоугольных импульсов с периодом повторения 5 мс и длительностью импульса 200 мкс на ширине амплитуды. При этом передний фронт имеет быстрый фронт нарастания около 10 мкс. Задний фронт имеет экспоненциально спадающую кривую. Импульсы с термографической камеры выдаются непрерывно при подаче соответствующего уровня напряжения (6-24 В) на цифровой вход камеры, вне зависимости от момента запуска регистрации камеры.

Поскольку для управления лазером необходимо подавать сигналы TTL уровня, то к системе синхронизации, с учетом выходных сигналов с ИК камеры, были сформулированы следующие требования:

1. Импульсы управления лазером должны выдаваться синхронно по фронту нарастания импульсов управления с термографической камеры. Частота выходных импульсов управления лазером  $f_{\text{лазера}}$  должна быть настраиваемой в диапазоне от 1 Гц до 20 Гц. В общем случае:

$$f_{\text{лазера}} = f_{\text{камеры}} / K,$$

где  $K$  – число пропусков импульсов с термографической камеры;

$f_{\text{камеры}}$  – частота камеры.

2. Ширина импульсов управления лазером должна быть настраиваемой в диапазоне от 1 мс до 5 мс.

3. Выходные импульсы управления лазером должны быть стабильны, профиль и ширина импульсов должны быть стабилизированы и неизменны во времени. Запаздывание генерации импульсов управления лазером не должно превышать 100 мкс относительно входного импульса с термографической камеры и иметь постоянное время запаздывания.

Для реализации выше изложенных требований был разработан электронный блок реализующий все выше изложенные требования.

#### 4.2.5 Оценка точности измерения

После разработки системы синхронизации были проведены несколько проверочных тестов по определению ряда параметров работы всей измерительной системы в сборе. Для проведения измерений была установлена длительность импульса управления лазером равной 3 мс. Фактическая измеренная ширина выходного импульса управления лазером составила 3,3 мс. При этом было установлено, что имеется нестабильность длительности импульса в пределах 50 мкс, что при длительности импульса 3,3 мс дает разброс энергии импульсного излучения лазера в пределах 1,5%. Это дает дополнительную нестабильность мощности излучения лазера. Заявляемая производителем, используемого в качестве подсветки лазера, нестабильность мощности излучения составляет 2% при использовании температурного контроллера для поддержания температуры лазера на заданном значении. Таким образом, суммарное отклонение мощности от заданного уровня может варьироваться в пределах 3,5%.

Реальное значение отклонения мощности излучения лазера было экспериментально измерено. Вся система измерения была собрана и настроена. Предварительно перед проведением измерений лазер был прогрет в течение 1 часа на заданной температуре с подачей импульсов синхронизации с длительностью 3,3 мс и периодом 10 Гц. После достижения стабилизации температуры лазера была проведена серия измерений отраженного лазерного излучения термографической камерой через равные промежутки времени в течение одного часа. Длительность записи термографической камерой одного измерения составляло 1 с при частоте кадров 200 Гц. На рисунке 71 приведена построенная кривая изменения отраженной мощности излучения лазера во времени по данным измерений ИК камеры.

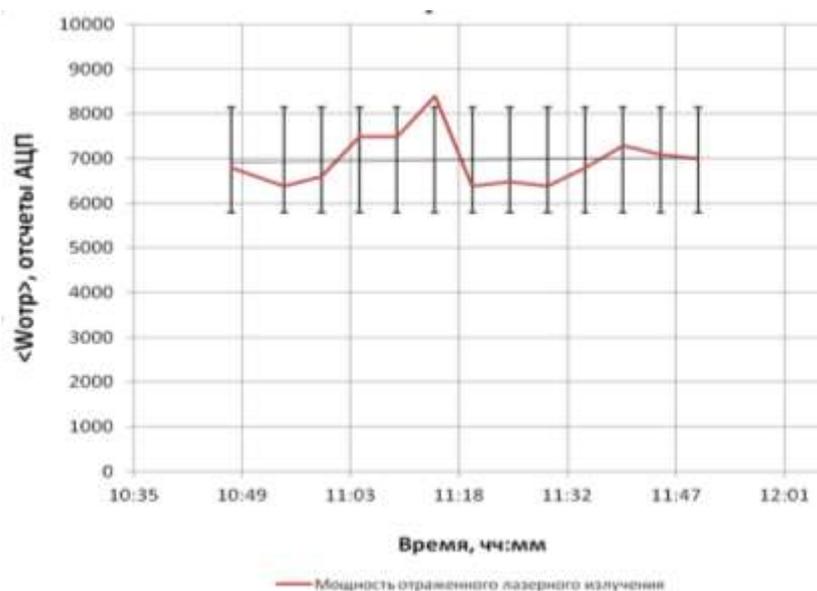


Рисунок 71 – Мощность отраженного лазерного излучения во времени

Согласно полученным данным среднеквадратичное отклонение мощности излучения составляет  $\sim 7\%$ . При этом имеют место флуктуации мощности с максимальным отклонением от среднего значения около  $10\%$ .

Поскольку мощность лазерного излучения напрямую связана с мощностью отражения, то исходя из этого, предельная погрешность измерения мощности отраженного лазерного излучения будет составлять  $\pm 10\%$ . Таким образом, была определена погрешность измерения отраженной мощности излучения в последующих экспериментах на стендах с нагревом образцов материалов с использованием высокотемпературного омического нагревателя и заряженными частицами на ИС ППУ. Следует отметить, что для экспериментов, проводимых на стендах, продолжительность времени эксперимента сравнима с длительностью измерения отклонения мощности лазерного излучения показанной на рисунке 71. Соответственно погрешность измерения будет соответствовать полученной здесь. Однако, в реальных условиях токамака КТМ, где плазменный разряд не будет превышать 5 секунд, погрешность измерения будет меньше. Поскольку, за такой короткий

промежуток времени изменение мощности лазера будет иметь меньшее отклонение, не превышающее 5%.

На данном этапе также был проведен эксперимент по измерению мощности отраженного лазерного излучения от металлических поверхностей, имеющих разные коэффициенты отражения/степень черноты. В данном эксперименте использовались следующие металлы: вольфрам листовой, стальной лист, вольфрам марки DF. Все поверхности выбранных материалов были не полированными. Предварительно были проведены измерения их излучательной способности. Измерения производились путем небольшого нагрева образцов материалов до температуры 100 °С с контролем температуры нагрева термопарой, установленной на поверхность образца. По данным тепловизионной камеры подбиралось такое значение излучательной способности, при котором измеренная ИК камерой температура совпадала с показаниями термопары. Нагрев материалов производился для повышения уровня излучения материала, находящегося в условиях теплового равновесия с окружающей средой. При нагреве до не очень высокой температуры до 100 °С степень черноты образца вследствие нагрева практически не изменяется, однако при этом температура материала становится много больше окружающей и отраженным фоновым тепловым излучением от других предметов можно пренебречь. Такая методика используется для определения излучательной способности  $\varepsilon$  поверхности исследуемого материала в неразрушающем контроле [94]. Следует отметить, что итоговые образцы для тестового эксперимента отбирались по принципу заметного отличия значения степени черноты. При этом шаг изменения степени черноты каждого последующего образца, начиная с образца с наименьшим значением, отличался не менее чем на 20% от предыдущего.

В таблице 32 приведены измеренные значения излучательной способности для выбранных материалов, полученные по такой методике.

Таблица 32 – Излучательная способность  $\varepsilon$  образцов материалов

№ п/п	Материал	$\varepsilon$	$\rho$	$\Delta\rho/\rho_1$
1	Пластина вольфрамовая	0.08	0,92	-
2	Стальная пластина	0.477	0,523	43%
3	Вольфрам DF	0.7	0,3	67%

Далее были проведены измерения мощности лазерного излучения, отраженного от поверхности выбранных материалов. На рисунке 72, для примера, приведены изображения с тепловизионной камеры двух образцов вольфрама во время зондирования их поверхности лазерным излучением.



а) Пластина вольфрамовая марки ВА



б) Вольфрам марки DF

Рисунок 72 – Тепловое изображение отраженного излучения CO2 лазера от разных материалов

Мощность лазера была стабилизирована и постоянна в течение всего времени эксперимента для всех измерений. Из рисунка 72 также заметно, что с уменьшением степени черноты наблюдается увеличение диаметра отраженного излучения. Что также находится в согласии с теорией, поскольку лазерный луч имеет Гауссовый профиль распределения мощности, то с увеличением отражательной способности поверхности тела, отражается больше мощности, в том числе на краю пучка лазера и ее становится достаточно для детектирования ИК камерой и это проявляется в эффекте увеличения пятна отраженного лазерного излучения. В таблице 33 приведены результаты измерения отраженного лазерного излучения для рассматриваемых материалов.

Таблица 33 – Мощность отраженного лазерного излучения.

№ п/п	Материал	$\langle W_{отр} \rangle$ (Вт/см <sup>2</sup> ср)	$\Delta W / W_1$
1	Пластина вольфрамовая	0.00777	-
2	Сталь Матовая	0.00388	50%
3	Вольфрам DF	0.00157	79%

Как видно из сравнения данных таблиц 32 и 33 мощность отраженного излучения увеличивается с увеличением коэффициента отражения с соответствующим уменьшением значения излучательной способности, что находится в четком согласии с теорией. В таблицах 32 и 33, для сравнения, также приведены значения относительного изменения коэффициента отражения и мощности отраженного излучения образцов по отношению к вольфрамовой пластине. В идеале значения относительного изменения отраженной мощности и степени черноты должны совпасть. Однако, как следует из таблиц 32 и 33, относительное изменение мощности отраженного излучения и коэффициента отражения не совпадают. В среднем разница составляет 10%. Данное отличие, по всей видимости, связано с точностью измерения, вызванной, прежде всего, нестабильностью мощности лазерного излучения, как было показано выше. Также одна из возможных причин

разницы может быть связана с отличием среднего коэффициента отражения в диапазоне 7-14 мкм и коэффициента отражения на длине волны лазера для данных материалов. Теоретически, при сужении рабочего диапазона камеры и приближении его к длине волны лазера расхождение должно уменьшиться. К сожалению, в виду отсутствия соответствующего фильтра проверить данную гипотезу не представлялось возможным.

#### **4.3 Обработка способа термографических измерений**

Для обработки способа и демонстрации его работоспособности были проведены стендовые эксперименты с использованием высокотемпературного омического нагревателя и имитационного стенда с плазмо-пучковой установкой. Ниже приведены полученные экспериментальные результаты.

4.3.1 Эксперименты по обработке методики измерения на вакуумном стенде с использованием высокотемпературного нагревателя

В качестве вакуумного стенда решено было использовать непосредственно вакуумную камеру токамака КТМ. Что позволяет отработать метод в реальных условиях и в силу больших размеров вакуумной камеры предотвратить нагрев стенок камеры от разогретого до высокой температуры нагревателя и таким образом избежать паразитного фонового излучения от стенок камеры. Также большие размеры камеры уменьшали влияние собственного отраженного теплового излучения от разогретого нагревателя с образцом. В секторе вакуумной камеры, где был размещен нагреватель, на момент проведения эксперимента были установлены графитовые тайлы чтобы уменьшить отражение теплового излучения от нагревателя. На рисунке 62 показана схема размещения тепловизионной камеры и лазера на ВК КТМ при проведении данных экспериментов. Как видно, наблюдение ИК камерой за образцами, размещаемыми с нагревателем на диверторном столе, будет производиться с вертикального смотрового трекового патрубка. Через этот же патрубок производится передача лазерного луча.

Для нагрева образцов был приобретен специальный высокотемпературный электрический нагреватель модели VH-2-1000-CC-NV производства компании Thermic Edge, Великобритания. Нагреватель рассчитан на нагрев до температуры 1000 °С. В качестве нагревательного элемента используется графитовый композит. Над нагревательным элементом установлен керамический изолятор для предотвращения непосредственного контакта нагреваемого материала с электрическим нагревательным элементом. Поверхность нагревателя разогревается равномерно, что достигается специальной формой электрического нагревателя. Тело нагревателя и токоподводящие элементы выполнены из молибдена. Экран нагревателя изготовлен из нержавеющей стали. Нагреватель снабжается термопарой типа ХА. Нагреватель предназначен для работы в вакууме или в атмосфере инертных газов. Диаметр зоны нагрева 50 мм. При температуре 1000 °С тока питания составляет 20 А при напряжении 30 В.

На рисунке 73 показан нагреватель, установленный на диверторный стол вакуумной камеры токамака КТМ вместе с образцом вольфрама марки ВА. Для контроля непосредственно температуры нагрева поверхности образцов была установлена дополнительная термопара типа ХА.



Рисунок 73 – Высокотемпературный нагреватель, установленный внутри ВК КТМ с образцом

Линии питания и сигнальные линии термопары выведены через герморазъемы. Питание нагревателя осуществляется от регулируемого источника питания. Для измерения температуры используются универсальные измерительные блоки ТРМ1, на которые заводятся сигналы с термопары. На рисунке 74 показаны блоки ТРМ1 на рабочем месте.



Рисунок 74 – Блоки ТРМ для измерения температуры

На рисунке 75 показаны ИК камера и СО<sub>2</sub> лазер установленные на смотровом трековом патрубке ВК КТМ. В конструкции крепления ИК камеры и СО<sub>2</sub> лазера предусмотрена их гальваническая развязка от вакуумной камеры.



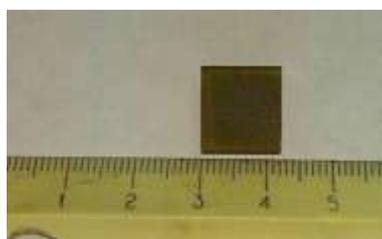
Рисунок 75 – ИК камера с  $\text{CO}_2$  лазером на трековом патрубке КТМ

На рисунке 76 показано размещение измерительного оборудования на эстакаде КТМ во время проведения экспериментов.



Рисунок 76 – Размещение измерительного оборудования на эстакаде КТМ во время проведения экспериментов

Для проведения экспериментов были отобраны образцы вольфрама и бериллия. На рисунке 77 показаны подготовленные образцы вольфрама и бериллия. Измеренная шероховатость образцов  $R_z$  составляет 27 мкм. Такая шероховатость обеспечивается при непосредственной резке образцов на электроэрозионном станке.



Вольфрам DF



Бериллий

Рисунок 77 – Образцы материалов для проведения экспериментов на ВК КТМ

При проведении экспериментов обеспечивался остаточный уровень давления газов в вакуумной камере порядка  $10^{-6}$  Торр.

На рисунке 78 приведено изображение разогретого нагревателя в видимом спектре, а также тепловое изображение с ИК камеры.

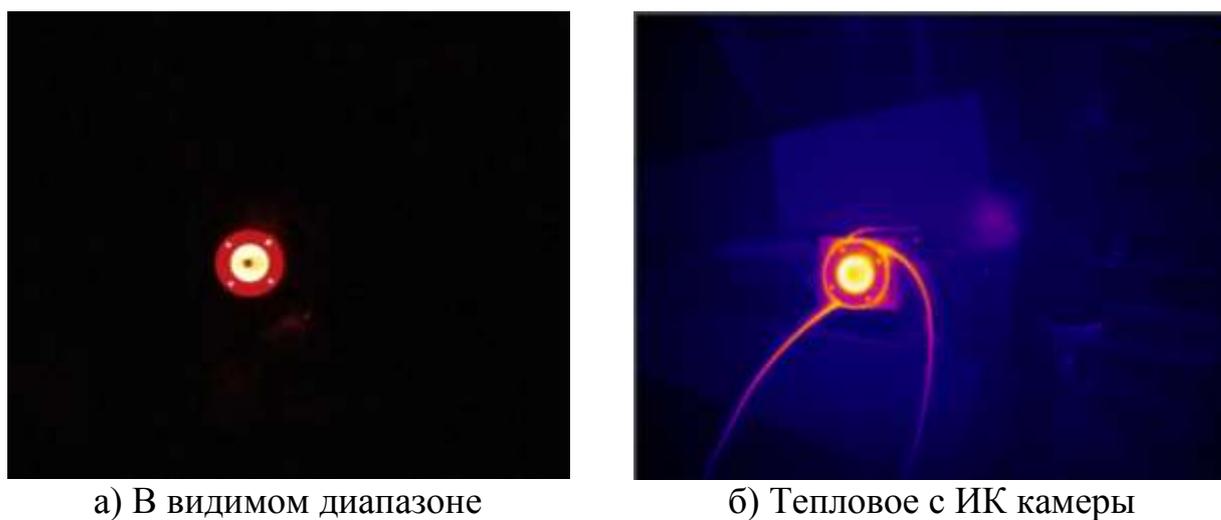


Рисунок 78 – Изображение разогретого нагревателя

Также была проведена юстировка лазера и нагревателя с целью обеспечения попадания луча лазера на образец, размещенный на нагревателе. На рисунке 79 показан кадр теплового изображения с ИК камеры во время детектирования отраженного лазерного излучения.

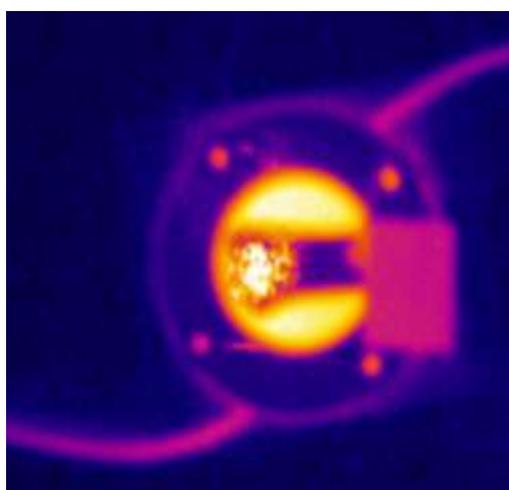


Рисунок 79 – Тепловое изображение (четырёхкратное увеличение) с ИК камеры с отраженным лазерным излучением

Максимальная температура нагрева поверхности образцов материалов, которую удалось достичь во время проведения экспериментов, составила около 700 °С. Этому значению соответствует предельная температура самого электрического нагревательного элемента, равная 1200 °С. Такой перепад температур связан с тем, что между электрическим нагревательным элементом, выполненным из графита, используется керамическая проставка для диэлектрической развязки образца и нагревателя. Также при повышении температуры нагрева увеличивается пропорционально четвертой степени

температуры, мощность излучения. Два этих фактора приводят к значительному перепаду температуры самого нагревательного элемента и на поверхности образца.

В таблицах 34, 35 приведены результаты измерений во время нагрева образцов вольфрама и бериллия. Для каждой из температурных точек приведено значение коэффициента отражения материала, определенное по выше указанной методике, и значение, вычисленное по показаниям ИК камеры, отраженной мощности излучения лазера. Также в таблицах 34, 35 приведены значения относительного изменения коэффициента отражения и мощности отраженного излучения лазера. В качестве исходного значения по отношению к которому определялось изменение при нагреве использовалось соответствующее значение при наименьшей температуре образца.

Таблица 34 – Экспериментальные данные, полученные при нагреве образца бериллия.

№ п/п	Температура, °С	Коэффициент отражения, $\rho$	$\Delta\rho_i/\rho_1$ , %	$\langle W_{отр} \rangle$ , Вт/см <sup>2</sup> ср)	$\Delta W_i/W_1$ , %
2	300	0,426	-	0,097075	-
3	400	0,428	0,5	0,096877	-0,2
4	500	0,428	0,5	0,101915	4,9
5	600	0,423	-0,7	0,095771	-1,3
6	700	0,427	0,2	0,093402	-3,7

Таблица 35 – Экспериментальные данные, полученные при нагреве вольфрама.

№ п/п	Температура, °С	Коэффициент отражения, $\rho$	$\Delta\rho_i/\rho_1$ , %	$\langle W_{отр} \rangle$ , Вт/см <sup>2</sup> ср)	$\Delta W_i/W_1$ , %
1	300	0,924	-	0,324543	-
2	400	0,911	-1,4	0,290632	-10,4
3	500	0,904	-2,1	0,344884	6,2
4	600	0,895	-3,1	0,338465	4,2
5	700	0,889	-3,8	0,339844	4,7

Регистрация данных ИК камерой выполнялась в диапазоне измерения 300÷2000 °С. Продолжительность времени эксперимента с нагревом каждого образца до 700 °С около 1 часа. Для каждого из образцов подбиралась своя мощность излучения лазера. Мощность лазера подбиралась таким образом, чтобы максимальная эффективная температура образца в области подсветки лазером по показаниям тепловизионной камеры не превышала 1000 °С.

В целом как можно увидеть из данных таблицы 34, 35 изменение степени черноты рассматриваемых образцов не превышает 5% при их нагреве от 300 до

700 °С. При этом, относительное изменение мощности излучения варьируется в пределах 10%. Что лежит в диапазоне точности измерения отрабатываемого способа, на момент проведения экспериментов, и подтверждает правильность предварительно полученного значения точности измерения, равного 10%.

К сожалению, в данном эксперименте излучательная способность (коэффициент отражения) у выбранных образцов вследствие нагрева изменялась не значительно, что не позволило в полной мере продемонстрировать работоспособность способа измерения. Однако, следует отметить, что в реальных условиях токамака нагрев материала будет происходить вследствие воздействия на поверхность потока плазмы (заряженных частиц), что может приводить к более значительному изменению степени черноты, вследствие модификации поверхности. На следующем этапе экспериментов по отработке методики измерения были проведены эксперименты на стенде с нагревом образцов материалов потоком заряженных частиц.

#### 4.3.2 Эксперименты по отработке методики измерения на ИС ППУ

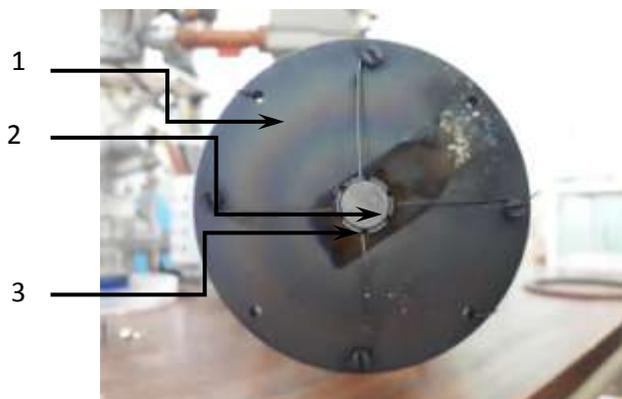
Для отработки способа термографических измерений в условиях приближенных к условиям воздействия плазмы были проведены эксперименты с облучением образцов металлов на имитационном стенде с плазмо-пучковой установкой (ИС ППУ) [95].

На рисунке 80 приведена схема проведения эксперимента на ИС ППУ. Поскольку на стенде имеется ограниченное количество патрубков для наблюдения за образцом, то было принято решение организовать подсветку образца с патрубка, расположенного с тыльной стороны с использованием поворотного зеркала, как показано на рисунке 80. В качестве материала смотровых окон были выбраны ZnSe и BaF<sub>2</sub>, соответственно для ИК камеры и CO<sub>2</sub> лазера.



Рисунок 80– Схема термографического измерения на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой

Отработка методики термографических измерений производилась с вольфрамовыми образцами марки ВЧ и ВА, которые представляли собой: 1) диск высотой ~1,5 мм и диаметром 10 мм ( $S=0,75 \text{ см}^2$ ) и 2) вольфрамовая пластина толщиной 0,5 мм. Образцы устанавливались на водоохлаждаемом коллекторе, показанном на рисунке 81.

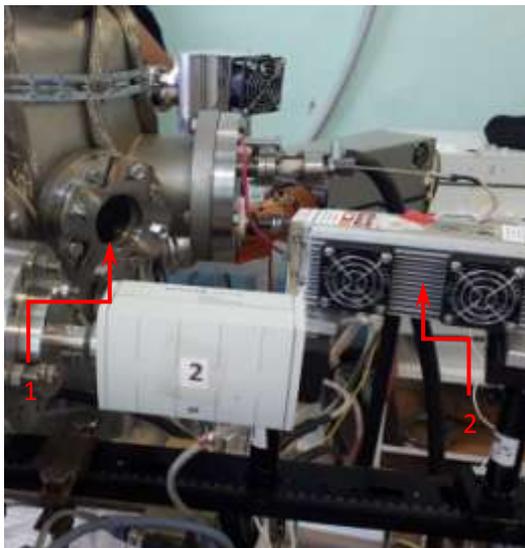


1 – охлаждаемый коллектор; 2 – исследуемый образец; 3 – держатель

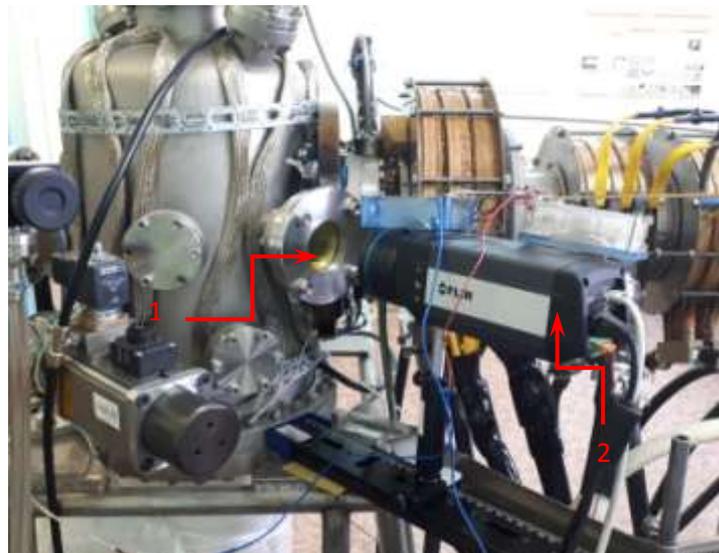
Рисунок 81 – Общий вид мишенного узла

Измерение температуры с тыльной стороны образцов проводилось при помощи термопары типа ВР 5/20.

Расположение термографического пирометра и лазера на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой во время проведения эксперимента, показано на рисунке 82.



а) расположение лазера  
1 – смотровое окно, 2 – CO<sub>2</sub> лазер



б) расположение ИК камеры  
1 – смотровое окно, 2 – ИК камера

Рисунок 82 – Расположение термографического пирометра и лазера на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой

Перед проведением экспериментов на ППУ была измерена исходная степень черноты образцов вольфрама по методу, приведенному в разделе 4.3.6.

После проведения подготовки стенда ППУ, монтажа измерительного оборудования, настройки и юстировки оптического приемо-передающего тракта были проведены эксперименты по отработке способа измерения. Одним из преимуществ проведения экспериментов на подобном стенде является возможность нагрева образцов до высоких температур до и выше 1000 °С. Во время проведения эксперимента образцы нагревались до температуры 1200 °С.

В таблице 36 приведены данные по результатам эксперимента на ИС ППУ с образцом выполненным из вольфрама марки ВЧ.

Таблица 36 – Экспериментальные данные, полученные ИС ППУ с использованием образца вольфрама марки ВЧ.

№ п/п	Температура, °С	Коэффициент отражения, $\rho$	$\Delta\rho_i/\rho_1$ , %	$\langle W_{отр} \rangle$ , Вт/см <sup>2</sup> ср)	$\Delta W_i/W_1$ , %
1	480	0.402	-	0.02448	-
2	567	0.364	-9.5	0.023979	-2.1
3	667	0.371	-9.2	0.024222	-1.1
4	767	0.401	-0.3	0.025094	2.5
5	863	0.47	20.1	0.030081	22.9
6	978	0.541	41.0	0.032442	32.5
7	1069	0.589	55.2	0.03441	40.6
8	1171	0.624	65.5	0.036716	49.9

На рисунке 83 приведены графики зависимости отражательной способности и мощности отраженного лазерного излучения от температуры, построенные по данным таблицы 36.

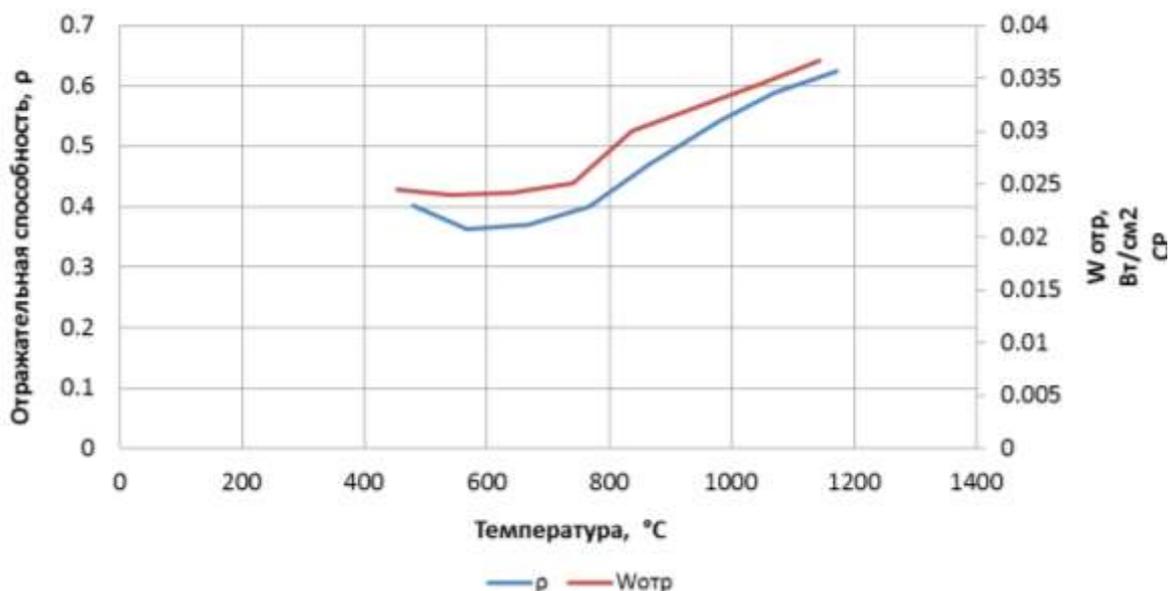


Рисунок 83 – Зависимость отражательной способности  $\rho$  и мощности отраженного лазерного излучения  $W_{отр}$  от температуры образца вольфрама марки ВЧ

В таблице 37 приведены данные по результатам эксперимента на ИС ППУ с образцом выполненным из листа вольфрама марки ВА.

Таблица 37 – Экспериментальные данные, полученные ИС ППУ с использованием образца вольфрама листового марки ВА.

№ п/п	Температура, °С	Коэффициент отражения, $\rho$	$\Delta\rho_i/\rho_1$ , %	$\langle W_{отр} \rangle$ , Вт/см <sup>2</sup> ср)	$\Delta W_i/W_1$ , %
1	422	0.852	-	0.205810	-
2	621	0.778	-8,6	0.198069	-3,8
3	830	0.746	-12,4	0.181696	-11,7
4	1026	0.7442	-12,7	0.168797	-10,2
5	1223	0.795	-6,7	0.173136	-15,8

На рисунке 84 приведены графики зависимости отражательной способности и мощности отраженного лазерного излучения от температуры, построенные по данным таблицы 37.

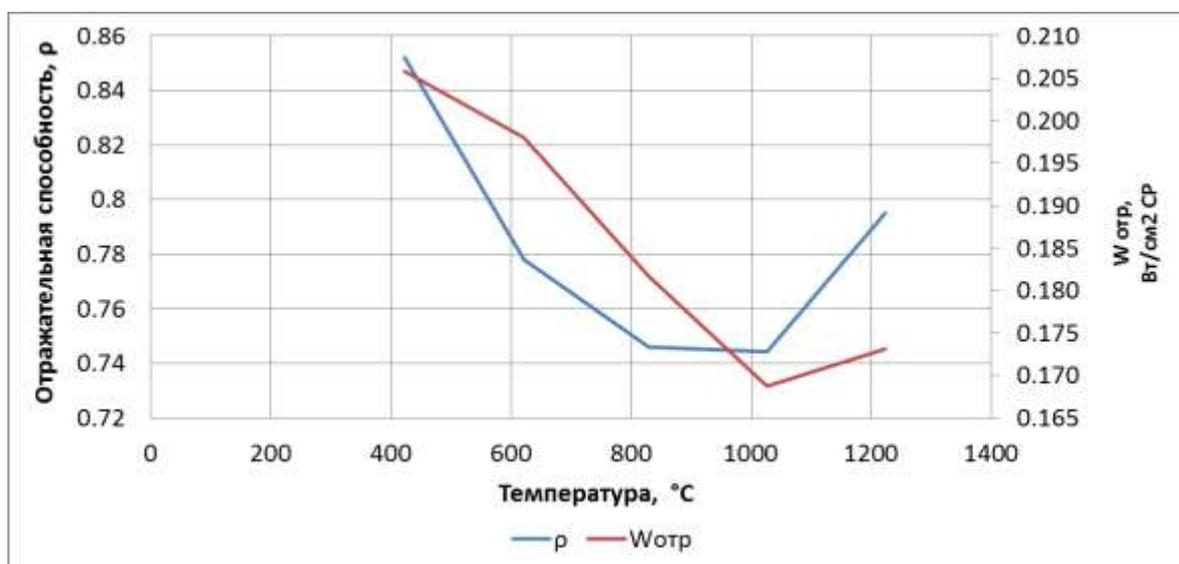


Рисунок 84 – Зависимость отражательной способности  $\rho$  и мощности отраженного лазерного излучения  $W_{отр}$  от температуры вольфрама ВА

Как можно увидеть из данных таблиц 36, 37 и рисунков 83, 84 имеется достаточно близкое совпадение результатов измерения изменения коэффициента отражения по предложенному способу и по найденным значениям, определенным с использованием показаний термопары, что говорит о работоспособности рассматриваемого способа. Можно заметить, что кривая изменения коэффициентов отражения имеет сложную зависимость, что связано, по всей видимости, с одновременным протеканием нескольких процессов: нагрева, а также изменения состояния поверхности: шероховатости, чистоты и пр.

В целом, у образца вольфрама марки ВА при нагреве коэффициент отражения уменьшился. Однако, кривая имеет не линейную зависимость от

температуры по сравнению с теоретическими расчетами для чистой полированной поверхности (рисунок 12). Изменение коэффициента отражения/степени черноты имели не большое значения по сравнению с образцом вольфрама марки ВЧ. При визуальном осмотре образца после эксперимента было обнаружено, что он стал светлее.

Результаты облучения и нагрева образца вольфрама марки ВЧ дали очень интересные результаты. Степень черноты при нагреве образца от 500 °С до 700 °С практически не изменялась после изменения при достижении 500 °С, а при последующем увеличении температуры наблюдается заметное изменение, проявляющееся в уменьшении степени черноты и в соответствующем увеличении отражательной способности. По всей видимости, это связано с заметными изменениями, происходящими на поверхности материала. Можно предположить, что происходят два процесса: в первую очередь происходит уменьшение шероховатости поверхности под действием электронов, а также происходит дополнительный эффект очистки поверхности. В пользу этого говорит то, что после эксперимента при визуальном осмотре образец также стал светлее по сравнению с исходным состоянием.

На рисунке 85 показан образец вольфрама марки ВЧ до и после эксперимента в ППУ.

Исходная степень черноты образца марки ВЧ до облучения в ППУ составляла 0,596, значение же степени черноты после экспериментов в ППУ составило 0,335. Что также свидетельствует о модификации поверхности под действием облучения пучком электронов.



а) образец до эксперимента



б) образец после эксперимента

Рисунок 85 – Образец вольфрама до и после нагрева в ИС ППУ

В целом, у образца вольфрама марки ВА при нагреве коэффициент отражения уменьшался, что по всей видимости говорит о преобладании увеличения степени черноты вследствие нагрева по сравнению с модификацией поверхностью. Изменение коэффициента отражения/степени черноты имели не большое значения по сравнению с образцом вольфрама марки ВЧ. При визуальном осмотре образца после эксперимента было обнаружено, что он стал светлее по сравнению с исходным состоянием. На рисунке 86 показан образец вольфрама марки ВА после эксперимента.



Рисунок 86 – Образец вольфрама после нагрева в ИС ППУ

Как видно из рисунка 18, левая сторона образца стала чище и светлее по сравнению с правой частью. Именно в левую сторону образца был направлен пучок электронов. Осветление поверхности говорит об увеличении отражательной способности поверхности образца. Действительно, как показали измерения, исходная степень черноты образца вольфрама марки ВА до облучения в ППУ имело значение около 0,1, значение же степени черноты после экспериментов в ППУ составило 0,075.

#### 4.4 Выводы по разделу

Для проведения измерения температуры нагрева образцов материалов, испытываемых на токамаке КТМ, была разработана диагностика ИК визуализации.

Для повышения точности термографических измерений диагностикой ИК визуализации при измерении температуры нагрева металлических поверхностей был предложен оригинальный способ. Способ позволяет отслеживать изменения излучательной способности поверхности тела в течение всего времени плазменного эксперимента. Были проведены расчет обоснование работоспособности предложенного способа. Проведены настройка и отработка схемы и режимов измерения. Проведена экспериментальная отработка способа измерения на стендах с высокотемпературным нагревателем и на стенде с плазмо-пучковой установкой.

По результатам проведенных работ можно сделать следующие выводы:

1. Результаты расчета показали возможность использования предложенного способа термографических наблюдений;
2. Экспериментальная отработка способа на стендах показала его работоспособность;
3. Некоторая неточность определения изменения степени черноты по предложенному способу связана с имеющимся разбросом мощности излучения лазера, предельное отклонение которой, на момент проведения измерений, составляет не более 10%.

Дальнейшие работы по внедрению способа на токамаке КТМ связаны с использованием гомогенизатора лазерного излучения для преобразования гауссового профиля лазерного излучения в плоский. А также повышения стабильности мощности лазерного излучения до 2-3 %, что увеличит точность определения изменения степени черноты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были разработаны устройства и методы, предназначенные для: наблюдения за плазмой в видимом диапазоне электромагнитного излучения, измерения распределения температуры на поверхности исследуемых материалов под действием потоков высокотемпературной плазмы токамака КТМ, также было разработано устройство для точного измерения конфигурации ноль поля. По результатам проведенных работ можно сделать следующие основные выводы:

1. Разработан способ прямого точного измерения конфигурации ноль магнитного поля в вакуумной камере КТМ с использованием трехмерных датчиков Холла.

2. Проведено экспериментальное измерение конфигурации ноль поля в токамаке КТМ с использованием разработанного способа на основе трехмерных датчиков Холла. По результатам измерений было установлено, что фактическая конфигурация ноль поля в токамаке КТМ отличается от значения, полученного с помощью расчетных кодов.

3. На основе полученных данных по результатам проведенных измерений ноль поля внесены коррекции в модель ЭМС КТМ, что позволило значительно повысить точность моделирования начальной стадии пробоя. Рассчитанный токовый сценарий с уточненной моделью ВК позволил достичь лавинного омического пробоя на токамаке КТМ. Способ измерения конфигурации ноль поля внедрен на установке токамак КТМ (Приложение А).

4. Разработана система визуализации плазменного шнура для токамака КТМ. Система позволила проводить наблюдения за плазмой на токамаке КТМ.

5. Проведено исследование формирования плазменного шнура с использованием разработанной системы визуализации плазмы токамака КТМ. В результате чего была продемонстрирована работоспособность системы. Система позволила значительно повысить эффективность проводимых исследований на токамаке КТМ. Система визуализации плазменного шнура внедрена на токамаке КТМ (Приложение Б).

6. Разработана диагностика ИК визуализации для наблюдения за распределением температуры на поверхности исследуемых материалов на токамаке КТМ. Диагностика ИК визуализации внедрена на токамаке КТМ (Приложение В).

7. Предложен оригинальный способ коррекции термографических измерений металлических образцов на токамаке КТМ. Проведенные расчеты показали реализуемость предложенного способа, экспериментальные измерения подтвердили работоспособность способа. Способ позволяет отследить изменение степени черноты исследуемых материалов, в первую очередь металлов, вследствие нагрева и модификации поверхности под воздействием потоков высокотемпературной плазмы. Что позволяет значительно повысить точность измерения температуры на поверхности исследуемых материалов.

В процессе выполнения работы решен широкий комплекс задач направленный на обеспечение проведения научных исследований на токамаке КТМ.

Основные результаты работ позволили осуществить своевременную подготовку и проведение физического пуска (первого и второго этапов) токамака КТМ, а также продемонстрировать работоспособность установки на ЭКСПО 2017.

#### **Оценка полноты решения поставленных задач**

Все поставленные задачи диссертационной работы решены в полном объеме. Намеченные экспериментальные работы выполнены, анализ полученных результатов проведен совместно с научными консультантами и коллегами. Полученные результаты и выводы не противоречат основным положениям физики плазмы, оптики, теплотехники.

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы**

Результаты диссертационной работы внедрены и используются или же будут использоваться в ближайшем будущем на токамаке КТМ. Также результаты диссертационной работы могут быть использованы на других установках УТС.

#### **Оценка научного уровня диссертационной работы**

Высокий уровень выполненной работы обеспечивается тем, что результаты получены с применением хорошо апробированных методов экспериментальных исследований в специализированных лабораториях Филиала «ИАЭ» НЯЦ РК. Литературный обзор по теме диссертации охватывает современные работы ученых ведущих стран мира. Полученные результаты опубликованы в известных зарубежных журналах, входящих в базу данных Thomson Reuters и Scopus, обсуждены на международных конференциях, проведенных в СНГ и странах дальнего зарубежья.

Выражаю огромную благодарность своим научным консультантам: д.ф.-м.н., профессору Скакову М.К., д.ф.-м.н., профессору Курнаеву В.А. за помощь и поддержку при подготовке диссертационной работы, за ценные советы и консультации при анализе полученных результатов, а также коллективу отдела термоядерных исследований и отдела материаловедческих испытаний Филиала «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК» за участие в проведении экспериментальных работ, а также кафедре «Техническая физика и теплоэнергетика» Государственного университета имени Шакарима города Семей и в частности заведующей кафедрой Степановой О.А. за помощь в подготовке работы и постоянную поддержку.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Scientific, Technical and Engineering work to ensure the safety of the former Semipalatinsk test site / N.A. Nazarbayev, V.S. Shkolnik, E.G. Bатырбеков, S.A. Berzin, S.N. Lukashenko, M.K. Skakov. London, 2017, 596 p. III. 470.
- 2 Садыков А.Д., Шаповалов Г.В., Чектыбаев Б.Ж. Влияние наведенных вихревых токов на магнитное поле в вакуумной камере токамака КТМ // Вестник НЯЦ РК. – 2011. – №3. – С. 6–9.
- 3 Б.Ж. Чектыбаев, Г.В. Шаповалов, Е.К. Маулимбердин. Экспериментальная методика определения магнитных полей в вакуумной камере токамака КТМ на основе датчиков Холла // Вестник НЯЦ РК.– 2011. – №3, 58–63.
- 4 I.L. Tazhibayeva. KTM Experimental Complex Project Status // Fusion Science and Technology.– April 2005.– Vol.47.– P.746 – 750.
- 5 M. Shimada, D.J. Campbel, V. Mukhovatov, M. Fujiwara, N. Kirneva. Overview and summary in Progress in the ITER physics basis // Nucl. Fusion.– 2007.– 47.– S1-S17 (Chapter 1).
- 6 M. Merola. ITER plasma-facing components // Fusion Engineering and Design.– December 2010.– Vol. 85.– Issues 10-12.– P. 2312-2322.
- 7 Mayayuki Ono. Lithium as Plasma Facing Component for Magnetic Fusion Research. PPPL Technical Report. September 2012. [http://bp.pppl.gov/pub\\_report//2012/PPPL-4808.pdf](http://bp.pppl.gov/pub_report//2012/PPPL-4808.pdf).
- 8 I.Tazhibayeva, I.Lublinski, A.Vertkov, V.Lazarev, A.Azizov, G. Mazzitelli, P. Agostini. Mock-up divertor of KTM tokamak on the base of lithium CPS // Fusion Science and Technology an international journal of the ANS.– August 2011.– Vol.60, number 2. – P.554-557.
- 9 Ch. Linsmeier. Advanced materials characterization and modeling using synchrotron, neutron, TEM, and novel micro-mechanical techniques – A European effort to accelerate fusion materials development // J. Nucl. Mater.– 2013. – Vol. 442. –P. S834–S845.
- 10 C. Lasnier, et al. Study of target plate heat load in diverted DIII-D tokamak discharges // Nuclear Fusion. – 1998. Volume 38. – P. 1225–1249.
- 11 T. Eich, et al., Journal of Nuclear Materials 313–316 (2003) 919–924 T. Eich, et al. Power deposition measurements in deuterium and helium discharges in JET MKIIGB divertor by IR-thermography // Journal of Nuclear Materials. – 2003. Volume 313–316. P. 919–924.
- 12 R. Reichle, et al., Nuclear Fusion 43 (2003) 797–804. R. Reichle, et al. Status of power balance monitoring for long pulse operation at Tore Supra // Nuclear Fusion. – 2003. Volume 43. –P. 797–804.
- 13 D. Guilhem, Y. Corre, et al., ITER Wide-Angle Viewing Infrared and Visible System, EFDA Final Report, 2007.
- 14 E. Gauthier, P. Chappuis, L. Doceul, D. Guilhem, J.B. Migozzi, M. Missirlian. Design of a wide-angle infrared and visible view diagnostic for JET // in Proceedings of the 32nd EPS Conf. on Plasma Physics, ECA.– 2005.– Vol. 29.– P. 1.077.

- 15 M. Clevera, G. Arnouxb, N. Balshaw. A wide angle view imaging diagnostic with all reflective, in-vessel optics at JET // Fusion Engineering and Design.– 88.– 2013.– 1342-1346 p.
- 16 S. Oh, D. Seo and KSTAR Team. Optical system design for infrared imaging system of Korea Superconducting Tokamak Advanced Research (KSTAR) device // Journal of Instrumentation.– February 2012.– Vol. 7.
- 17 Излучательные свойства твердых материалов / Под ред. А.Е. Шейндлина.– М.: Энергия, 1974.– 471 с.
- 18 Линеверг, Ф. Измерение температур в технике: справочник / Пер. с нем.– М.: Металлургия, 1980.– 544 с.
- 19 F. Lotta, A. Netchaieff. Advances in optical thermometry for the ITER divertor // Fusion Engineering and Design, 85.– 2010.– P. 146–152.
- 20 V. N. DOKUKA. Synthesis and Simulation of Plasma Magnetic Control System in tokamak KTM // VANT, Fusion series.– 2008.– issue 1.– P. 12-25.
- 21 Mueller, D. The physics of tokamak start-up. Physics of Plasmas; May2013, Vol. 20 Issue 5, p058101.
- 22 Min-GuYooa, J.H. Kim, Young HwaAn, Hyunseok Kim, Yong-Su Na. Analysis of the Magnetic Field Configuration at the Ohmic Breakdown Phase of a Tokamak. Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Taebaek, Korea, May 26-27, 2011.
- 23 F. Maviglia, R. Albanese, A. Alonso, P.J. Lomas, JET EFDA Contributors. Electromagnetic analysis of breakdown conditions in JET. Fusion Engineering and Design 86 (2011) 675–679.
- 24 A.V. Belov. Transient electromagnetic analysis in tokamaks using TYPHOON code // Fusion Engineering and Design.– 1996. –Volume 31.– Issue 2. – P. 167–180.
- 25 M. Lobanova, L. P. Makarova, A. B. Mineeva, V. I. Vasilieva. Plasma initiation stage analysis in tokamaks with TRANSMAX code // Plasma Devices and Operations.– 2003.–Volume 11, Issue 3.
- 26 Maviglia, F., Albanese, R., de Magistris, M., Lomas, P.J. et. al. Electromagnetic Models of Plasma Breakdown in the JET Tokamak // IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. FEBRUARY 2014.– VOL. 50.
- 27 Hiroaki Tsutsui, Ryuichi Shimada. 2D-simulations of breakdown in tokamak by collisional ionization model. ICPP and 25th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Praha, 29 June – 3 July. ECA Vol. 22C (1998) 1702-1705.
- 28 R. Albanese, L. Bottura, S. Chiochio, E. Coccoresse et.al. Validation of numerical codes for the analysis of plasma discharges. Fusion Engineering and Design 23 (1993) 299-322.
- 29 Jayhyun Kim, WonhoChoe, Masayuki Ono. Time-dependent optimization of initiation phase of the outer PF coil-only inductive start-up of NSTX plasmas. Plasma Phys. Control. Fusion 46 (2004) 1647–1657.
- 30 G. Shapovalov, B. Chektybayev. Operations of KTM for plasma formation and start-up studies. Proc. 2nd IAEA Research Coordination Meeting of Coordination Research Project Utilisation of a Network of Small Magnetic Confinement Fusion

Devices for Mainstream Fusion Research (F1.30.14). Vienna, Austria, 2013 (Vienna: IAEA).

31 B. Shen, W.B. Xi, J.P. Qian, Y.W. Sun, H.Y. Fan. The magnetic field configuration measurement on EAST tokamak. *Fusion Engineering and Design* 84 (2009) 19–23.

32 I. Duran, M. Hron, J. Stöckel, J. Sentkerestiová, K. Kovačik et al. Magnetic field measurements using the galvanomagnetic devices on Tore Supra and CASTOR tokamaks 32nd EPS Conference on Plasma Phys. Tarragona, 27 June - 1 July 2005 ECA Vol.29C, P-2.076 (2005).

33 I. Bolshakova, A. Quercia, V. Coccoresse, A. Murari et al. Magnetic Measuring Instrumentation With Radiation-Resistant Hall Sensors for Fusion Reactors: Experience of Testing at JET // *Nuclear Science*, Volume 59, Issue 4, 2012.

34 V. Martin, V. Moncada, J.M. Travere, Challenges of Video Monitoring for Phenomenological Diagnostics in Present and Future Tokamaks, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 40 (2012) 646.

35 B. Koch, A. Herrmann, A. Kirk, H. Meyer, J. Dowling, J. Harhausen, J. Neuhauser, H.W. Müller, W. Bohmeyer, G. Fussmann, AUG Team, MAST Team, “Observation of ELM structures in MAST and AUG using a fast camera”, *Journal of Nuclear Materials*, Volumes 363–365, 15 June 2007, Pages 1056–1060.

36 S.J. Zweben, R.J. Maqueda, D.P. Stotler, et al., “High-speed imaging of edge turbulence in NSTX”. *Nucl. Fusion* 44, (2004).

37 V. V. Bulanin, I. N. Chugunov, M. I. Vildzunas [et al]. The Globus-M diagnostics design. *Plasma Devices and Operations*, 9:1-2, 129-142, 2001.

38 R. De Angelis, et al., *Rev. Sci. Instr.* 75 (2004) 4082; R. De Angelis, L. Di Matteo / *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 623 (2010) 815–817].

39 A. Szappanos, M. Berta, M. Hron et al. EDICAM fast video diagnostic installation on the COMPASS tokamak. *Fusion Engineering and Design*. Volume 85, Issues 3–4, July 2010, Pages 370-373.

40 А.А. Медведев, Е.В. Александров, Д.К. Вуколов, К.Ю. Вуколов, А.В. Горшков. Эндоскоп для измерений в видимой области спектра на токамаке Т-10. Конструкция и результаты первых экспериментов // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*, 2007, вып. 4, с. 44—50.

41 A. Géraud, S. Salasca, J. M. Verger, T. Alarcon, et al. Fast imaging system on Tore Supra. *Rev. Sci. Instrum.* 80, 033504 (2009);

42 Daniel Carralero, E de la Cal, JL de Pablos, Arne De Coninck [et al]. Turbulence studies by fast camera imaging experiments in the TJII stellarator. *Journal of nuclear materials*. Volume 390-391. p.457-460, (2009)

43 G. De Temmerman, E. Delchambre, A. Kirk, S. Lisgo, P. Tamain Thermographic study of heat load asymmetries during MAST L-mode discharges // *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 52, 095005. – 2010.

44 P. Vondracek, J. Horacek, P. Cahyna, R. Panek, J. Ulicn. Infrared Thermography on the COMPASS Tokamak // *WDS'13 Proceedings of Contributed Papers, Part II*. – 2013. – 80-85 p.

- 45 .G. McLean, J. Ahn, R. Maingi, T.K. Gray, A.L. Roquemore. A dual-band adaptor for infrared imaging // Review of Scientific Instruments 83, 053706. – 2012.
- 46 D. Guilhem, J.L. Bondil. Tore-Supra infrared thermography system, a real steady-state diagnostic // Fusion Engineering and Design. – November 2005. –Vol. 74, Issues 1-4.– P. 879-883.
- 47 E. Gauthier, P. Chappuis, L. Doceul, D. Guilhem, J.B. Migozzi, M. Missirlian. Design of a wide-angle infrared and visible view diagnostic for JET // in Proceedings of the 32nd EPS Conf. on Plasma Physics, ECA. – 2005. – Vol. 29C. – P. 1.077.
- 48 M. Clevera, G. Arnouxb, N. Balshaw. A wide angle view imaging diagnostic with all reflective, in-vessel optics at JET // Fusion Engineering and Design. – 88.– 2013.– 1342-1346 p.
- 49 K. Kamiya, K. Itami, A. Enoguchi. Design study of a wide-angle infrared thermography and visible observation diagnostic on JT-60SA // Materials of 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, 11-14 June 2012, Naples Italy.
- 50 C.J. Lasnier, L.G. Seppala, K. Morris, M. Groth. Visible and Infrared Optical Design for the ITER Upper Ports // Research report, Lawrence Livermore National Laboratory March 4, 2007.
- 51 M. Takeuchi, T. Sugie, H. Ogawa. Development of Divertor IR Thermography for ITER // Plasma and Fusion Research: Regular Articles. – 2013. – Vol. 8, 2402147.
- 52 Infrared thermometer handbook. LumaSense technologies.– 2011.
- 53 Сложный теплообмен / М.Н. Оцисик; перевод с англ. под ред. Н.А. Анфимов.–Москва: Мир, 1976.– С. 616.
- 54 Инфракрасное излучение нагретых тел / М.А. Брамсон.– Москва: Наука, 1964.–226 с.
- 55 Оптические свойства материалов при низких температурах: справочник / Л.А. Новицкий, Б.М. Степанов.– Москва, 1980.– С. 48-50.
- 56 Handbook of Thermodynamic and Transport Properties of Alkali Metals / Ed. R.W. Ohse // IUPAC. Chemical data N30. Blackwaell Scientific Publ.– London-Oxford, 1985.
- 57 Б.Ж. Чектыбаев, Г.В. Шаповалов. Методика экспериментального определения магнитных полей в вакуумной камере токамака КТМ на основе матрицы датчиков Холла // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – №1. – С. 66-73.
- 58 Экспериментальное определение магнитных полей в вакуумной камере токамака КТМ на основе матрицы датчиков Холла / Б.Ж. Чектыбаев, Г.В. Шаповалов, М.К. Скаков // Вопросы атомной науки и техники, выпуск 4, Том 4, 2015, с. 41-50.
- 59 G. Shapovalov, B. Chektybayev, A. Sadykov, M. Skakov. Experimental measurement of null magnetic field in the vacuum chamber of KTM tokamak based on matrix of 2D Hall sensors // Fusion Engineering and Design, Volume 112, 15 November 2016, Pages 432–439.

60 Б.Ж. Чектыбаев, М.К. Скаков. Способ прямого измерения ноль-поля в установке токамак с использованием матрицы трехмерных датчиков Холла, Сборник тезисов докладов 46-ой Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, Россия, 18-22 марта 2019 г., 309 (320);

61 Интернет ресурс: [http://www.gmw.com/magnetic\\_sensors/sentron/csa/MFS3A.html](http://www.gmw.com/magnetic_sensors/sentron/csa/MFS3A.html).

62 А.Д. Садыков, М.К. Скаков, Г.В. Шаповалов, М.С. Садыкова. Расчетный код моделирования динамики магнитных полей с учетом наведенных вихревых токов в установках типа токамак // Вестник НЯЦ РК.– 2015.– Вып. 3.– С. 55-58.

63 Методическое пособие по использованию расчетного кода для восстановления карты магнитного поля в вакуумной камере токамака КТМ по магнитным измерениям и токам в полоидальных обмотках / А.А. Кавин, К.М. Лобанов.– НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, 2009.

64 Чектыбаев Б.Ж., Шаповалов Г.В. Система визуализации плазменного шнура токамака КТМ // Вестник НЯЦ РК, №3, 2014. с 102-110.

65 Visible wide angle view imaging system of KTM tokamak based on multielement image fiber bundle / B. Chektybayev, G. Shapovalov, A. Kolodeshnikov // Review of Scientific Instruments.– May 2015.– Vol. 86, Issue 5.– doi: 10.1063/1.4921475.

66 Utilization of a network of small magnetic confinement fusion devices for mainstream fusion research. Report of a coordinated research project 2011-2016. Viena: International Atomic Energy Agency, 2016. IAEA TECDOC series, ISSN 1011-4289: no. 1807.

67 B. Chektybayev, G. Shapovalov, A. Kolodeshnikov. The New Visible Wide Angle Viewing System for KTM Based on Multielement Image Fiber Bundle. – Program and Abstracts 25th IAEA Fusion Energy Conference, St. Petersburg, Russian Federation, 13-18 October, 2014, p. 628.

68 Б.Ж. Чектыбаев, Г.В. Шаповалов. Система визуализации плазменного шнура токамака КТМ. Дизайн и предварительные экспериментальные результаты. – Тезисы IX международной конференции "Современные методы диагностики плазмы и их применение", Москва, 5-7 ноября 2014 г., НИЯУ МИФИ.

69 Система визуализации видимого и ИК диапазонов токамака КТМ / М.К. Скаков, Г.В. Шаповалов, Б.Ж. Чектыбаев // Сборник аннотаций XIV Курчатовской междисциплинарной молодежной научной школы. Москва, НИЦ «Курчатовский институт», 8-11 ноября 2016.– Москва, 2016.– С. 244 (365).

70 Интернет сайт компании SCHOTT Inc.: [www.schott.com/lightingimaging/english/defenseproducts/imaging/wound.html](http://www.schott.com/lightingimaging/english/defenseproducts/imaging/wound.html).

71 Интернет сайт компании Edmund optics: [www.edmundoptics.com](http://www.edmundoptics.com).

72 Интернет сайт компании ОАО «Катод»: [www.katodnv.com/ru/catalog](http://www.katodnv.com/ru/catalog).

73 Расчет карты магнитного поля вокруг установки КТМ / Э.Н. Бондарчук, И.И. Максимова, А.Б. Минеев. – НИИЭФА им. Ефремова, 2008.

74 Штамберген, Г.А. Устройства для создания слабых постоянных магнитных полей. – Новосибирск, 1972.

75 Шапиро, Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования. – Л.: Энергия, 1975.

76 Введенский, В.Л. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм. – М., 1986.

77 Роуз-Инс, А. Введение в физику сверхпроводимости. – М., 1972.

78 The Visible Intensified Fast Camera with Wide-Angle View of JET ITER-Like Wall Experiment / E. de la Cal. – Proc. 39th EPS Conf. on Plasma Phys., Stockholm, Sweden, 2007.

79 Б.Ж. Чектыбаев, М.К. Скаков, Г.В. Шаповалов. ИК диагностики токамака КТМ для изучения воздействия плазмы на кандидатные материалы первой стенки // Вестник Казахского национального инновационного технического университета им. К.И. Сатпаева. №4 (122), 2017. с488-499 (666).

80 Б.Ж. Чектыбаев, М.К. Скаков, Э.Г. Батырбеков, О.А. Степанова, М.В. Ермоленко. Диагностика ИК визуализации токамака КТМ для изучения воздействия плазмы на кандидатные материалы первой стенки // Вестник ГУ им. Шакарима.– 2018.– № 3.– С. 128-134 (428).

81 Б.Ж. Чектыбаев, М.К. Скаков, Э.Г. Батырбеков, О.А. Степанова, М.В. Ермоленко. Способ термографических измерений кандидатных материалов первой стенки термоядерных реакторов на токамаке КТМ // Вестник ГУ им. Шакарима.– 2019.– № 1.– С. 172-178 (428).

82 Б.Ж. Чектыбаев, Э.Г. Батырбеков, М.К. Скаков, А.Д. Садыков, Е.А. Кашикбаев. О возможности повышения точности тепловизионных измерений кандидатных материалов первой стенки термоядерных реакторов на токамаке КТМ // ВАНТ: серия термоядерный синтез.– 2019.– Том 42, № 4 (42).– С. 41-48.

83 Chektybayev B., Shapovalov G., Skakov M. Kolodeshnikov A. Concept of a new approach in thermographic measurements for plasma-wall interaction studies on KTM tokamak // 9-th IAEA Technical Meeting on Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices. Book of Abstracts, IAEA Headquarters, Vienna, Austria, 20-23-th of March 2017. p 30 (41).

84 B. Chektybayev, M. Skakov, A. Kolodeshnikov. Optical thermometry for research of plasma influence on the first wall materials of future fusion reactors. World Scientific and Engineering Congress “Energy of the future: innovative scenarios and methods of their implementation” WSEC-2017. Congress proceedings, Volume 4, Astana, Kazakhstan, 19-20 June, 2017. P 375-380 (392).

85 Б.Ж. Чектыбаев, Э.Г. Батырбеков, М.К. Скаков, А.Д. Садыков. Разработка способа термографических измерений поверхности кандидатных материалов первой стенки ТЯР токамака КТМ // Тезисы конференций.– VIII международная конференция Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала, 11-13 сентября 2018 г. Курчатов, Казахстан.– С. 163 (172).

86 B. Chektybayev, E. Batyrbekov, M. Skakov, A. Sadykov. Concept of a new approach in thermographic measurements for plasma-wall interaction studies on

КТМ tokamak // Program and Abstracts of 27-th IAEA Fusion Energy Conference, Ahmedabad, India, 22-27 October, 2018

87 Б.Ж. Чектыбаев, Э.Г. Батырбеков, М.К. Скаков. Способ термографических измерений кандидатных материалов первой стенки термоядерных реакторов на токамаке КТМ // Сборник тезисов докладов 46-й Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 18-22 марта 2019 г., г. Звенигород, РФ.– С.308 (320).

88 В. Chektybayev, E. Batyrbekov, M. Skakov, A. Sadykov. Active thermography method for metallic plasma-facing components temperature measurements in the thermonuclear fusion devices // Abstract book of the 3-rd Quantitative InfraRed Thermography Conference Asia, Tokyo, Japan, 1-5 July, 2019.

89 Loarte, A. Multi-machine scaling of the divertor peak heat flux and width for L-mode and H-mode discharges / S.Bosh, A. Chankin // J. of Nucl. Material. – 1999. – v. 266-269. – p.587-589.

90 Казахстанский материаловедческий токамак КТМ: эскизный проект: книга 1. – Москва; Санкт-Петербург, 2000.

91 Э.А. Азизов, А.Д. Баркалов, Г.Г. Гладуш и др. Управление потоками плазмы в диверторную область и флуктуация температуры приемных пластин токамака КТМ. Сборник трудов, вып. 2, Троицк, ОНТИ ГНЦ РФ ТРИНИТИ. 2003 г. стр 25-29.

92 Корпорация Flir [электронный ресурс]: <http://www.flir.com/science/blog/details/?ID=71984>.

93 Сборник задач по лазерным технологиям / В.П. Вейко, Е.А. Шахно.– Изд. 3-е, испр. и дополн.– СПб: СПбГУ ИТМО, 2007.– 67 с.

94 ASTM E 1933 – 97, “Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers”, 962-3 p, (1997).

95 V. Kurnaev, I. Vizgalov, K. Gutorov, T. Tulenbergenov. Investigation of plasma-surface interaction at plasma beam facilities // Journal of Nuclear Materials.– August 2015.– Vol. 463.– P. 228-232.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акт внедрения способа измерения конфигурации ноля поля

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель директора  
Филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК



В.В. Бакланов

«18» 05 2019 г.

#### АКТ

№ 14-280-01/043 АН от 18.05.2019г.

о внедрении результатов диссертационной работы Чектыбаева Б.Ж. «Развитие методов диагностики процессов в плазме и на поверхности первой стенки установки токамак» в Филиале «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК

Мы, ниже подписавшиеся, представители Филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК, заместитель директора по материаловедческим исследованиям Коянбаев Е.Т., главный инженер, PhD Коровиков А.Г. и ученый секретарь, PhD Ерыгина Л.А. составили настоящий акт о том, что в рамках выполнения диссертационной работы по теме «Развитие методов диагностики процессов в плазме и на поверхности первой стенки установки токамак» Чектыбаевым Б.Ж. был разработан и внедрен способ прямого измерения конфигурации ноля поля на основе трехмерных датчиков Холла на токамаке КТМ. Результаты работы являются актуальными и представляют большой практический интерес. С помощью разработанного способа измерения ноля поля на основе трехмерных датчиков Холла были проведены измерения с высокой точностью конфигурации рассеянного полоидального магнитного поля в области нулевого значения в вакуумной камере КТМ. Это позволило провести верификацию расчетного кода и провести работу по оптимизации используемой модели электромагнитной системы КТМ и достичь хорошего соответствия расчетного значения распределения полоидального магнитного поля и измеряемого.

Заместитель директора по  
материаловедческим исследованиям

Е.Т. Коянбаев

Главный инженер, PhD

А.Г. Коровиков

Ученый секретарь, PhD

Л.А. Ерыгина

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Акт внедрения системы визуализации плазмы

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель директора  
Филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК



 В.В. Бакланов

«03» 06 2019 г.

АКТ

№ 14.880-01/99044 от: 03.06.2019г.

о внедрении результатов диссертационной работы Чектыбаева Б.Ж. «Развитие методов диагностики процессов в плазме и на поверхности первой стенки установки токамак» в Филиале «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК

Мы, ниже подписавшиеся, представители Филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК, заместитель директора по материаловедческим исследованиям Коянбаев Е.Т., главный инженер, PhD Коровиков А.Г. и ученый секретарь, PhD Ерыгина Л.А. составили настоящий акт о том, что в рамках выполнения диссертационной работы по теме «Развитие методов диагностики процессов в плазме и на поверхности первой стенки установки токамак» Чектыбаевым Б.Ж. была разработана и внедрена в состав диагностического комплекса токамака КТМ система визуализации плазмы. Система позволила значительно повысить эффективность проведения исследований на токамаке КТМ, является одной из основных диагностик и постоянно используется на установке при проведении экспериментов.

Заместитель директора по  
материаловедческим исследованиям



Е.Т. Коянбаев

Главный инженер, PhD



А.Г. Коровиков

Ученый секретарь, PhD



Л.А. Ерыгина

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Акт внедрения диагностики ИК визуализации

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель директора  
Филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК



В.В. Бакланов

«07» 06 2019 г.

### АКТ

№ 17-280-0111026-ВН от 07.06.2019.

о внедрении результатов диссертационной работы Чектыбаева Б.Ж. «Развитие методов диагностики процессов в плазме и на поверхности первой стенки установки токамак» в Филиале «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК

Мы, ниже подписавшиеся, представители Филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК, заместитель директора по материаловедческим исследованиям Коянбаев Е.Т., главный инженер, PhD Коровиков А.Г. и ученый секретарь, PhD Ерыгина Л.А. составили настоящий акт о том, что в рамках выполнения диссертационной работы по теме «Развитие методов диагностики процессов в плазме и на поверхности первой стенки установки токамак» Чектыбаевым Б.Ж. была разработана и внедрена в состав диагностического комплекса токамака КТМ диагностика ИК визуализации. Результаты работы являются актуальными и представляют большой практический интерес. Диагностика ИК визуализации будет использоваться для тепловизионных наблюдений за температурой нагрева поверхности исследуемых кандидатных материалов первой стенки будущих термоядерных реакторов под воздействием потоков высокотемпературной плазмы на материаловедческом токамаке КТМ.

Заместитель директора по  
материаловедческим исследованиям

Е.Т. Коянбаев

Главный инженер, PhD

А.Г. Коровиков

Ученый секретарь, PhD

Л.А. Ерыгина