

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-96-100>

УДК 533.9.08; 621.039.66

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ КТМ

А. Ж. Дуйсен^{1*}, Б. Ж. Чектыбаев^{1,2}, Е. А. Кашикбаев^{1,2}, А. А. Жаксыбаева¹

¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатова, Казахстан

²⁾ Университет имени Шакарима города Семей, Казахстан

* E-mail для контактов: duysen@nnc.kz

В данной работе показаны результаты измерений радиационных потерь плазмы на токамаке КТМ, полученные с использованием модифицированного обзорного пироэлектрического болометра. Представлены технические особенности и размещение диагностики радиационных потерь плазмы токамака КТМ. Продемонстрированы первые экспериментальные результаты, которые показали работоспособность диагностики в условиях КТМ. Произведен расчет полной мощности радиационных потерь плазмы в режиме омического нагрева с лимитерной конфигурацией.

Ключевые слова: плазма, токамак, КТМ, радиационные потери плазмы, болометр.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы удержания плазмы и исследования в области материаловедения для термоядерных реакторов на установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) остаются чрезвычайно актуальными. Выбор материалов первой стенки, обращенных к высокотемпературной плазме, является одной из необходимых критериев для поддержания УТС, так как напрямую влияет на качественные характеристики получаемой плазмы. Казахстанский материаловедческий токамак (КТМ) является первым в мире специализированным токамаком, предназначенным для получения высокотемпературной плазмы и проведения исследований перспективных материалов для первой стенки будущих термоядерных реакторов, который способен обеспечить тепловые потоки сравнимые с ИТЭР. КТМ на сегодняшний день является самым большим сферическим токамаком в мире из введенных в эксплуатацию, входит в десятку крупных токамаков мира и имеет следующие параметры: $R = 0.9$ м; $a = 0.45$ м; $A = 2$; $I_p = 750$ кА; $t = 5$ с [1].

Для обеспечения эффективной работы токамака как источника электрической энергии необходимо добиться ряда условий. Одно из которых увеличение полученной мощности от вкладываемой мощности в 10 раз. Интегральный баланс энергии в установке определяется уравнением:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P_{OH} - \frac{W}{\tau_E} - P_{rad}, \quad (1)$$

где W — запас энергии в плазме, P_{OH} — мощность омического нагрева, τ_E — энергетическое время жизни плазмы, P_{rad} — радиационные потери. Для определения энергетического времени жизни τ_E необходимо знать мощность радиационных потерь P_{rad} . Необходимость определения энергетического времени жизни τ_E обусловлена его присутствием в критерии Лоусона, при выполнении которого осуществляется реакция синтеза с положительным выходом энергии [2].

Радиационные потери плазмы — мощность электромагнитного излучения, возникающих при взаимодействии содержащихся в плазме частиц. Радиационные потери плазмы могут быть проблемой при эксплуатации токамака, поскольку они вызывают уменьшение температуры плазмы и снижают эффективность обеспечения условий для термоядерного синтеза.

Измерения радиационных потерь плазмы позволяют изучать поведение примесей, механизм их поступления и динамику движения в плазме. Важность измерения мощности радиационных потерь обусловлена тем, что доля уносимой энергии может достигать 80% от всей вкладываемой мощности

В настоящей работе мы приводим результаты работ по исследованию радиационных потерь плазмы на токамаке КТМ с использованием модифицированного пироэлектрического болометра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Диагностический комплекс для измерения полных радиационных потерь, разработанный для токамака КТМ, использует пироэлектрический болометр. Чувствительным элементом (ЧЭ) соответственно является пироэлектрический кристалл [3].

Ранее на токамаке КТМ в качестве чувствительного элемента пироэлектрического болометра использовался кристалл ниобата лития (см. рисунок 1а), выполненного в виде диска диаметром 10 мм и толщиной 1 мм. ЧЭ размещался между двух медных электродов и зажимался при помощи закручиваемой крышки (диафрагмы). При такой конструкции основной недостаток заключался в большой вероятности разрушения чувствительного элемента при его установке и зажатии в корпусе болометра. Также проводники, контактирующие с ЧЭ, подвергались воздействию вибрации во время экспериментальных разрядов, что приводило к ухудшению контакта и увеличению шума.

На рисунке 1 приведено изображение элементов пироболометра до модернизации.



а) внешний вид детектора



б) детектор, установленный в корпус диагностики



в) болометр в сборе

Рисунок 1. Обзорный болометр до модернизации

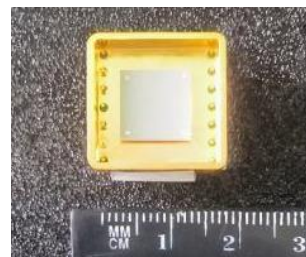
На рисунке 2 показан болометр с новым пироэлектрическим детектором. Кристалл имеет размеры 10×10 мм и толщину 50 мкм, с толщиной электродного слоя 5 мкм. Кристалл поставляется с завода установленным в корпус ТО-14, имеющим выходные контакты. Данное исполнение позволило улучшить соотношения сигнал/шум во время экспериментальных разрядов благодаря виброустойчивости и надежному контакту ЧЭ с корпусом.

Использование нового детектора также позволило повысить чувствительность диагностики к излучению плазмы и улучшить эксплуатационные характеристики. После сбора диагностики с новым детектором была проведена его настройка и калибровка, после чего произведена установка на штатное место на ВК КТМ.

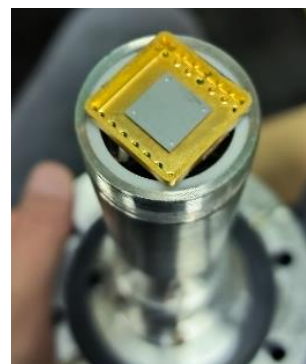
Пироэлектрический болометр крепится на фланце сектора № 8 экваториального патрубка вакуумной камеры (ВК) токамака КТМ и имеет углы обзора в тороидальном сечении – 6° , в полоидальном сечении – 39° (см. рисунок 3).

Корпус пироэлектрического болометра изготовлен из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, для уменьшения влияния электромагнитных наводок. В качестве усилителя сигнала выбран фемтоамперный операционный усилитель LMC6001, так как ток ЧЭ нахо-

дится в пикоамперном диапазоне, что приводит к необходимости использования прецизионных усилителей с очень низким током утечки и большим коэффициентом усиления.

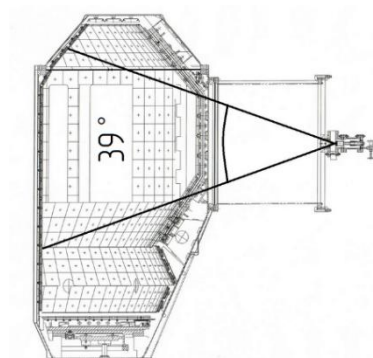


а) внешний вид нового детектора

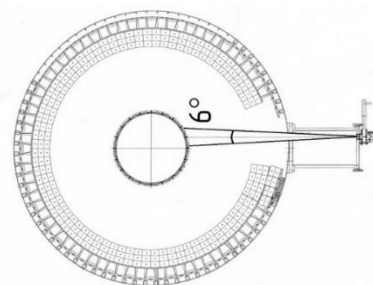


б) детектор, установленный в корпус диагностики

Рисунок 2. Болометр в сборе с новым пироэлектрическим детектором



а) полоидальное сечение



б) тороидальное сечение

Рисунок 3. Хорда регистрации излучения пироэлектрического болометра

Калибровка пирозлектрического болометра

Для определения чувствительности болометра была произведена калибровка в лабораторных условиях. Для калибровки пирозлектрического болометра используются осциллограф, автоматизированный оптический затвор модели LS2S2ZM1-EC-105 и контроллер VCM-D1 для управления шторкой затвора, оптический лазер с длиной волны 650 нм и измеритель мощности Sanwa LP1. На рисунке 4 приведена принципиальная схема калибровки пирозлектрического болометра.



Рисунок 4. Принципиальная схема калибровки пирозлектрического болометра

С оптического лазера подается излучение на пирозлектрический болометр, который подсоединен к источнику питания и осциллографу. Для определения времени компенсации и времени нарастания необходим импульсный сигнал. Поэтому используется автоматизированный оптический затвор. Контроллеру оптического затвора подается импульсный сигнал с помощью генератора частотой 10 Гц, с рабочим циклом в 30, 40, 50% (мс) и амплитудой 5 В, необходимый для управления шторкой затвора.

Изначально определяется мощность лазера с помощью измерителя мощности, далее выходной сигнал пироболометра регистрируется осциллографом. По измеренным величинам мощности лазера и сигнала с болометра, рассчитывается нормировочный коэффициент по формуле 2:

$$k = \frac{U_{out}}{P}, \quad (2)$$

где U_{out} – выходное напряжение, 50 мВ; P – мощность излучения оптического лазера, 1,84 мВт; k – нормировочный коэффициент, 27 В/Вт.

Для увеличения точности измерений и уменьшения погрешности при определении нормировочного коэффициента требуется проведение нескольких измерений. В связи с этим измерения проводились с разной длительностью лазерного излучения 30, 40, 50 мс.

На графике 5 показано время работы оптического затвора, а также выходное напряжение, регистрируемое пирозлектрическим болометром. Спад напряжения на графике связан с физическими свойствами и принципом работы пирозлектрического кристалла. При регистрации излучения пирозлектрический детектор генерирует заряд. Далее заряд, проходя через

схему усиления, проявляется как напряжение. Из-за высокого сопротивления материала кристалла с течением времени накопленный заряд разряжается. Это приводит к постепенному спаду напряжения.

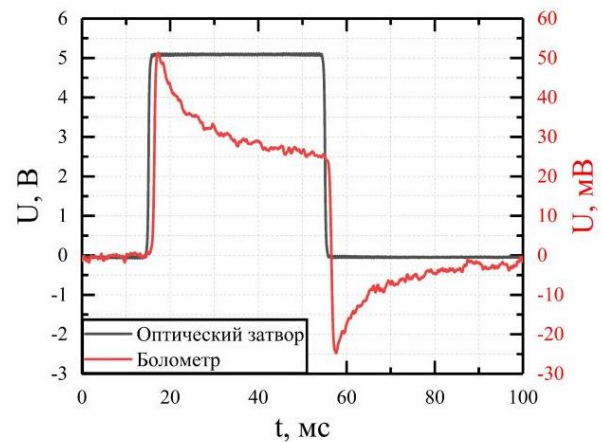


Рисунок 5. График регистрации излучения лазера

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

По итогам проведения экспериментальной кампании на токамаке КТМ по получению плазменных разрядов в режиме омического нагрева с лимитерной конфигурацией, были получены разряды с током плазмы 500 кА и длительностью 1,5 с. Для измерения полных радиационных потерь плазмы использовался модифицированный пирозлектрический болометр.

Для анализа был выбран один из успешных разрядов с $I_p = 500$ кА и длительностью 1,4 с – № 5121. В качестве рабочего газа использовался водород, разряд осуществлялся при постоянном статическом напуске газа с потоком, обеспечивающим начальное давление рабочего газа в вакуумной камере во время пробоя на уровне $1,8 \cdot 10^{-5}$ Торр [4]. Мощность омического нагрева для осуществления и поддержания УТС показана на рисунке 6д и определялась на основе данных с датчиков напряжения обхода и тока плазмы.

На рисунке 6 приведены сопоставления данных пирозлектрического болометра с данными электромагнитных диагностик (ток плазмы (6б), напряжение на обходе тора (6в)) и оптических диагностик (излучение линий $\text{H}\alpha$ (6е), СИИ (6з) и Hard X-ray (6и)), полученные во время плазменного разряда. Для вычисления полных радиационных потерь плазмы используется алгоритм, который учитывает расстояние от болометра к плазме, большой радиус плазмы, углы обзора болометра

Типичный регистрируемый сигнал пирозлектрического болометра приведен на рисунке 6а. Рисунок 6б иллюстрирует эволюцию тока плазмы. Пик на начальной стадии графика 6е связан с выбросом энергии при пробое рабочего газа (Н). В моменты времени $t = 2,3-2,5$ с сигнал на выходе с пирозлектрического болометра коррелируется с данными излучения линии углерода СИИ (рис. 6ж) и водорода $\text{H}\alpha$ (рис. 6з).

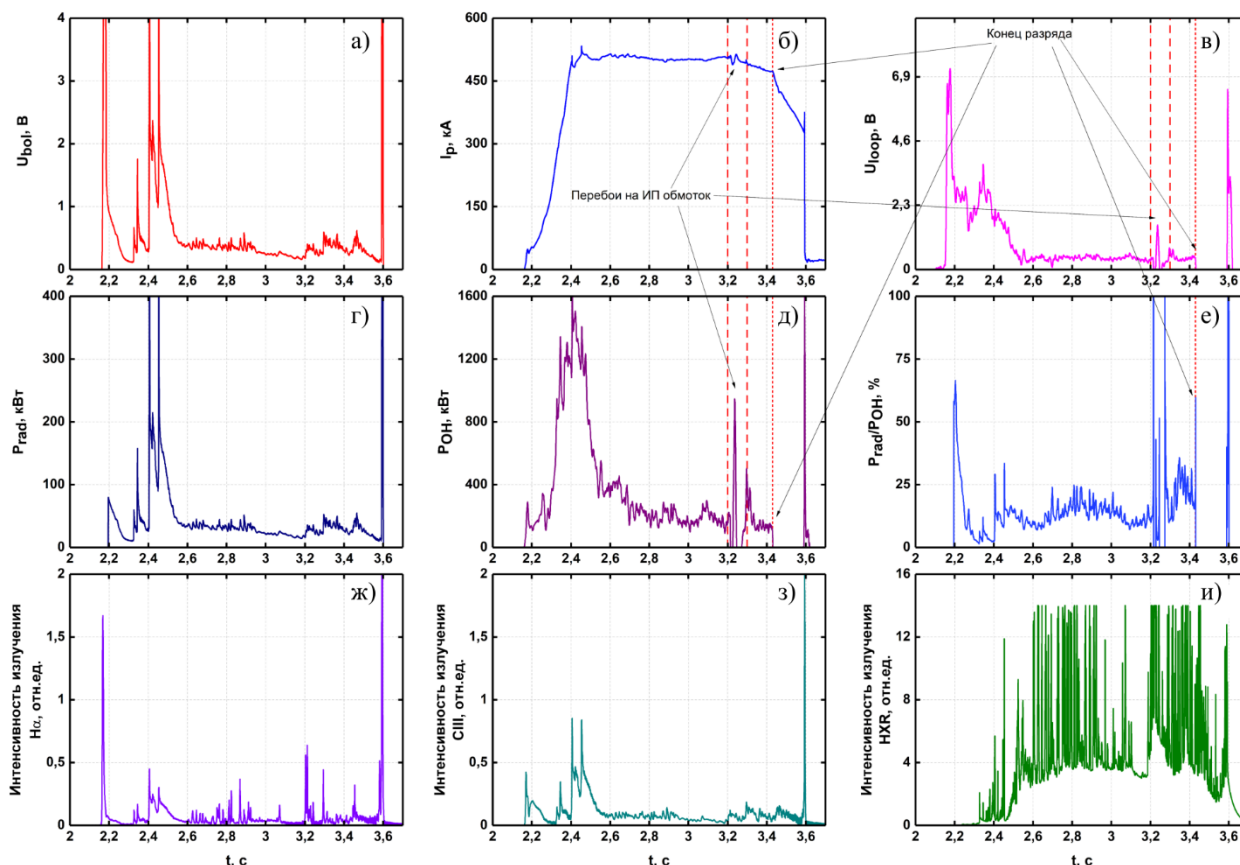


Рисунок 6. Набор сигналов диагностик токамака КТМ, разряд №5121

Всплески на графиках излучения были вызваны малыми срывами, при столкновении плазмы с первой стенкой вакуумной камеры в момент вывода тока плазмы на плато. Всплески на графиках датчика напряжения обхода (6в) и пояса Роговского (6б) в момент времени $t = 3,2\text{--}3,3$ с связаны с перебоями на внешних источниках электроснабжения.

Рисунок 6и демонстрирует жесткое рентгеновское излучение, возникающее при тормозном излучении плазмы из-за взаимодействия плазменного шнура со стенкой и последующим выходом графитовой пыли со стенок камеры [4]. Данное излучение связано с типом удержания плазмы, где в качестве лимитера выступает первая стенка вакуумной камеры.

К концу разряда, мощность радиационных потерь плазмы резко возрастает и большая часть запасенной в плазме энергии, излучается на стенку разрядной камеры. Мощность радиационных потерь на плато тока плазмы была на уровне 50 кВт и составила 10–30% от мощности омического нагрева (см. рисунок 6е). В ходе анализа разряда определено, что основным каналом радиационных потерь плазмы является излучение примесей углерода, возникающих при взаимодействии плазмы со стенками вакуумной камеры, выполненными из графита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проведены работы по калибровке пирозлектрического болометра. Во время калибровки определены основные технические характеристики пирозлектрического болометра, такие как время быстрого действия 1 мс и коэффициент чувствительности $k = 27$ В/Вт. Получены экспериментальные данные, которые показали работоспособность диагностики в условиях токамака КТМ.

Проведен анализ зависимостей радиационных потерь плазмы, где определено, что на данный момент в плазменных разрядах мощность радиационных потерь плазмы зависит от поступления примесей углерода, налетающих со стенок вакуумной камеры, при взаимодействии плазмы с первой стенкой. Мощность радиационных потерь плазмы для плазменных разрядов, проводимых на токамаке КТМ, варьируется в пределах 10–30% от омической мощности. Для уменьшения радиационных потерь плазмы необходимо увеличить зазор между плазмой и первой стенкой вакуумной камеры. Также нанесение боруглеродных покрытий (процесс боронизации) на первую стенку увеличит качество и количество успешных плазменных разрядов и уменьшит мощность радиационных потерь плазмы.

Благодарность

Работа выполнена в рамках научно-технической программы BR23891779 «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ» программно-целевого финансирования Министерства энергетики Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. <http://tokamak.info/> / All-the-Worlds-Tokamaks
2. Shimada M. Progress in the ITER Physics Basis / M. Shimada, D.J. Campbell, V. Mukhovatov // Nuclear Fusion. – 2007. – Т. 47. – Р. S1–S17.
3. Шаповалов Г.В., Чектыбаев Б.Ж., Маусымбаев С.С., Купишев Е.Б., Сарычев Д.В. Диагностика радиацион-

ных потерь плазмы для физического пуска токамака КТМ на основе пьезоэлектрического детектора // Вестник НЯЦ. – 2016. – Вып. 4. – С. 124–129.

- [Shapovalov G.V., Chektybaev B.Zh., Mausymbaev S.S., Kupishev E.B., Sarychev D.V. Diagnostic of plasma radiation for start-up in tokamak KTM based pyroelectric sensor // NNC RK Bulletin. – 2016. – Issue 4(68). – P. 124–129.]
4. B. Chektybaev, S. Zhunisbek, I. Tazhibayeva, D. Olkhovik, E. Batyrbekov, D. Zarva, A. Korovikov, A. Lee, V. Pavlov, E. Kashikbayev, A. Zhaksybayeva, A. Duisen. Overview of the first experiments at KTM tokamak to obtain plasma discharges // Fusion Engineering and Design. – 2023. – Vol. 194. – P. 113847. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113847>

КТМ ТОКАМАКТАҒЫ ПЛАЗМАНЫҢ РАДИАЦИЯЛЫҚ ЖОҒАЛТУЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

А. Ж. Дүйсен^{1*}, Б. Ж. Чектыбаев^{1,2}, Е. А. Кашикбаев^{1,2}, А. А. Жаксыбаева¹

¹⁾ ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

²⁾ Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Семей, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: duysen@nnc.kz

Бұл жұмыста шолу пьезоэлектрлік болометр көмегімен алынған КТМ токамактағы плазманың радиациялық шығынын өлшеу нәтижелері көрсетілген. КТМ токамак плазмасының радиациялық шығындарының диагностикасының техникалық ерекшеліктері мен орналасуы көрсетілген. Алғашқы эксперименттік нәтижелер көрсетілді, диагностиканың КТМ жағдайында өнімділігін көрсетті. Шектеу конфигурациясы бар омдық қыздыру режимінде плазмалық сәулелену шығынының жалпы қуаты есептелді.

Түйін сөздер: плазма, токамак, КТМ, плазманың радиациялық шығыны, болометр.

STUDY OF PLASMA RADIATION LOSSES IN THE KTM TOKAMAK

A. Zh. Duysen^{1*}, B. Zh. Chektybaev^{1,2}, E. A. Kashikbaev^{1,2}, A. A. Zhaksybaeva¹

¹⁾ Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾ University named after Shakarim of Semey, Semey, Kazakhstan

* E-mail for contacts: duysen@nnc.kz

This paper presents the results of plasma radiation loss measurements in the KTM tokamak obtained using a survey pyroelectric bolometer. The technical features and placement of the diagnostics of the KTM tokamak plasma radiation losses are presented. The first experimental results are demonstrated, which showed the operability of the diagnostics under KTM conditions. The total power of plasma radiation losses is calculated in the ohmic heating mode with a limiter configuration.

Keywords: plasma, tokamak, KTM, plasma radiation losses, bolometer.