

## АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности  
6D072300 – «Техническая физика»

**Чектыбаева Бауржана Жамбуловича**

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

В диссертационной работе представлены результаты разработки диагностических систем, предназначенных для наблюдения за плазмой, измерения температуры на поверхности исследуемых материалов, измерения конфигурации нуля магнитного поля на токамаке КТМ, а также результаты экспериментальных исследований с их использованием.

**Актуальность темы.** В Республике Казахстан завершается создание токамака КТМ – установки тороидального типа для исследований взаимодействия высокотемпературной плазмы с материалами первой стенки для будущих экспериментальных и промышленных установок термоядерного синтеза. 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 (у классических токамаков  $A>3$ , у сферических  $A<2$ ), 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 термоядерных реакторов (ТЯР), является актуальной задачей. 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 новых устройств.

Первые экспериментальные работы на токамаке КТМ выявили ряд особенностей конструктивных особенностей установки. 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 в вакуумной камере вихревых токов и, соответственно, к неточности расчета конфигурации нуля поля в вакуумной камере КТМ. К тому же в токамаке КТМ в силу проектных ограничений на электромагнитную систему и источники питания возможно получить лишь относительно небольшое значение напряженности электрического поля на обходе не превышающее 1,6 В/м. Это вместе с относительно не высоким значением тороидального магнитного поля равным 1 Тл накладывает ограничения на величину рассеянных полоидальных магнитных полей и размер области с так называемым нулем поля необходимой для достижения лавинного омического пробоя. Поэтому это место наиболее чувствительно к неточности моделирования. 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, проведение работ по прямому измерению распределения поля вблизи его нулевого значения внутри вакуумной камеры КТМ и верификация расчетных кодов являлось актуальной задачей.

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. 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 конструкции вакуумной камеры токамака КТМ имеются длинные экваториальных патрубков, значительно ограничивающих визуальное наблюдение за плазменным шнуром. В связи с этим требовалось использование технического решения, позволяющего преодолеть проблему длинных патрубков.

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 МВт/м<sup>2</sup>) 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.

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 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 таковой для абсолютно черного тела, а также при его заранее известном значении (на токамаках, например, при измерении температуры графита, установленного в качестве материала первой стенки, поскольку его излучательная способность близка к 1). Использование металлической первой стенки приводит к проблеме точности определения температуры ее поверхности при измерении методами оптической ИК термометрии. Это связано с тем, что металлы не являются «черными» телами, имеют малую излучательную способность, и зачастую она имеет зависимость от температуры. 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 переосаждением на поверхности атомов, а также пылевых частиц из других частей разрядной камеры, например, 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 двухцветный пирометр, использующий принцип пирорефлектометрии. Разработка данного метода 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 актуальной.

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 этой 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 решались следующие задачи:

- разработка способа прямого точного измерения конфигурации нуля магнитного поля в вакуумной камере КТМ;
- измерение конфигурации нуля поля на токамаке КТМ;
- верификация на основе полученных экспериментальных данных численных кодов расчета распределения полоидальных магнитных полей внутри вакуумной камеры КТМ;
- разработка системы видеонаблюдения за плазмой КТМ;
- исследование формирования плазменного шнура с использованием системы видеонаблюдения плазмы токамака КТМ;
- разработка диагностики ИК визуализации для наблюдения за распределением температуры на поверхности исследуемых материалов на токамаке КТМ;
- разработка способа, позволяющего повысить точность термографических измерений на токамаке КТМ материалов, выполненных из металла.

#### **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.
- Для токамака КТМ разработана эндоскопическая система наблюдения за плазмой в видимом диапазоне.
- 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, основанный на использовании тепловизионной камеры, а также внешней инфракрасной подсветки для контроля изменения степени черноты.

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

- Разработанный способ прямого измерения конфигурации нуля поля позволил провести верификацию расчетных кодов. Полученные результаты

измерений были использованы для уточнения модели электромагнитной системы КТМ, что в свою очередь повысило точность проводимых расчетов. Способ применим на других установках управляемого термоядерного синтеза (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.

Результаты диссертационной работы, внедренные на токамаке КТМ, представлены в Приложении 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.

**Связь темы диссертационной работы с планами научно-исследовательских программ.**

Диссертационная работа выполнялась 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 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)

Положения диссертации были доложены на заседании кафедры «Физики плазмы» НИЯУ МИФИ, а также на НТС НЯЦ РК.

Кроме того, основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика» и на НТС ГУ им. Шакарима г. Семей.

**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 – 3, 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, библиография из 95 наименований, 3 приложения.