

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-1-5-13>

УДК 533.9.08; 621.039.665

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРНОЙ ОБЛАСТИ ТОКАМАКА КТМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИК-ТЕРМОМЕТРИИ

А. Ж. Дүйсен<sup>1\*</sup>, Б. Ж. Чектыбаев<sup>1,2</sup>, Е. А. Кашикбаев<sup>1,2</sup>, С. С. Хамитов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

<sup>2</sup> НАО «Шакарим университет», Семей, Казахстан

\* E-mail для контактов: duysen@nnc.kz

В работе представлены результаты первых измерений температуры нагрева поверхности первой стенки и диверторной области вакуумной камеры на токамаке КТМ с использованием бесконтактных методов во время плазменных разрядов, технические особенности и размещение используемых ИК-диагностик токамака КТМ. Продемонстрированы первые экспериментальные результаты измерения температуры нагрева графитовых элементов первой стенки КТМ.

**Ключевые слова:** плазма, токамак, КТМ, графит, ИК излучение, температура, первая стенка.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых задач на пути к созданию будущих термоядерных реакторов является выбор материалов, способных выдерживать экстремальные условия внутри реактора. В частности, материалы первой стенки вакуумной камеры подвергаются тепловым нагрузкам от высокотемпературной плазмы, которые могут достигать нескольких десятков МВт/м<sup>2</sup>. Такие нагрузки распределены неравномерно и создают серьезную угрозу для целостности конструкции, что делает задачу испытания и выбора перспективных материалов крайне актуальной.

Для решения этой задачи в Казахстане создан Токамак КТМ – среднеразмерная электрофизическая установка, предназначенная для изучения физики плазмы и проведения материаловедческих исследований [1, 2]. Она позволяет воспроизводить тепловые нагрузки на образцы материалов до 20 МВт/м<sup>2</sup>, имитируя условия будущих реакторов.

В 2019 году на токамаке КТМ был проведен второй этап физического пуска, положивший начало масштабной программе подготовительных работ, необходимых для запуска полноценных материаловедческих исследований на установке [3]. В их числе получение оптимальных параметров плазменных разрядов, наладка системы дополнительного нагрева плазмы, отладка системы управления плазмой и настройка диагностического оборудования, необходимого для контроля и измерения параметров плазмы, а также для изучения воздействия высокотемпературной плазмы на материалы первой стенки [4, 5].

В данной работе представлены первые экспериментальные результаты измерения температуры нагрева элементов первой стенки и диверторной области вакуумной камеры токамака КТМ методами бесконтактной ИК-термометрии.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Для измерения температуры поверхности исследуемых материалов под воздействием удельного

теплого потока плазмы до 20 МВт/м<sup>2</sup> на токамаке КТМ предусмотрено использование бесконтактных методов измерения температуры, принцип работы которых основан на измерении мощности инфракрасного излучения, испускаемого нагретой поверхностью исследуемого объекта [6].

Контроль температуры различных участков внутренней поверхности вакуумной камеры осуществляется с использованием соответствующих специализированных приборов. Для мониторинга распределения температуры в двумерном пространстве на КТМ предусмотрена тепловизионная камера FLIR A655SC [7, 8]. Для точечных измерений температуры предназначены яркостный пирометр Metis M318 и двухцветный пирометр Metis M322, производства компании Sensortherm. Их ключевое отличие от тепловизионной камеры состоит в том, что они измеряют температуру в локальной точечной области.

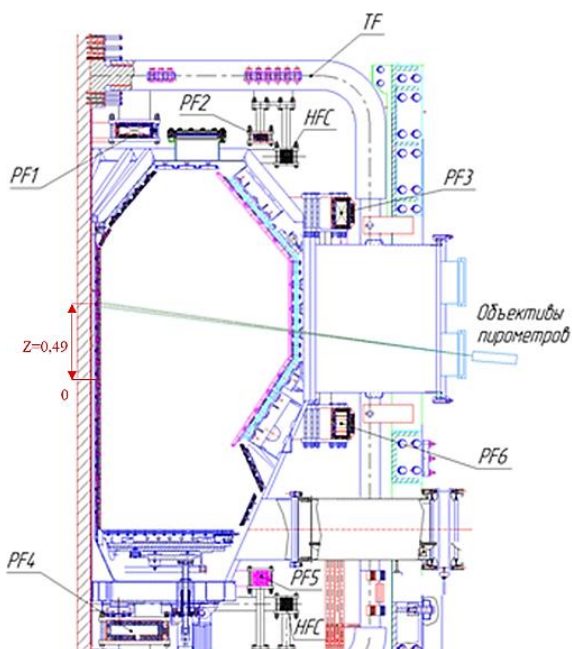
Тепловизионная камера построена на базе неохлаждаемых микроболометров и работает в дальнем инфракрасном диапазоне длин волн 7,5–14 мкм. Диапазон измеряемых температур составляет от –20 °С до 2000 °С, при этом максимальная частота регистрации достигает 200 Гц, что обеспечивает высокую временную разрешающую способность при наблюдении динамических тепловых процессов на поверхности первой стенки.

Пирометры Metis M318 (яркостный) и Metis M322 (двухцветный) используют в качестве чувствительного элемента арсенид галлия-индия (InGaAs) и функционируют в ближнем инфракрасном диапазоне. Для яркостного пирометра рабочий спектральный диапазон составляет 1,65–2,1 мкм, температурный диапазон – 150–1200 °С, а для двухцветного пирометра – два спектральных диапазона: 1,65–1,80 мкм и 1,45–1,65 мкм, с температурным диапазоном 350–1300 °С. Оба пирометра обладают высоким показателем визирования (900:1) и быстродействием порядка 1 мс, что позволяет проводить высокоточные измерения температуры быстро меняющихся поверхностей.

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРНОЙ ОБЛАСТИ ТОКАМАКА КТМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИК-ТЕРМОМЕТРИИ



а) место размещения



б) хорда наблюдения

Рисунок 1. Размещение объективов ИК пирометров на токамаке КТМ

В рамках проведения экспериментальной кампании на токамаке КТМ пирометры были установлены в экваториальном патрубке сектора № 18 вакуумной камеры с целью регистрации температуры поверхности графитовых тайлов центральной колонны (рисунок 1). Оба пирометра были сфокусированы в одну и ту же точку (рисунок 1-б), так как при формировании плазмы с лимитерной конфигурацией и её смещение к внутреннему обводу приводит к локальному повышению температуры в зоне контакта с графитовой поверхностью (рисунок 5-а). Наибольшее тепловое воздействие наблюдалось в верхней части внутреннего обвода, поэтому измерения проводились на

высоте  $Z = 0,49$  м. Материал смотрового окна, через которое производится наблюдение – плавленный кварц марки КУ-1. На рисунках 1-а, 1-б приведены схема размещения и фотографии объективов ИК пирометров, установленных на токамаке КТМ.

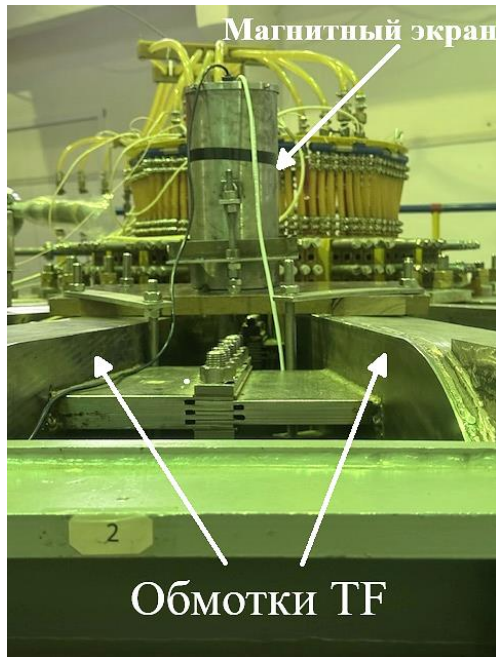
Тепловизионная камера была установлена в области вертикального трекового патрубка сектора № 2 и работала через смотровое окно, изготовленное из селенида цинка ( $ZnSe$ ). Выбор данного материала был обусловлен тем, что тепловизионная камера функционирует в дальнем инфракрасном диапазоне длин волн  $7,5-14$  мкм, в котором  $ZnSe$  обладает высокой спектральной прозрачностью (коэффициент пропускания  $\sim 0,65-0,7$ ). Для сравнения, плавленный кварц (КУ-1), применяемый для пирометров, прозрачен преимущественно в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях ( $0,2-3,5$  мкм) и полностью непрозрачен в дальнем ИК-диапазоне, что делает его непригодным для данной камеры. Аналогично, барий фтористый ( $BaF_2$ ) хоть и обладает широким диапазоном пропускания ( $0,2-11$  мкм), но имеет значительное поглощение в диапазоне длин волн выше  $\sim 11$  мкм, что ограничивает точность регистрации в верхней части рабочего спектра тепловизора. Кроме того,  $ZnSe$  отличается высокой химической стойкостью, что важно для условий эксплуатации вблизи вакуумной камеры токамака, где возможны перепады давления, температура и воздействие плазменных продуктов. Таким образом, использование  $ZnSe$  обеспечивает оптимальное сочетание спектральных и эксплуатационных характеристик для измерений в диапазоне  $7,5-14$  мкм.

Такое размещение ИК - камеры позволило производить наблюдения за диверторной областью. На рисунке 2 показаны фотография и схема размещения тепловизионной камеры на КТМ. Для защиты от сильных магнитных полей, генерируемых установкой во время работы, тепловизионная камера была размещена внутри магнитного экрана, изготовленного из стали марки Ст3 и вынесена за пределы катушек тороидального поля (TF).

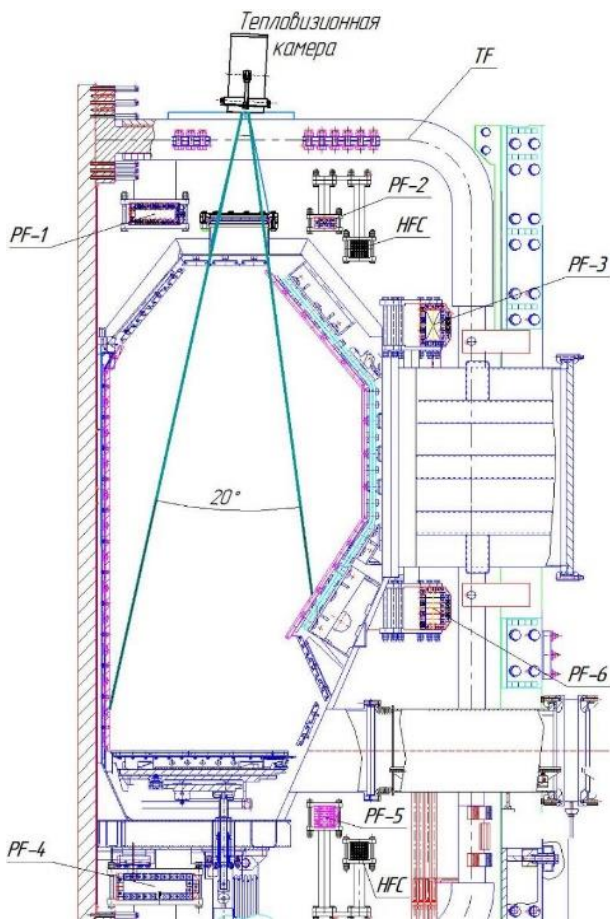
### ПОДГОТОВКА И НАСТРОЙКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Перед установкой и проведением измерений температуры нагрева первой стенки КТМ была выполнена подготовка и настройка диагностического оборудования. Суть настройки заключалась в предварительном определении коэффициента излучательной способности (степени черноты) графита в лабораторных условиях с воспроизведением геометрии реальных измерений и с учётом особенностей прохождения излучения через штатные смотровые окна. Схема регистрации температуры и использованное оборудование показаны на рисунке 3-а. В качестве эталонного измерителя температуры образца использовалась термопара типа ХА, а для управления нагревом – терморегулятор ТРМ.

**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРНОЙ ОБЛАСТИ ТОКАМАКА КТМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИК-ТЕРМОМЕТРИИ**

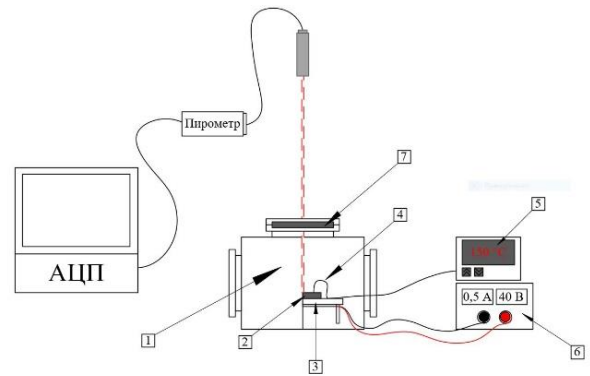


а) место размещения тепловизионной камеры



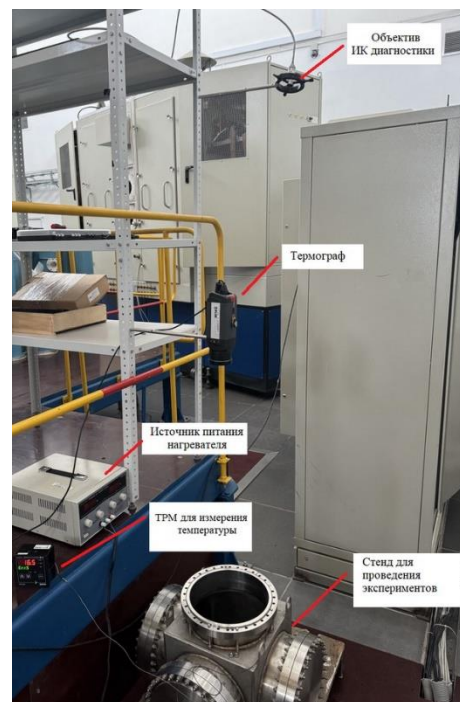
б) угол обзора

Рисунок 2. Размещение тепловизионной камеры на токамаке КТМ



1 – стенд, 2 – образец, 3 – нагреватель, 4 – термопара, 5 – терморегулятор, 6 – источник питания, 7 – смотровое окно)

а) схема настройки



б) фото стенда



в) графитовый образец

Рисунок 3. Настройка пирометров

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРНОЙ ОБЛАСТИ ТОКАМАКА КТМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИК-ТЕРМОМЕТРИИ

Нагреватель представлял собой пластину из нержавеющей стали толщиной 5 мм и размерами 60×80 мм, на внутренней поверхности которой был уложен кабель КНМСС, выполняющий функцию электрического нагревателя и выдерживающий температуры до 600 °С.

Для точной настройки пирометров объективы устанавливались на расстоянии 2,5 м, соответствующем рабочему положению в вакуумной камере токамака. В ходе тестов инфракрасные пирометры измеряли температуру графитового образца, нагретого до 400 °С, а полученные данные использовались для корректировки коэффициента излучательной способности с учётом показаний термопары. Максимальное отклонение от эталонного значения после настройки составило порядка  $\pm 2$  °С. Аналогичная процедура была проведена и для тепловизионной камеры.

Так как все измерения на КТМ проводятся через смотровые окна, на этапе настройки отдельно оценивалось влияние их спектральных характеристик на результаты. Смотровое окно из плавленого кварца марки КУ-1 обладает высокой спектральной прозрачностью в диапазоне длин волн  $\sim 0,2\text{--}3,5$  мкм, что полностью перекрывает рабочие спектральные области пирометров Metis M318 (одноканальный) и Metis M322 (двухцветный). Однако кварцевое стекло вносит небольшие потери излучения за счёт отражения на границах и частичного поглощения в объёме материала. Это было подтверждено в калибровочных экспериментах, проведённых как с установленным окном, так и без него: наличие окна приводило к снижению регистрируемой температуры на  $\pm 2$  °С. Для пирометра M322 это влияние минимально из-за метода измерения по отношению сигналов в двух спектральных диапазонах, компенсирующего равномерные потери пропускания. Для M318 снижение выражено сильнее, так как измерение зависит от

абсолютного уровня интенсивности прошедшего излучения. Полученная разница находится в пределах допустимой погрешности приборов. На рисунке 4 показана спектральная прозрачность КУ-1 и рабочие диапазоны пирометров, где видно, что коэффициент пропускания окна в этих областях составляет 0,9–0,92, что согласуется с зарегистрированным уменьшением температуры.

Эмиссионная способность (степень черноты) графитовых тайлов была учтена при настройке диагностического оборудования. Для калибровки использовались данные термопары, закреплённой на поверхности тайла, что позволило скорректировать коэффициенты излучательной способности для рабочих диапазонов пирометров и тепловизионной камеры. До настоящего времени на токамаках в качестве материала первой стенки применялся графит, обладающий высокой излучательной способностью — от 0,8 до 0,99 в зависимости от типа и марки, что близко к значению абсолютно чёрного тела и обеспечивает высокую точность измерения температуры методами ИК-термометрии. В связи с этим существенных проблем с корректностью температурных данных, как правило, не возникало. В отличие от графита, металлы имеют значительно более низкую степень черноты, которая, как правило, увеличивается с ростом температуры. [9]. Также при интерпретации результатов учитывалось, что в процессе эксплуатации эмиссионная способность поверхности графита может изменяться под воздействием плазмы, осаждения примесей и термических циклов. Эти изменения могут влиять на точность температурных измерений, поэтому калибровка проводилась с учетом реального состояния поверхности тайлов в конкретных экспериментах. Такой подход позволил минимизировать систематическую погрешность и обеспечить достоверность полученных температурных данных.

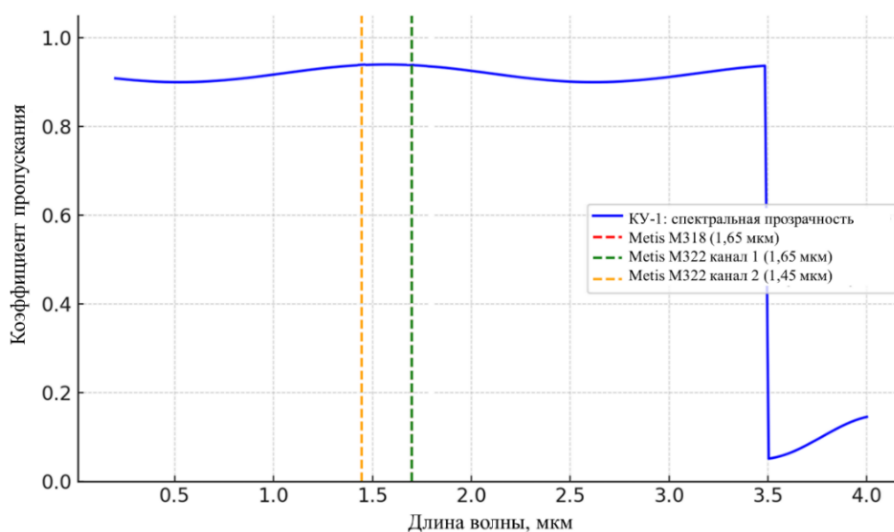


Рисунок 4. Спектральная прозрачность смотрового окна КУ-1

**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРНОЙ ОБЛАСТИ ТОКАМАКА КТМ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИК-ТЕРМОМЕТРИИ**

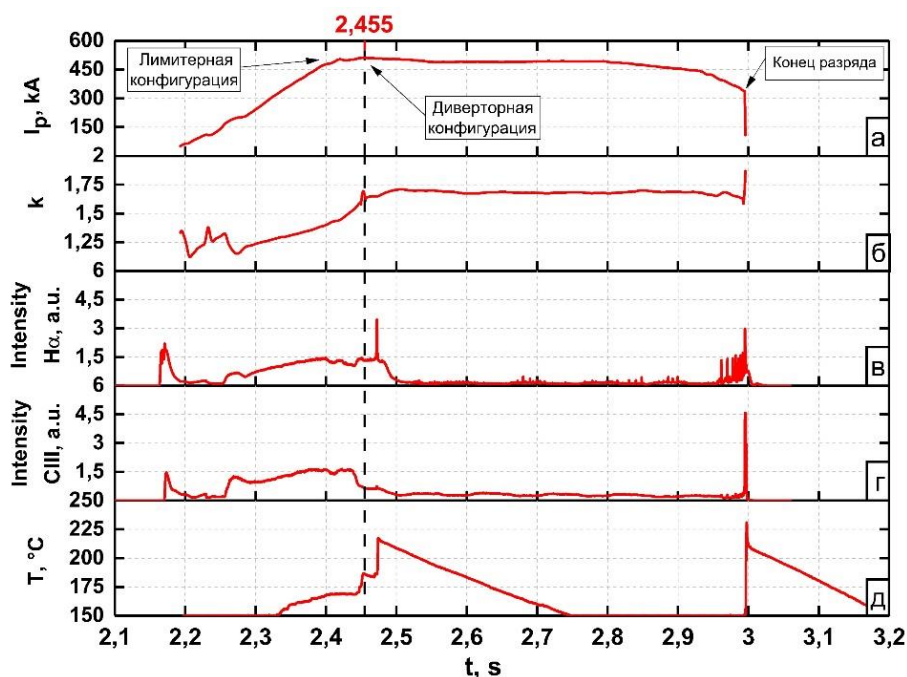


Рисунок 5. Эволюция параметров плазмы: ток плазмы (а), вертикальная вытянутость плазмы (б), интенсивность излучения линии  $H\alpha$  (в), интенсивность излучения линии  $CIII$  (г), температура графитовых тайлов в центральной колонне (е)

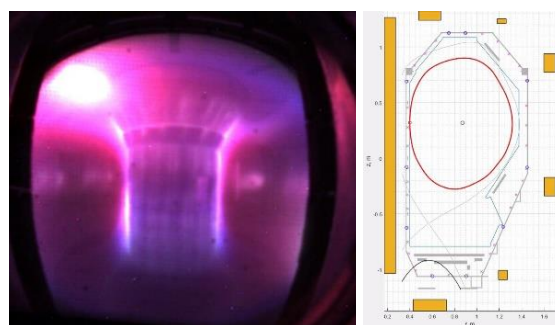
После завершения тестирования и настройки ИК-диагностик, оборудование установлено на штатные места. Полученные результаты позволили выявить ключевые параметры настройки ИК-диагностик (степень черноты, пропускная способность окон) и минимизировать неточности измерений. Эти испытания стали важным этапом подготовки диагностической системы к работе в условиях плазменных разрядов токамака КТМ, обеспечивая корректное измерение температуры исследуемых материалов.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ**

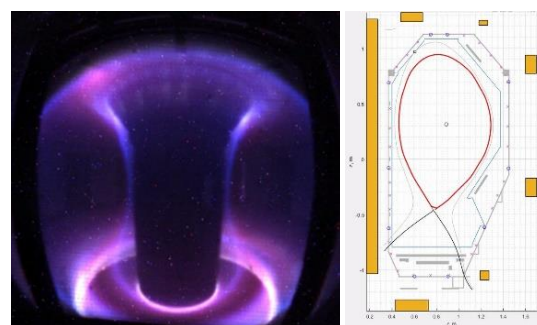
Измерение температуры графитовой поверхности ИК-диагностиками проводилось в рамках экспериментальной кампании, при получении плазменных разрядов с диверторной конфигурацией, током плазмы 500 кА и длительностью разряда около 1 с.

На рисунке 5 приведена эволюция параметров одного из характерных разрядов № 6303: ток плазмы, вытянутость плазмы по вертикали, интенсивность излучения линий водорода и углерода ( $H\alpha$  и  $CIII$ ), температура тайла центральной колонны, измеренная яркостным пирометром.

Следует отметить, что плазменный шнур на стадии роста тока имеет квазикруглую лимитерную конфигурацию (см. рисунок 4-а). На рисунке 6 приведены видеокادر и форма плазмы для двух временных точек, соответствующим лимитерной и диверторной конфигурациям плазмы. Как можно увидеть из рисунка 5-б, вытянутость шнура начинает плавно увеличиваться по достижению тока плазмы около 200 кА и достигает своего предельного значения равного 1,7 сразу после выхода тока плазмы на плато.



а) лимитерная конфигурация,  $t = 2330$  мс



б) диверторная конфигурация,  $t = 2625$  мс

Рисунок 6. Эволюция формы плазмы

На рисунках 5-в и 5-г показаны интенсивности излучения линий  $H\alpha$ ,  $CIII$ . Пик на начальной стадии графика на рисунке 4-в обусловлен ростом тока плазмы и ионизацией рабочего газа. Также с развитием плазмы наблюдается рост излучения линий  $H\alpha$  и  $CIII$  (рисунки 5-в, 5-г), что связано с взаимодей-

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРНОЙ ОБЛАСТИ ТОКАМАКА КТМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИК-ТЕРМОМЕТРИИ

ствием плазмы со стенкой на центральной колонне (внутреннем обводе) в лимитерной стадии разряда (рисунок 6-а).

Рост температуры графитовых тайлов (рисунок 5-д), расположенных на центральной колонне, в момент времени  $t = 2330$  мс, связан с воздействием плазмы на стенку в лимитерной стадии разряда. Более поздний отклик на графике температуры нагрева связан с порогом срабатывания яркостного пирометра Metis M318, который составляет  $150$  °С. Резкий подскок температуры перед спадом связан с возникновением неустойчивости с выбросом энергии на стенку камеры, что также видно на графике линии  $H\alpha$  (рисунок 5-в). Дальнейшее падение температуры поверхности тайла на центральной колонне объясняется отрывом плазмы от стенки и завершением формирования диверторной конфигурации. Характер спада температуры связан в большей степени с инерционностью остывания стенки, зависящим от теплоемкости и теплопроводности графита. Также в конце разряда фиксируется резкий подскок температуры центральной колонны в момент  $t = 2990$  мс, обусловленный развитием МГД неустойчивостей, прежде всего срывом плазмы и сопутствующим выбросом остаточной энергии на стенки камеры. Этот процесс сопровождается кратковременным, но интенсивным нагревом графитовых элементов первой стенки, что согласуется с характером теплового воздействия, наблюдаемого на других токамаках [10, 11]. Зафиксированные температурные всплески на графике можно интерпретировать как прямое следствие срыва плазмы и связанных с ним МГД-неустойчивостей, приводящих к мгновенной передаче значительной доли накопленной в плазме энергии на ограниченные участки внутренней поверхности вакуумной камеры.

В представленных результатах приведены данные только с яркостного пирометра. Это связано с тем, что в рассматриваемом разряде максимальная температура графитовой пластины, установленной на внутреннем обводе вакуумной камеры КТМ, составила около  $229$  °С, что ниже нижнего предела измерений двухцветного пирометра ( $350$  °С). Вследствие этого данные со второго прибора в данном случае отсутствуют.

Применение двух пирометров на токамаке КТМ, направленных в одну и ту же точку наблюдения, имеет важное преимущество: при температурах выше  $350$  °С появляется возможность сопоставлять показания приборов для повышения точности и верификации результатов. Дополнительным преимуществом двухцветного пирометра является его меньшая зависимость от коэффициента излучательной способности поверхности, так как в двух выбранных спектральных диапазонах этот коэффициент, как правило, одинаков. Это снижает влияние пылевых частиц, оптических потерь и изменения состояния поверхности (окисление, налёт) при взаимодействии

плазмы со стенкой. Данный тип пирометра особенно эффективен при наблюдении через смотровые окна, а также в условиях, когда возможны их загрязнения в процессе подготовки вакуумной камеры токамака КТМ с использованием тлеющего разряда.

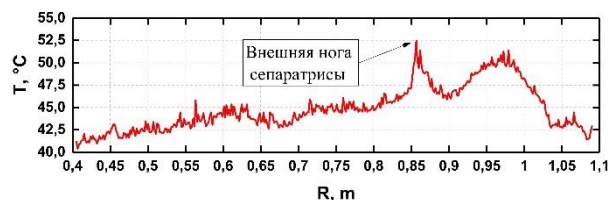
По результатам разряда наблюдается характерный инерционный спад температуры, как и в первой половине разряда после формирования диверторной конфигурации.

При диверторной конфигурации поток избыточного тепла и плазмы, а также часть примесей с основной области плазмы, вытесняются во внешний обдирочный слой (SOL), расположенный за последней замкнутой магнитной поверхностью (сепаратрисой). Вдоль сепаратрисы поток частиц направляется в область дивертора, что приводит к нагреву его поверхности.

На рисунке 7 приведен первый кадр с тепловизионной камеры проявления внешней «ноги» сепаратрисы с формированием характерного теплового следа на поверхности дивертора.



а) двумерное распределение температуры

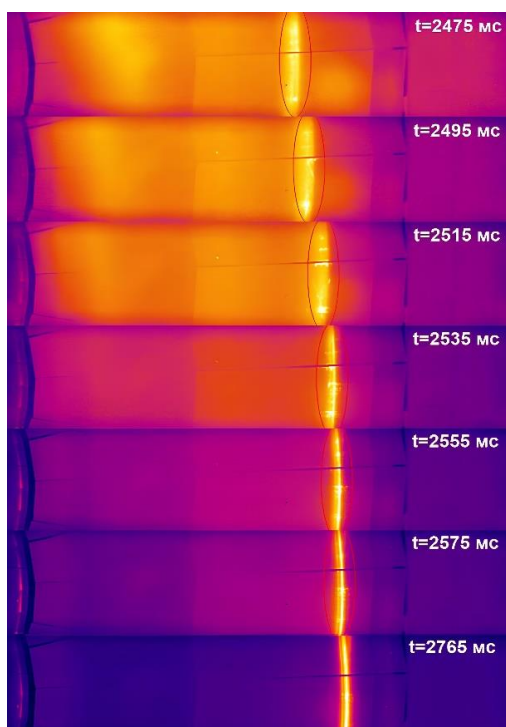


б) распределение температуры нагрева дивертора в радиальном направлении

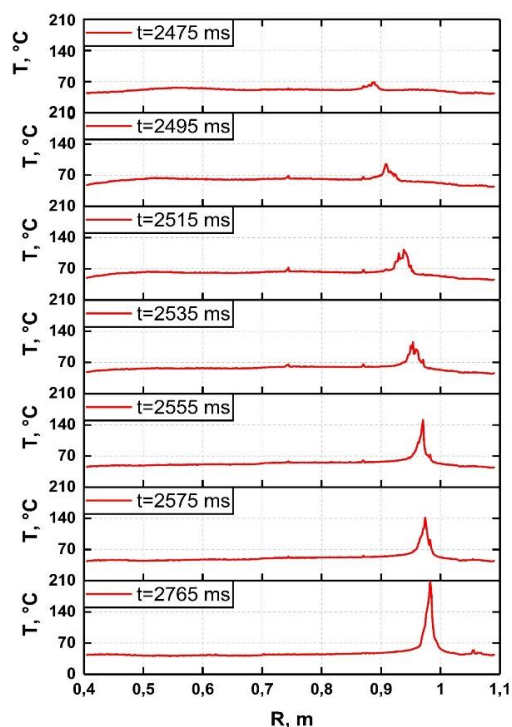
Рисунок 7. Первый кадр регистрации точки пересечения сепаратрисы плазмы в момент времени  $t = 2455$  мс

На рисунке 8-а приведен набор кадров тепловизионных измерений, характеризующих формирование внешней «ноги» сепаратрисы и эволюцию тепловой нагрузки плазмы на поверхности дивертора. Как можно увидеть наблюдается смещение точки контакта внешней ноги сепаратрисы в радиальном направлении. Также на изображении эволюции тепловых потоков, можно заметить тепловую полосу в нижней части центральной колонны вследствие воздействия внутренней «ноги» сепаратрисы плазмы. Тепловой след от внутренней ноги появляется в момент времени  $t = 2515$  мс. При этом можно заметить, что температура нагрева на внутреннем обводе гораздо меньше, чем на внешнем, что связано с известным распределением тепловых потоков на диверторе токамака в соотношении примерно 30/70.

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРНОЙ ОБЛАСТИ ТОКАМАКА КТМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИК-ТЕРМОМЕТРИИ



а) тепловизионный кадр дивертора



б) распределение температуры нагрева дивертора в радиальном направлении

Рисунок 8. Эволюция температуры нагрева поверхности дивертора, разряд № 6303

Также по данным с тепловизионной камеры можно увидеть, что относительная стабилизация положения внешней ноги сепаратрисы происходит в  $t \sim 2,6$  с. После этого температура нагрева достигла значения  $210^\circ\text{C}$ .

Описанная картина изменения температуры поверхности графитовой стенки характерна для всех разрядов в рассматриваемой кампании.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты первых измерений температуры нагрева поверхности первой стенки и диверторной области вакуумной камеры токамака КТМ с использованием бесконтактных инфракрасных методов во время плазменных разрядов.

Полученные данные показали, что температура графитовых тайлов центральной колонны в начальной стадии разряда связано с воздействием плазмы на поверхность в лимитерной конфигурации удержания. Формирование диверторной конфигурации было подтверждено тепловизионными измерениями, которые зафиксировали появление зон нагрева от внешней ноги сепаратрисы на поверхности диверторных пластин. Резкий скачок температуры центральной колонны и поверхности дивертора при срыве плазмы соответствует ожидаемому выбросу энергии.

Проведённая калибровка и настройка пирометров и тепловизионной камеры с учётом коэффициента излучательной способности графита ( $\varepsilon \approx 0,8-$

$0,99$ ) и спектральных свойств смотровых окон позволила минимизировать погрешности измерений. Максимальное отклонение температуры, вызванное неточностью настройки и влиянием смотрового окна, составило порядка  $\pm 2^\circ\text{C}$ , что соответствует допустимой точности используемых ИК-диагностик.

Полученные результаты демонстрируют, что комплекс ИК-диагностик токамака КТМ позволяет проводить точные измерения температур поверхности графитовых пластин первой стенки и диверторной области с минимальными погрешностями. Высокая эмиссионная способность графита способствует достоверному измерению температуры.

Таким образом, проведённые эксперименты подтвердили эффективность развернутой системы бесконтактных ИК-диагностик, которое подтверждает успешность внедрения бесконтактных методов измерения температуры и их применимость для дальнейшего изучения тепловых нагрузок на компоненты первой стенки и проведения материаловедческих исследований на установке КТМ.

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Агентства Республики Казахстан по атомной энергии (научно-техническая программа BR23891779 «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ»).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. E.A. Azizov, I. Tazhibayeva [et al.] Kazakhstan tokamak for material testing conceptual design and basis parameters // Fusion Eng. Des. – 2001. – Vol. 56–57. – P. 831–835.
2. I.L. Tazhibayeva [et al.] KTM experimental complex project status // Fusion Sci. Technol. – 2005. – Vol. 47. – P. 746–750.
3. B. Chektybayev [et al.] Study of breakdown and plasma formation in the KTM tokamak with the massive conductive vacuum chamber // Fusion Eng. Des. – 2021. – Vol. 163. – Art. 112167.
4. B. Chektybayev, I. Tazhibayeva, E. Bатырбеков, Ye. Kashikbayev, D. Olkhovik, D. Zarva, S. Zhunisbek, A. Duisen, A. Zhaksybayeva, A. Lee, V. Pavlov, V. Dokuka, R. Khayrutdinov. Improvement of plasma discharge performance at KTM tokamak // Fusion Engineering and Design. – 2024. – Vol. 208. – Art. 114684. – <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114684>
5. B. Chektybayev, S. Zhunisbek, I. Tazhibayeva, D. Olkhovik, E. Bатырбеков, 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. – Art. 113847. – <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113847>
6. Bатырбеков, Е., Чеқтыбаев, В., Садыев, А., Скаков, М., Кашикбаев, Е., Олховик, Д., & Жунисбек, С. Test Results of Active Thermography Method for Plasma-Wall Interaction Studies on the KTM Tokamak // Fusion Engineering and Design. – 2020. – Vol. 161. – Art. 112014. – <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112014>
7. Чеқтыбаев Б.Ж., Скаков М.К., Батырбеков Э.Г., Степанова О.А., Ермоленко М.В. Диагностика ИК-визуализации токамака КТМ для изучения воздействия плазмы на кандидатные материалы первой стенки // Вестник ГУ им. Шакарима. – 2018. – № 3. – С. 128–134. [Chektybaev B.Zh., Skakov M.K., Bатырбеков E.G., Stepanova O.A., Ermolenko M.V. Diagnostika IK-vizualizatsii tokamaka KTM dlya izucheniya vozdeystviya plazmy na kandidatnye materialy pervoy stenki // Vestnik GU im. Shakarima. – 2018. – No. 3. – P. 128–134. (In Russ.)]
8. Б.Ж. Чеқтыбаев, М.К. Скаков, А.А. Колодешников ИК диагностики токамака КТМ для изучения воздействия плазмы на кандидатные материалы первой стенки // Вестник Казахского национального инновационного технического университета им. К.И. Сатпаева. – 2017. – № 4 (122). – С. 488–499 (666). [IK diagnostiki tokamaka KTM dlya izucheniya vozdeystviya plazmy na kandidatnye materialy pervoy stenki / B.Zh. Chektybaev, M.K. Skakov, A.A. Kolodeshnikov // Vestnik Kazakhskogo natsional'nogo innovatsionnogo tekhnicheskogo universiteta im. K.I. Satpaeva. – 2017. – No. 4 (122). – P. 488–499 (666). (In Russ.)]
9. Чеқтыбаев Б. Ж. Развитие методов диагностики процессов в плазме и на поверхности первой стенки установки токамак: диссертация на соискание ученой степени доктора философии PhD: спец. 6D072300.: дис. – 2019. [Chektybaev B. Zh. Razvitie metodov diagnostiki protsessov v plazme i na poverkhnosti pervoy stenki ustanovki tokamak: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora filosofii PhD: spets. 6D072300.: dis. – 2019. (In Russ.)]
10. Yang, Z., Shu, S., Gan, K. [et al.] Calculation of the Heat Flux on the First Wall During Disruption on Tokamak // J. Fusion Energ. – 2017. – Vol. 36. – P. 15–20. – <https://doi.org/10.1007/s10894-016-0118-6>
11. P.C. de Vries, G. Aronoux, A. Huber [et al.], Plasma Phys. Control Fusion 12, 54 (2012).

КТМ ТОКАМАГЫНЫҢ БІРІНШІ ҚАБЫРҒАСЫ МЕН ДИВЕРТОРЛЫҚ АЙМАҒЫ БЕТТЕРІНІҢ ТЕМПЕРАТУРАСЫН ИНФРАҚЫЗЫЛ ТЕРМОМЕТРИЯ ӘДІСТЕРІ АРҚЫЛЫ ӨЛШЕУ

**А. Ж. Дүйсен<sup>1\*</sup>, Б. Ж. Чеқтыбаев<sup>1,2</sup>, Е. А. Кашикбаев<sup>1,2</sup>, С. С. Хамитов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

<sup>2</sup> «Шәкәрім университеті» КеАҚ, Семей, Қазақстан

\* Байланыс үшін E-mail: [duysen@nnc.kz](mailto:duysen@nnc.kz)

Жұмыста плазмалық разрядтар кезінде жанаспайтын әдістерді қолдана отырып, КТМ токамақта вакуумдық камера қабырғаларының қыздыру температурасының алғашқы өлшеулерінің нәтижелері берілген. КТМ токамақта қолданылатын ИК диагностикасының техникалық ерекшеліктері мен орналасуы көрсетілген. КТМ бірінші қабырғасының графит элементтерін қыздыру температурасын өлшеудің алғашқы тәжірибелік нәтижелері көрсетілген, бұл КТМ жағдайында диагностиканың жұмыс қабілеттілігін көрсетті.

**Түйін сөздер:** плазма, токамак, КТМ, графит, ИҚ сәулелену, температура, бірінші қабырға.

MEASUREMENT OF FIRST WALL AND DIVERTOR REGION SURFACE TEMPERATURES  
IN THE KTM TOKAMAK USING IR THERMOMETRY METHODS

**A. Zh. Duisen**<sup>1\*</sup>, B. Zh. Chektybayev<sup>1,2</sup>, Ye. A. Kashikbayev<sup>1,2</sup>, S. S. Khamitov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

<sup>2</sup> NP JSC "Shakarim University", Semey, Kazakhstan

\* E-mail for contacts: [duysen@nnc.kz](mailto:duysen@nnc.kz)

The paper presents the results of the first measurements of the heating temperature of the walls of the vacuum chamber on the KTM tokamak using non-contact methods during plasma discharges. The technical features and placement of the IR diagnostics used in the KTM tokamak are presented. The first experimental results of measuring the heating temperature of the graphite elements of the first wall of the KTM are demonstrated, which showed the operability of the diagnostics under KTM conditions.

**Keywords:** *plasma, tokamak, KTM, graphite, IR radiation, temperature, first wall.*