

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-129-136>

УДК 621.039.619; 621.384.8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ГРАФИТОВЫХ ТАЙЛОВ ТОКАМАКА КТМ

К. Женис*, Б. Ж. Чектыбаев, А. Т. Кусайнов, В. С. Полковников, Д. А. Ольховик

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: kulan@nnc.kz

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по исследованию газовой выделению графитовых тайлов токамака КТМ. Подробно описаны методика проведения эксперимента и конструкция экспериментального вакуумного стенда. Приведены зависимости газовой выделению из графитовых тайлов от времени в процессе их отжига до температуры 200 °С в режиме постоянной откачки высоковакуумным насосом, имитирующих условия отжига в ВК КТМ. Также в работе проведён масс-спектрометрический анализ состава вакуумной среды в вакуумной камере экспериментального стенда перед прогревом и после остывания вакуумной камеры (ВК). Представлен анализ экспериментальных данных и проведены оценки предельного остаточного давления в ВК КТМ.

Ключевые слова: токамак КТМ, вакуумный стенд, графитовые тайлы, масс-спектрометр, газовой выделение.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно ведутся работы по исследованию материалов первой стенки будущих термоядерных реакторов. Токамак КТМ предназначен для проведения испытания материалов первой стенки и дивертора будущих термоядерных реакторов под воздействием мощных тепловых потоков плазмы до 20 МВт/м² [1].

В установках типа токамак предъявляются высокие требования к уровню остаточного газа (вакуума) в ВК. Вакуумные условия (уровень примесей) в значительной степени влияют на формирование плазменного шнура и его дальнейшее развитие. Уровень остаточного давления в ВК должен быть не выше 10⁻⁷ Торр.

Объем вакуумной камеры КТМ составляет около 13 м³, площадь внутренней поверхности составляет около 32 м². Вакуумная камера изготовлена из нержавеющей стали. Почти вся внутренняя поверхность камеры около 90%, обращенная к плазме, облицована графитовыми тайлами, которые изготовлены из высокоплотного мелкозернистого графита марки FP-479.

Откачка ВК обеспечивается тремя турбомолекулярными насосами с эффективной скоростью около 2000 л/с [2].

На сегодняшний день остаточное давление в камере КТМ после отжига достигает значения ~5·10⁻⁷ Торр.

При этом из-за отсутствия данных по уровню газовой выделению графитовых тайлов в условиях КТМ не представлялось возможным дать качественную оценку по предельному остаточному давлению и дать ответ об уровне реального натекания в ВК воздуха с атмосферы, и соответственно в перспективе провести работы по модернизации системы вакуумирования для достижения лучших вакуумных условий.

В результате проведения работ была разработана методика определения газовой выделению графитовых тайлов КТМ, проведен масс-спектрометрический анализ выделяемого газового состава с тайлов и получены данные о их степени газовой выделению в условиях КТМ. Похожие исследования с применением масс-спектрометрического анализа в своё время проводились в других установках [3–4].

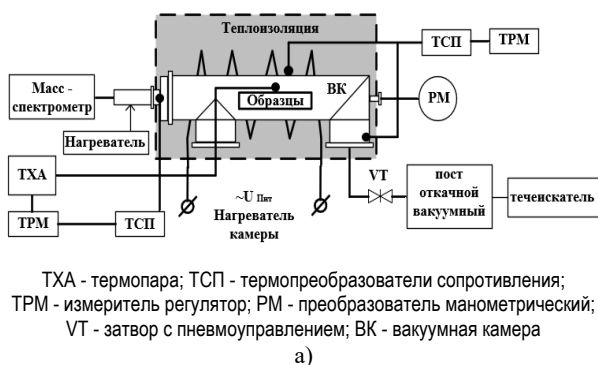
На основе полученных данных были проведены расчетные оценки предельно достижимого уровня остаточного давления в вакуумной камере КТМ. Проведен анализ и сделаны выводы о степени натекания воздуха с атмосферы в вакуумную камеру КТМ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ВАКУУМНЫЙ СТЕНД

Экспериментальные исследования газовой выделению из графитовых тайлов КТМ проводились на вакуумном стенде, что позволило имитировать технологическую подготовку ВК токамака к экспериментам. В качестве вакуумного стенда использовалась малогабаритная цилиндрическая вакуумная камера, оснащённая соответствующими фланцевыми соединениями, обеспечивающими возможность соединения форвакуумного насоса Varian Triscroll 300 Inverter и турбомолекулярного насоса Varian Turbo V-301, а также установки высоковакуумных датчиков и масс-спектрометра.

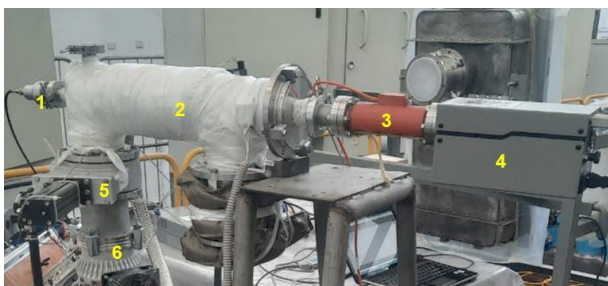
На рисунке 1 представлена принципиальная схема и общий вид экспериментальной установки.

Для обеспечения прогрева экспериментальной камеры применяется электрический нагреватель (ЭНГЛУ-400 1,27/220-4,1), расположенный на поверхности камеры. Камера обмотана негорючим теплоизоляционным материалом для минимизации потерь тепла. Напряжение, подаваемое на нагреватель, регулируется автотрансформатором ЛАТР-3КВА.



ТХА - термопара; ТСП - термопреобразователи сопротивления; ТРМ - измеритель регулятор; РМ - преобразователь манометрический; VT - затвор с пневмоуправлением; ВК - вакуумная камера

а)



1 - высоковакуумный датчик IMG100; 2 - вакуумная камера; 3 - нагревательный кожух O100HJR; 4 - масс-спектрометр RGA-100; 5 - затвор с пневмоуправлением; 6 - турбомолекулярный насос Turbo V-301

б)

Рисунок 1. Принципиальная схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки

Для контроля и измерения температуры стенок камеры применяются три термопреобразователя сопротивления ДТС014-РТ100.ВЗ.20/30 (ТСП), установленные с внешней стороны камеры. Один ТСП устанавливается в центре камеры, другие два ТСП устанавливаются в торцах камеры на фланцах. Измерение непосредственно температуры нагрева исследуемого образца (тайла) проводилось с помощью термопары типа ХА, заведённой внутрь камеры и прикреплённой непосредственно к исследуемому образцу. Контроль за остаточным давлением в вакуумной камере осуществляется с использованием двух вакуумных датчиков – форвакуумного термопарного ConvesToг и высоковакуумного магниторазрядного IMG-100. Для определения и анализа состава остаточных газов в камере используется масс-спектрометр RGA-100.

ИССЛЕДУЕМЫЙ ОБРАЗЕЦ

Для проведения исследования были взяты четыре графитовых тайла облицовки ВК КТМ. Тайлы изготовлены из графита марки FP-479 производства Schunk Kohlenstofftechnik GmbH, Германия. Данная марка графита имеет высокую плотность, хорошие теплопроводные свойства, устойчивость к термическому удару, низкую индукционную активность графита и небольшое газообразование. В таблице 1 приведены геометрические размеры графитовых тайлов облицовки первой стенки токамака КТМ, выбранных для проведения экспериментов.

Таблица 1. Геометрические размеры образцов тайлов

№ п/п	Условная маркировка графита	Геометрические размеры, мм			
		В1	В2	Н	b
1	КНЗ-1	108	118	92	18
2	КНЗ-2	106	106	90	18
3	КНЗ-3	98	107	92	18
4	КНЗ-4	87	96	92	18

На рисунке 2 показан чертёж образца КНЗ.

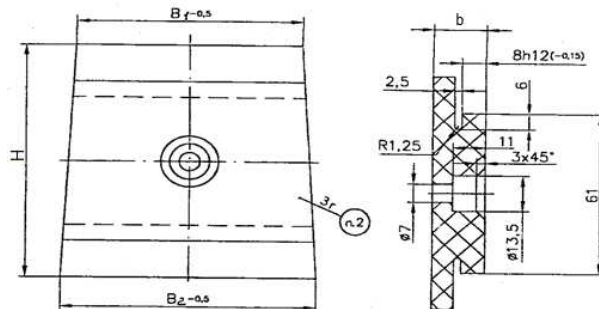
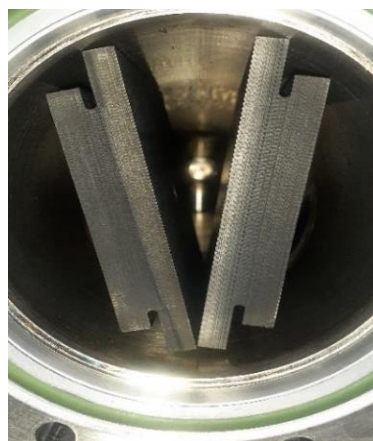


Рисунок 2. Чертёж графитового тайла.

На рисунке 3 показаны тайлы при их размещении в камере стенда для проведения исследований.



а)



б)

Рисунок 3. Размещение тайлов на стенде: с термопарой (а), установленные внутри стенда (б)

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦА

Методика проведения эксперимента по исследованию газовыделения из тайлов токамака КТМ включает следующие этапы:

1) Первоначально проводится эксперимент без графита. Вакуумная камера откачивается до предельного уровня высоковакуумным турбомолекулярным насосом. Изменение давления внутри камеры регистрируется вакуумными датчиками, а состав остаточных газов анализируется с помощью масс-спектрометра. После проводится проверка фланцевых соединений на герметичность с помощью гелиевого течеискателя (МС-4), методом обдува гелием. При обнаружении течей, принимаются меры по их устранению.

2) Затем осуществляется линейный нагрев камеры до температуры 200 °С в режиме непрерывной откачки. Длительность прогрева камеры при температуре 200 °С определяется достижением предельного уровня остаточного давления, которое практически не изменяется в течение длительного времени – нескольких часов. Далее камера остывает естественным образом до комнатной температуры. После остывания камеры фиксируется остаточное давление и регистрируется спектр состава остаточных газов. После чего производится измерение скорости падения остаточного давления при отсечении вакуумных насосов от объёма камеры.

По завершении всех измерений в камеру производится напуск атмосферного воздуха.

3) Далее в экспериментальную камеру устанавливаются графитовые тайлы и проводится ступенчатый нагрев камеры до температуры 200 °С в режиме непрерывной откачки объёма камеры турбомолекуляр-

ным насосом. После все операции выполняются в соответствии с пунктами 1 и 2.

В процессе эксперимента должны быть получены зависимости изменения остаточного давления газа от времени в объёме вакуумной камеры и зарегистрированы масс-спектры пустой камеры и с графитовыми тайлами.

Все измерения с тайлами и без них производятся при одинаковых условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты без графитовых тайлов

Результаты измерения давления в вакуумной камере во время эксперимента представлены на рисунке 4.

После сборки вакуумного стенда, была проведена откачка до предельного уровня остаточного давления $2,85 \cdot 10^{-7}$ Торр (рисунок 4). При достижении предельного давления в камере было произведено измерение масс-спектра остаточных газов. Далее производился линейный нагрев камеры до температуры 200 °С в режиме непрерывной откачки. По достижении температуры камеры 100 °С был включён нагревательный кожух О100НJR на масс-спектрометре с автоматическим нагревом до 200 °С. После достижения температуры камеры 200 °С, производилось удержание (стабилизация) на заданном уровне температуры, до достижения постоянного неизменного остаточного давления в камере. Затем было произведено снижение температуры до комнатной с непрерывной откачкой. После остывания камеры до комнатной температуры и достижения предельного остаточного давления в камере был снят масс-спектр остаточных газов.

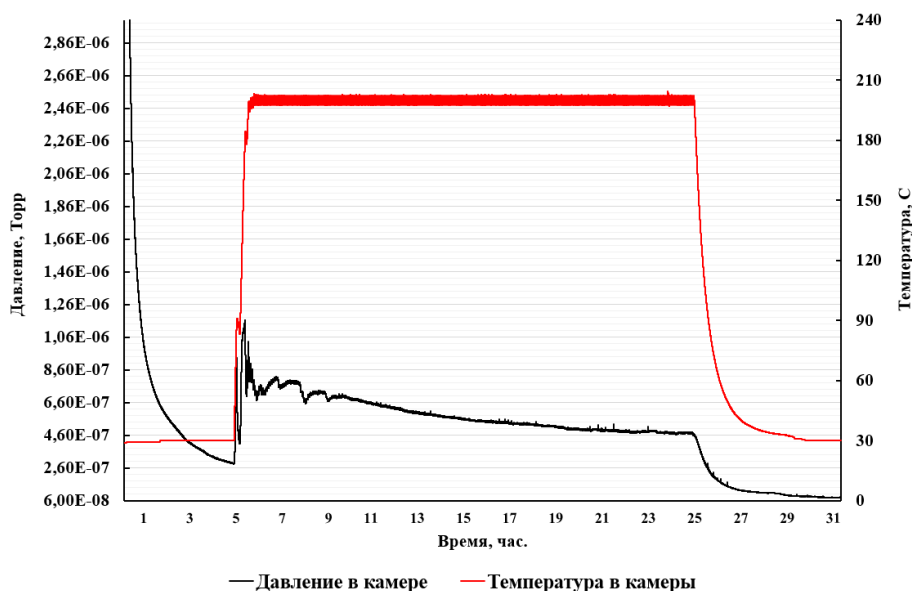


Рисунок 4. Временная зависимость изменения давления в процессе нагрева и остывания экспериментальной камеры

Как видно из рисунка 4, после включения нагрева начинается постепенный рост давления в камере, что связано с повышением газовой выделению со стенок камеры в процессе отжига. После достижения стационарной температуры 200 °С наблюдается постепенное снижение давления, что объясняется уменьшением интенсивности газовой выделению за счет постепенного снижения количества адсорбированных молекул газа на поверхности внутренних элементах вакуумной камеры. Примерно через 25 часов был отключён нагрев, что привело к дальнейшему снижению давления, так как скорость газовой выделению уменьшается с понижением температуры. По мере остывания камеры до комнатной температуры предельное остаточное давление в камере достигло значения $6,5 \cdot 10^{-8}$ Торр.

Эксперименты с графитовыми тайлами

После размещения графитовых тайлов в вакуумную камеру была проведена откачка до предельного уровня остаточного давления $2,26 \cdot 10^{-7}$ Торр. Затем все операции по прогреву камеры повторились.

На рисунке 5 приведены графики изменения давления в камере и температуры графита в процессе нагрева и остывания.

После включения электронагревателя начинается постепенный рост давления в камере, обусловленный разогревом и интенсивным газовой выделением графита в процессе отжига. Далее, при достижении температуры около 200 °С начинается снижение показания давления, что обусловлено постепенным обезгаживанием графита и уменьшением его газовой выделению. В момент времени ~43 часа после начала экспериме-

нта нагрев был отключён. Предельное остаточное давление в камере с графитовыми тайлами после их остывания до комнатной температуры составило $7,7 \cdot 10^{-8}$ Торр. Можно заметить, что остаточное давление в камере с тайлами выше, чем в пустой камере.

Масс-спектры остаточных газов в вакуумной камере до отжига ВК без графита и с графитом представлены на рисунке 6.

Как видно на рисунке 6, спектр содержит массы водорода (2), водяного пара (17) и (18), неона (20), азота или углекислого газа (28), кислорода (32), диоксида углерода (44).

Масс-спектры остаточных газов в вакуумной камере после остывания ВК без графита и с графитом представлены на рисунке 7.

Как можно видеть, парциальные давления остаточных газов в экспериментальной камере после отжига заметно снижаются. Например, пик воды с массой (18) уменьшился в 20 раз, а водород с массой (2) уменьшился в 19 раз, что свидетельствует о значительной десорбции этих молекул с поверхностей. Также можно отметить концентрации других газов, таких как масса кислорода (32), который уменьшился в 1,35 раза и масса диоксида углерода (44), который уменьшился в 10 раз. При этом основное отличие в ВК с графитом заключается в большем количестве содержания составляющих газов воздуха таких как, масса кислорода (32), азота или углекислого газа (28) которые увеличился в 1,5 раза. Это связано с более пористой микроструктурой графита, который обладает большей сорбционной способностью по сравнению с металлом.

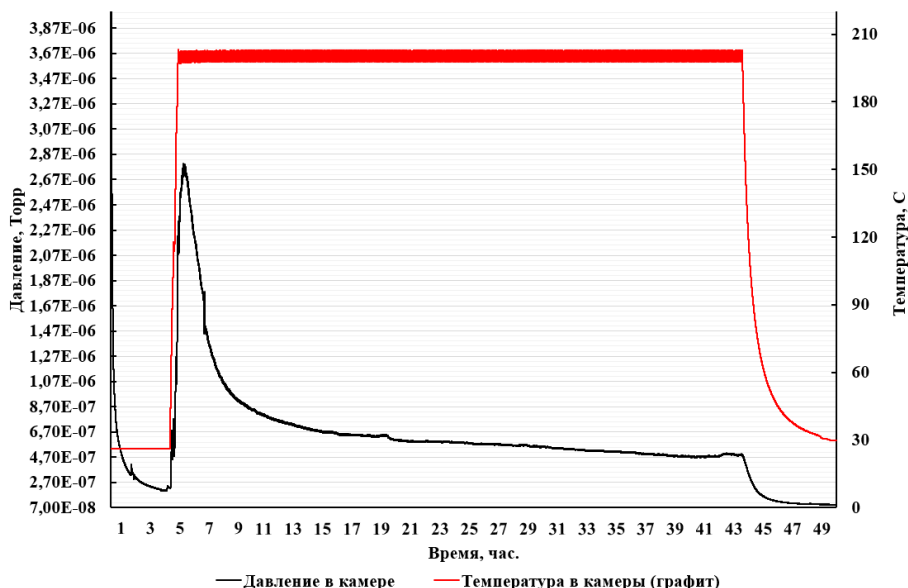


Рисунок 5. Временная зависимость изменения давления в процессе нагрева и остывания графита и экспериментальной камеры

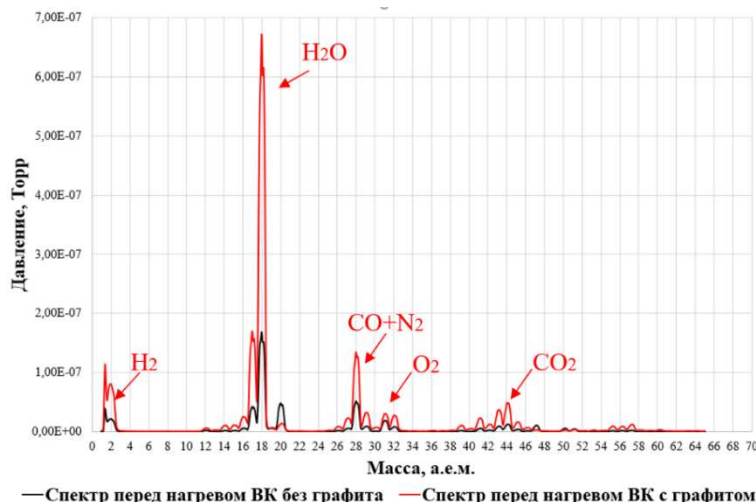


Рисунок 6. Масс-спектры остаточных газов в экспериментальной камере перед нагревом ВК без графита и с графитом при комнатной температуре (20 °С)

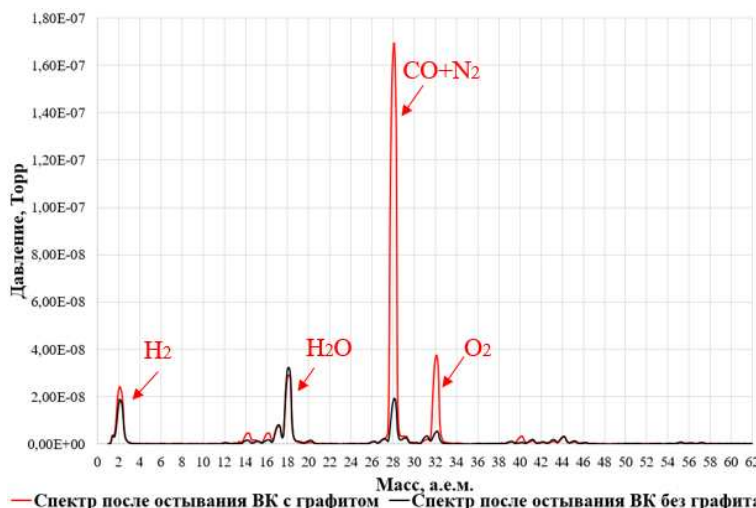


Рисунок 7. Спектр масс остаточных газов в экспериментальной камере после остывания ВК без графита и с графитом при комнатной температуре (20 °С).

Определение суммарного газовыделения

На основе полученных экспериментальных данных стендовых измерений зависимости изменения давления в камере без и с графитом были проведены расчёты по определению суммарного газового потока со всех тайлов, размещаемых в вакуумной камере КТМ.

Суммарный поток газов, поступающих в рабочий объем $Q_{\Sigma \text{стенд}}$, определяется следующим образом [5]:

$$Q_{\Sigma \text{стенд}} = p \cdot S_{\text{эфф. стенд}}, \tag{1}$$

где p – давление в рабочей камере, Торр; $S_{\text{эфф. стенд}}$ – эффективная быстрота откачки насоса, л/с.

Используя основное уравнение вакуумной техники, рассчитывается эффективная быстрота откачки турбомолекулярного насоса [5]:

$$S_{\text{эфф}} = \frac{S_{\text{эфф}} U}{S_{\text{эфф}} + U}, \tag{2}$$

где U – проводимость высоковакуумной системы, $\text{м}^3/\text{с}$; $S_{\text{эфф}}$ – быстрота действия основного насоса (по паспорту), $\text{м}^3/\text{с}$.

Проводимость соединительного патрубка рассчитывается как проводимость короткого трубопровода по формуле [5]:

$$U = 38,1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \sqrt{T/M}, \tag{3}$$

где d – внутренний диаметр трубопровода, 0,1 м; l – длина с учётом колена, 0,76 м; T – абсолютная температура, 298 К; M – молярная масса воздуха, 29 г/моль.

Трубопровод, соединяющий откачиваемый объем (ВК) с насосом, состоит из патрубка диаметром $d = 0,1$ м (рисунок 1). Для расчёта эффективной скорости откачки примем длину трубопровода с учётом колена, равной $l = 0,666$ м, что является расстоянием от входа в насос до центра камеры с установленными пластинами.

По результатам расчётов проводимость тракта составила $U = 0,183 \text{ м}^3/\text{с}$.

В откачном посту использовался насос Turbo - V301 Navigator с быстротой действия $S_{эфф} = 0,25 \text{ м}^3/\text{с}$ (250 л/с). На входе насоса установлена защитная сетка, которая уменьшает скорость откачки примерно на 10%. Из уравнения (2) эффективная скорость откачки высоковакуумного насоса, составляет 100 л/с.

Суммарный поток газов, поступающих в рабочий объем стэнда с графитом и без графита, равен:

$$Q_{\Sigma \text{ без тайл.}} = 1,91 \cdot 10^{-6} \text{ Торр} \cdot \text{л/с},$$

$$Q_{\Sigma \text{ с тайл.}} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Торр} \cdot \text{л/с}.$$

Из разности потока газов в камеру стэнда с графитом и без него можно определить поток газа от четырёх тайлов после отжига, размещённых в камере стэнда, который составил $Q_{4 \text{ тайл}} = 1,09 \cdot 10^{-6} \text{ Торр} \cdot \text{л/с}$.

Общее количество графитовых тайлов внутри вакуумной камеры токамака КТМ составляет 1790 шт., которые имеют разные геометрические размеры. Зная общую площадь установленных графитовых тайлов внутри ВК КТМ, а также среднюю площадь 4-х графитовых тайлов (рисунок 2), можно определить общий газовый поток со всех графитовых тайлов в вакуумной камере КТМ, который равен:

$$Q_{\text{общ. тайл КТМ}} = Q_{\text{тайл}} \frac{A_{\text{КТМ}}}{A_{\text{эксп.}}}, \quad (4)$$

где $A_{\text{КТМ}}$ – суммарная площадь поверхности всех графитовых тайлов КТМ ($45,9 \text{ м}^2$); $A_{\text{эксп.}}$ – средняя площадь одного тайла, использованного в стэнде ($0,0195 \text{ м}^2$).

По результатам вычисления суммарное газоразделение со всех графитовых тайлов КТМ составляет $Q_{\text{общ. тайл КТМ}} = 6,4 \cdot 10^{-4} \text{ Торр} \cdot \text{л/с}$.

В соответствии с уравнением (1) для определения предельного вакуумного давления КТМ нужно найти общий газовый поток (Q) в камере КТМ, который в общем складывается из суммы газоразделения внутрикамерных элементов и натекания через прокладку:

$$Q_{\Sigma \text{ общ. поток КТМ}} = Q_{\text{общ. тайл КТМ}} + Q_{\text{нерж. КТМ}} + Q_{\text{нат. КТМ}} \quad (5)$$

Поскольку найти из справочных данных значение газоразделения нержавеющей стали в условиях КТМ не представилось возможным, то эти данные также были найдены из проведенных стеновых измерений. Для этого дополнительно были определены справочные данные о натекании от используемых уплотнений типа VITON ISO-100, которые составили $Q_{\text{нат. эксп.}} = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ Торр} \cdot \text{л/с}$ [6].

Газоразделение стенок камеры из нержавеющей стали можно определить следующим образом:

$$Q_{\text{нерж. стэнд.}} = Q_{\Sigma \text{ без тайл.}} - Q_{\text{нат. эксп.}} = 1,76 \cdot 10^{-6} \text{ Торр} \cdot \text{л/с}.$$

Теперь, зная газоразделение стенок экспериментальной ВК и его площадь, пропорционально можно найти газоразделение стенок ВК КТМ:

$$Q_{\text{нерж. КТМ}} = Q_{\text{нерж. эксп.}} \frac{A_{\text{КТМ}}}{A_{\text{эксп.}}} = 1,76 \cdot 10^{-4} \text{ Торр} \cdot \text{л/с},$$

где $A_{\text{КТМ}}$ – площадь ВК КТМ, 32 м^2 ; $A_{\text{эксп.}}$ – площадь экспериментальной ВК, $0,32 \text{ м}^2$.

Натекание разъёмных соединений токамака КТМ можно найти следующим образом [7]:

$$Q_{\text{нат. КТМ}} = 450 \sqrt{T/M} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{ср}}}{a} \cdot R^2 \cdot \Delta p \cdot e^{-\frac{P_{\text{д}}}{R_{\text{в}}}}, \quad (6)$$

где T – абсолютная температура, 298 К ; M – молярная масса воздуха, 29 г/моль ; $d_{\text{ср.}}$ – средний диаметр резинового кольца, мм ; $a - d_{\text{п}}(2\varepsilon + 0,15)$ – ширина контакта прокладки с фланцем, мм ; $d_{\text{п}}$ – диаметр толщины резинового кольца, мм ; ε – степень деформации прокладки, примем $\varepsilon = 20\%$; $R - 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ – параметр шероховатости; $\Delta p - P_{\text{атм.}} - P_{\text{в.}}$ перепад давления в системе атмосфера-вакуум; $\Delta p - 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $P_{\text{д}} - 5 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $R_{\text{в}} - 9 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – коэффициент уплотнения.

Общее количество различных резиновых уплотнений в вакуумной камере токамака КТМ – 85 шт. Для проведения расчетов по оценке натекания через уплотнения не учитывались разъёмные соединения с медным уплотнением, поскольку проницаемость медных уплотнений намного меньше ($< 10^{-11} \text{ Торр л/с}$), чем резиновых.

По результатам расчёта натекание от соединений с резиновыми уплотнениями в КТМ составляет $Q_{\text{нат. КТМ}} = 3,4 \cdot 10^{-5} \text{ Торр} \cdot \text{л/с}$.

Как можно увидеть, газовый поток от графитовых тайлов вносит наибольший вклад в суммарный поток газа в ВК КТМ.

Исходя из полученных данных из уравнения (1) было определено остаточное давление в вакуумной камере КТМ, которое составило $p_{\text{КТМ}} = 3,9 \cdot 10^{-7} \text{ Торр}$. Для проведения расчетов была определена эффективная скорость откачки вакуумной камеры токамака КТМ, которая составила $S_{эфф \text{ КТМ}} = 2128 \text{ л/с}$. Для достижения высокого вакуума внутри ВК КТМ используются три турбомолекулярных насоса Turbo-V 3К с быстротой действия $S_{эфф} = 2,2 \text{ м}^3/\text{с}$ (2200 л/с) каждый. На входе насоса установлена защитная сетка, которая уменьшает скорость откачки насоса примерно на 10%.

Таким образом, согласно полученным экспериментальным данным о газоразделении графитовых тайлов и проведенным расчетам было определено, что минимальное давления в ВК КТМ составляет $3,9 \cdot 10^{-7} \text{ Торр}$.

Также было рассчитано предельное давления в ВК КТМ в случае уменьшения количества тайлов в два раза и при полном их отсутствии – $P_{1/2 \text{ тайлов}} = 2,4 \cdot 10^{-7} \text{ Торр}$ и $P_{\text{без тайлов}} = 9,5 \cdot 10^{-8} \text{ Торр}$, соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты, проведённые с графитовыми тайлами токамака КТМ, позволили получить зависимости изменения давления от времени в процессе нагрева и остывания в экспериментальной камере. Кроме того, были проанализированы масс-спектры газовыделения тайлов КТМ.

В результате проведённой работы были получены экспериментальные данные о степени газовыделения графитовых тайлов токамака КТМ и их влиянии на уровень вакуума.

На основе полученных данных проведена оценка предельного остаточного давления в вакуумной камере КТМ при отсутствии микротечей и допустимом уровне натекания через прокладки. Было установлено, что графитовые тайлы имеют достаточно заметное газовыделение и оказывают значительное влияние на уровень остаточного давления в ВК КТМ.

На основе проведённой работы можно сделать следующие выводы:

1. Предельное остаточное давление в вакуумной камере КТМ согласно расчетам ($p_{КТМ}$) с используемой системой вакуумной откачки при уровне натекания, не превышающем допустимые, составляет $3,9 \cdot 10^{-7}$ Торр.

2. При этом, по всей видимости, имеет место небольшое дополнительное натекание с атмосферы в вакуумную камеру КТМ, при устранении которого можно снизить уровень остаточного давления в камере КТМ с $5 \cdot 10^{-7}$ до $4 \cdot 10^{-7}$ Торр. Причиной дополнительного натекания может быть проницаемость резиновых уплотнений или недостаточная герметичность соединений ВК КТМ. Также возможно наличие пор или виртуальных течей или же других дефектов в камере, через которые происходит проникновение атмосферы.

3. Расчёты показали, что частичное или полное удаление графитовых тайлов способно снизить уровень остаточного давления до 10^{-8} Торр. Это указывает на заметное влияние графитовых тайлов на общий газовый поток и уровень вакуума в камере.

Таким образом, проведенное исследование позволило определить уровень газового потока с графитовых тайлов в условиях работы КТМ и определить возможные пути улучшения вакуумных условий.

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.

Авторы выражают искреннюю благодарность за помощь в проведении работ персоналу комплекса КТМ и сотрудникам отдела термоядерных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чектыбаев Б.Ж., Батырбеков Э.Г., Скаков М.К., Садыков А.Д., Кашикбаев Е.А. О возможности повышения точности тепловизионных измерений кандидатных материалов первой стенки термоядерных реакторов на токамаке КТМ // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2019. – Т. 42. – Вып. 4. – С. 21–30.
2. Образцов И.С., Рыжаков Д.В., Чектыбаев Б.Ж., Ольховик Д.А., Савкин В.И., Полковников В.С., Ибрагимхан Э.Е. Подготовка вакуумной камеры токамака КТМ к экспериментам // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2022. – Том 45. – Вып. 3. – С. 29–33.
3. Brezinsek S. Plasma-surface interaction in the Be/W environment: Conclusions drawn from the JET-ILW for ITER / S. Brezinsek // Journal of Nuclear Materials. – 2015. – Vol. 463. – P. 11–21.
4. Liga Avotina et al. Spectrometric analysis of inner divertor materials of JET carbon and ITER-like walls // Fusion Engineering and Design. – 2019. – Vol. 146, Part A. – P. 82–86. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.11.037>
5. А.В. Юр'ева. Расчёт вакуумных систем: Издательство Томского политехнического университета, 2012.
6. Газопроницаемость витоновых O-колец для вакуумных систем // <https://chemtech.ru/gazopronitsaemost-vitonovykh-o-kolec-dlja-vakuumnykh-sistem/>
7. Е. А. Деулин, В. П. Михайлов, А. М. Базиненков. Расчёт вакуумных систем технологического оборудования. Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, 102 с.

REFERENCES

1. Chektybaev B.Zh., Bатыrbekov E.G., Skakov M.K., Sadykov A.D., Kashikbaev E.A. O vozmozhnosti povysheniya tochnosti teplovizionnykh izmereniy kandidatnykh materialov pervoy stenki termoyadernykh reaktorov na tokamake KTM // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyy sintez. – 2019. – Vol. 42. – Issue 4. – P. 21–30.
2. Obraztsov I.S., Ryzhakov D.V., Chektybaev B.Zh., Ol'khovik D.A., Savkin V.I., Polkovnikov V.S., Ibragimkhan E.E. Podgotovka vakuumnoy kamery tokamaka KTM k eksperimentam // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyy sintez. – 2022. – Vol. 45. – Issue 3. – P. 29–33.
3. Brezinsek S. Plasma-surface interaction in the Be/W environment: Conclusions drawn from the JET-ILW for ITER / S. Brezinsek // Journal of Nuclear Materials. – 2015. – Vol. 463. P. 11–21.
4. Liga Avotina et al. Spectrometric analysis of inner divertor materials of JET carbon and ITER-like walls // Fusion Engineering and Design. – 2019. – Vol. 146, Part A. – P. 82–86. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.11.037>
5. A.V. Yur'eva. Raschet vakuumnykh sistem: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2012.
6. Gazopronitsaemost' vitonovykh O-kolets dlya vakuumnykh sistem // <https://chemtech.ru/gazopronitsaemost-vitonovykh-o-kolec-dlja-vakuumnykh-sistem/>
7. E. A. Deulin, V. P. Mikhaylov, A. M. Bazinenkov. Raschet vakuumnykh sistem tekhnologicheskogo oborudovaniya. Iz-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2022, 102 p.

**КТМ ТОКАМАГЫНЫҢ ГРАФИТТЫҚ ТАЙЛДАРЫНЫҢ ГАЗ ШЫҒАРУЫН
ТӘЖІРИБЕЛІ ЗЕРІТТЕУ**

К. Женис*, Б. Ж. Чектыбаев, А. Т. Кусайнов, В. С. Полковников, Д. А. Ольховик

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

** Байланыс үшін E-mail: kulan@nnc.kz*

Бұл жұмыста КТМ токамагының графиттік тайлдарынан газ бөлінуін зерттеу бойынша эксперименттердің нәтижелері ұсынылған. Эксперимент жүргізу әдістемесі мен эксперименттік вакуумдық стендтің құрылысы егжей-тегжейлі сипатталған. Графиттік тайлдардан газ бөлінуінің 200 °С температураға дейінгі қыздыру барысында уақытқа тәуелділігі, жоғары вакуумдық сорғы арқылы тұрақты сордыру режимінде, КТМ вакуумдық камерасын қыздыру жағдайын имитациялай отырып, көрсетілген. Сондай-ақ, вакуумдық стенд камерасындағы вакуум ортасының құрамы қыздыру алдында және вакуумды камера (ВК) суығаннан кейін масс-спектрометриялық талдау жүргізілген. Эксперименттік деректерге талдау жасалып, КТМ ВК ішіндегі шекті қалдық қысым бағаланды.

Түйін сөздер: токамак КТМ, вакуумдық стенд, графиттық тайл, масс-спектрометр, газ эмиссиясы.

**EXPERIMENTAL STUDY OF GAS EMISSION FROM GRAPHITE TILES
OF THE KTM TOKAMAK**

K. Zhenis*, B. Zh. Chektybaev, A. T. Kusainov, V. S. Polkovnikov, D. A. Olkhovik

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

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

This paper presents the results of experiments on the research of gas release from graphite tiles in a KTM tokamak. The methodology of the experiment and the design of the experimental vacuum stand are described in detail. The dependences of the gas release from graphite tiles over time during their annealing to a temperature of 200 °C with constant pumping using a high-vacuum pump, simulating the annealing conditions in a KTM vacuum chamber, are presented. The work also includes a mass spectrometric analysis of the composition of the vacuum medium in the vacuum chamber of the experimental stand before heating and after cooling the vacuum chamber (VC). An analysis of experimental data is presented and estimates of the maximum residual pressure in the KTM VC are given.

Keywords: tokamak KTM, vacuum stand, graphite tiles, mass spectrometer, gas emission.