

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-134-141>
УДК 621.039.6, 621.793.3, 537.525

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ БОРОНИЗАЦИИ ДЛЯ ТОКАМАКА КТМ

А.Ж. Дүйсен^{1*}, Б.Ж. Чектыбаев^{1,2}, А.Г. Коровиков¹, Е.А. Кашикбаев^{1,2},
В.С. Полковников¹, Д.А. Ольховик¹, А.Т. Кусайнов¹, К. Жәніс¹

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

²НАО «Шакарим университет», Семей, Казахстан

* E-mail для контактов: duysen@nnc.kz

В данной работе проведен литературный обзор применения и особенностей боронизации на установках типа токамак, обоснована методика подготовки вакуумной камеры (ВК) токамака КТМ к плазменным экспериментам с использованием системы боронизации на основе карборана. Описана техническая реализация процесса в условиях тлеющего разряда, включая конструкцию системы подачи паров с обогреваемым ресивером и транспортного тракта на токамаке КТМ. Представлен проект разрабатываемого диагностического комплекса для оперативного контроля чистоты среды, объединяющий масс-спектрометрию и оптический мониторинг линии излучения бора.

Ключевые слова: токамак, КТМ, боронизация, тлеющий разряд, первая стенка.

ВВЕДЕНИЕ

Подготовка вакуумной камеры к экспериментам по получению плазменных разрядов является одной из важнейших задач на установках управляемого термоядерного синтеза. От состояния и чистоты стенок зависит качество и повторяемость плазменных разрядов. Для минимизации поступления примесей со стенок во многих токамаках применяется метод боронизации.

Боронизация – метод плазмохимического осаждения боруглеродной пленки на первую стенку вакуумной камеры. Целью боронизации является снижение поступления примесей (кислород, углерод и т.п.) в плазму, контроль рециклинга изотопов водорода.

Впервые данный метод был применен на токамаке TEXTOR в 1989 году в среде тлеющего разряда гелия и диборана (B_2H_6). Выбор диборана был обусловлен летучестью и легкостью диссоциации в плазме. После боронизации на TEXTOR резко уменьшились радиационные потери плазмы, снизилась концентрация кислорода в плазме и эффективный заряд плазмы опустился до значения, близкого к 1 [1].

В данной статье представлена методика проведения боронизации на токамаке КТМ и методы определения толщины осаждаемого покрытия с использованием образцов-свидетелей. Следует отметить, что данный процесс будет применен на токамаке КТМ впервые и направлен на повышение чистоты плазмы за счет снижения уровня примесей, уменьшение радиационных потерь и общее улучшение ключевых параметров плазменного разряда, за счет контроля рециклинга водорода в первой стенке вакуумной камеры.

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ БОРОНИЗАЦИИ В ТОКАМАКАХ

После массового перехода на графитовые лимитеры и диверторы в установках типа токамак возникли проблемы с загрязнением плазмы легкими примеся-

ми, такими как углерод и кислород. Непрерывная десорбция паров воды с неочищенных металлических поверхностей и первой стенки вакуумной камеры инициирует лавинный механизм. Ионизированный на периферии шнура кислород внедряется в приповерхностные слои графита, а затем высвобождается в виде молекулярных соединений под воздействием ионной бомбардировки. Экспериментально зафиксированный рост потоков углерода и кислорода по мере приближения плазмы к стенке подтверждает, что именно пристеночные химические реакции и последующее распыление диафрагм ионами кислорода доминируют в загрязнении разряда и вносят вклад в рост радиационных потерь плазмы. Традиционные методы очистки камеры, такие как тлеющий разряд в гелии, дают лишь кратковременный эффект, поскольку не устраняют сам источник десорбции воды, что делает необходимым поиск принципиально новых методов долговременной пассивации внутрикамерных поверхностей [1].

Успешная демонстрация улучшения параметров плазмы на токамаке TEXTOR инициировала повсеместное внедрение боронизации плазмообращенных компонентов на других термоядерных установках. В экспериментах на TEXTOR в качестве прекурсора использовался диборан (B_2H_6), применение которого обеспечило эффективное подавление потоков примесей, снижение эффективного заряда плазмы Z_{eff} и радиационных потерь. Ключевым результатом модификации поверхности стало значительное снижение рециклинга водорода. Минимизация неконтролируемой десорбции рабочего газа со стенок предотвратила избыточный рост плотности и связанные с ним радиационные срывы, что позволило реализовать прецизионное управление плотностью плазмы и повысить общую стабильность разряда.

Однако использование диборана серьезно усложнено его высокой токсичностью, взрывоопасностью

и эффектом насыщения стенок водородом, который искажает изотопный состав топлива. Так, на токамаке TFTR высокая опасность диборана требовала использования смесей с гелием и метаном, а проблема водородного удержания в конечном итоге вынудила перейти на дейтерированный диборан (B_2D_6) [2].

Для обеспечения безопасности в последующем на установках были внедрены твердые прекурсоры, сублимирующие при 60–120 °С. Декаборан ($B_{10}H_{14}$) на токамаке JT-60U показал результаты, аналогичные диборановому методу (содержание бора в пленках >90%, падение концентрации кислорода в плазме) [3, 6]. Наиболее популярным благодаря безопасности и дешевизне стал карборан ($C_2B_{10}H_{12}$), формирующий аморфную пленку а-B/C:H с отношением В/С до 3,7. Методика успешно применяется на токамаках T-15МД, Глобус-М2, ТУМАН-3, EAST и KSTAR, снижая Z_{eff} до ~1 и увеличивая предельную плотность плазмы в 1,5–2 раза [4].

Триметилбор ($B(CH_3)_3$) – это газообразный прекурсор, который рассматривался как менее опасная альтернатива диборану, хотя и уступает твердым карборану и декаборану по удобству работы, но выгодно отличается возможностью подачи непосредственно в плазменный разряд для кондиционирования стенок в реальном времени [5, 6, 7].

Подробное сравнение основных прекурсоров представлено в таблице 1. Стоит отметить, что для установок с полностью металлическими стенками приоритетными являются прекурсоры без углерода в составе (для исключения нежелательного накопления углерода на металле), а также замена водорода на дейтерий для предотвращения нежелательного изотопного обмена и разбавления рабочего топлива.

Выбор прекурсора и конкретные методические подходы кардинально зависят от материала первой стенки токамака, что накладывает жесткие технологические ограничения. В случае графитовой первой стенки использование карборана является оптимальным, так как родство аморфной боруглеродной пленки с пористой структурой графита обеспечивает отличную адгезию без риска отслоения. Это позволяет наносить относительно толстые слои (до 100–150 нм)

без строгого контроля температуры подложки, а в качестве прекурсора здесь стандартно используют наиболее доступный и легко испаряемый орто-карборан. Напротив, для металлических стенок из вольфрама или стали карборан принципиально не применяется — вместо него используются исключительно безуглеродные прекурсоры, например, декаборан или диборан. Это обусловлено тем, что перенос углерода из карборана на металл привел бы к формированию боруглеродного слоя, что полностью нивелирует технологические преимущества чистой металлической стенки и маскирует ее истинные материаловедческие свойства.

Если раньше боронизация в среде тлеющего разряда считалась «золотым» стандартом, то с появлением новых установок типа сверхпроводящего токамака начали появляться и новые методы нанесения борсодержащих покрытий, что коснулось и выбора прекурсоров. Дело в том, что тлеющий разряд требует электрического поля для ускорения ионов, но в сильном магнитном поле электроны и ионы закручиваются по спиралям (разряд стягивается в шнур) и не могут эффективно и равномерно бомбардировать стенку.

Сверхпроводящий токамак – это установка, в которой для удержания плазмы используются обмотки из сверхпроводящих материалов вместо традиционных медных. Данный выбор обусловлен временем импульса разряда: медные катушки очень быстро нагреваются из-за омического сопротивления. По сравнению с ними сверхпроводящие катушки позволяют генерировать более сильные магнитные поля.

Основным отличием от классических токамаков является наличие постоянного магнитного поля. Так как отключение магнитных катушек нецелесообразно с энергетической точки зрения (ввод и вывод тока из магнитов требует огромной пиковой мощности от энергосети), намного экономичнее поддерживать ток в сверхпроводниках постоянно. Также немаловажными факторами являются механические нагрузки на материалы сверхпроводников и риск теплового срыва.

Для решения задачи проведения боронизации в условиях постоянного магнитного поля идеально подошли безэлектродные методы: СВЧ-разряд (ЭЦР)

Таблица 1. Сравнение прекурсоров, применявшихся для боронизации на токамаках

Прекурсор	Агрегатное состояние	Применение на токамаках	Достигнутые эффекты
Диборан (B_2H_6) / Дейтерированный диборан (B_2D_6)	Газ	TFTR, ASDEX-U	Подавление потоков примесей, снижение Z_{eff}
Декаборан ($B_{10}H_{14}$) / Дейтерированный декаборан ($B_{10}D_{14}$)	Твердый	JT-60U	Падение концентрации кислорода в плазме, высокое содержание бора в осаждаемой пленке.
Карборан ($C_2B_{10}H_{12}$)	Твердый	T-15МД, Глобус-М2, EAST, KSTAR, выбран для КТМ	Снижение Z_{eff} до ~1, увеличение предельной плотности плазмы в 1,5–2 раза. Уменьшение рециклинга, улучшение удержания.
Триметилбор ($B(CH_3)_3$)	Газ	COMPASS, NSTX, TJ-I	Снижение потоков металлов, кислорода и углерода, уменьшение Z_{eff} и радиационных потерь, повышение предела плотности плазмы.

и ВЧ-разряд (ИЦР). Первыми в мире боронизацию с использованием СВЧ-разряда на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) провели японские физики на экспериментальной термоядерной установке Heliotron E (Университет Киото) в 1992–1993 годах.

Японский эксперимент на Heliotron E доказал принципиальные преимущества СВЧ-метода, главным из которых стала рекордная чистота покрытия с минимальным содержанием водорода. Оказалось, что атомное соотношение водорода к бору (H/B) в получившейся пленке составило всего 0,1, тогда как при обычном тлеющем разряде этот показатель достигал 0,4–1,0. Меньшее количество водорода в пленке означало, что стенки не будут бесконтрольно «выбрасывать» лишний газ в рабочую плазму во время термоядерных импульсов [8].

ТРЕБОВАНИЕ К СИСТЕМЕ БОРОНИЗАЦИИ

Токамак КТМ – мегаамперная электрофизическая установка, предназначенная для исследования физики плазмы и испытания материалов первой стенки [9]. Для проведения материаловедческих испытаний материалов под тепловой нагрузкой плазмы в 20 МВт/м² необходимо обеспечить протекание плазменного разряда, в соответствии с заданным сценарием и воспроизводимостью. Поступление примесей со стенок вакуумной камеры в плазму может привести к снижению ее температуры и плотности, что, в свою очередь, сказывается на мощности потока частиц и энергии в SOL (Scrape-Off Layer).

Вакуумная камера токамака КТМ выполнена из нержавеющей стали 08Cr18Ni12Ti. Она обладает площадью 33 м², объемом 13,5 м³ и оснащена 10 экваториальными, 10 вертикальными и 6 диверторными диагностическими портами. Вся внутренняя металлическая поверхность камеры облицована графитовыми пластинами марки FP-479 [10].

Разрабатываемая система боронизации будет входить в состав вакуумной системы токамака КТМ и использоваться для кондиционирования первой стенки в штатном режиме. Исходя из анализа литературных данных и опыта применения различных прекурсоров на ведущих термоядерных установках, для проведения боронизации на токамаке КТМ в качестве борсо-держателя прекурсора был выбран карборан. Данный прекурсор хорошо зарекомендовал себя на ведущих научных установках при формировании равномерных аморфных бору-глеродных покрытий, обладающих высокой адгезией и обеспечивающих эффективное связывание примесей кислорода и углерода, поступающих в плазму со стенок вакуумной камеры. Формирование такого покрытия способствует снижению уровня примесей в плазме, уменьшению рециклинга водорода и улучшению условий удержания плазмы. Карборан нетоксичен и прост в применении, что существенно упрощает регламентные работы, по-

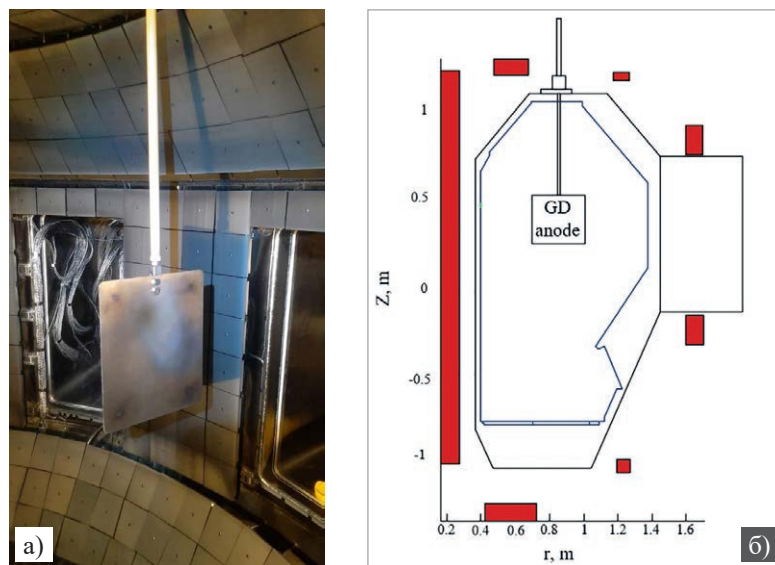
скольку после каждой экспериментальной кампании вакуумная камера вскрывается для юстировки, калибровки диагностического оборудования, технологических операций и очистки от пыли.

На основе проведенного анализа существующих подходов к осуществлению боронизации, а также с учетом технических возможностей токамака КТМ, критериев эффективности и эксплуатационной безопасности, в качестве рабочего метода было выбрано нанесение покрытия в тлеющем разряде. Альтернативный метод кондиционирования с использованием ионно-циклотронного резонанса (ИЦР) в данном случае неприменим из-за специфики работы высокочастотных (ВЧ) генераторов токамака КТМ. ВЧ-генераторы установки не способны функционировать в непрерывном режиме и требуют обязательной технологической паузы длительностью не менее 15 минут после каждого импульса, что делает невозможным поддержание стабильного и непрерывного процесса осаждения пленки. При этом внедрение отдельной специализированной ВЧ-системы потребует значительных временных и финансовых затрат, в связи с чем на данном этапе это представляется нецелесообразным.

В свою очередь, проведение боронизации в тлеющем разряде позволяет полностью обойти это ограничение, обеспечивая квазистационарный технологический цикл. Низкая энергия ионов в таком разряде, с одной стороны, полностью исключает нежелательное физическое распыление материала стенки, а с другой — обеспечивает мягкую активацию поверхности, необходимую для формирования однородной борсо-держательной пленки. Благодаря способности тлеющего разряда стабильно заполнять весь сложный геометрический объем вакуумной камеры, достигается равномерное покрытие всех внутренних поверхностей, а отсутствие дуговых переходов и резких скачков тока делает процесс безопасным, легко управляемым и полностью соответствующим требованиям штатного кондиционирования установки.

КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ КТМ К ЭКСПЕРИМЕНТАМ

Процедура подготовки вакуумной камеры к экспериментам осуществляется в несколько этапов. На первом этапе (при разгерметизированной камере) производится механическая очистка поверхности первой стенки от пыли и мелких частиц с помощью промышленного пылесоса. После герметизации осуществляется откачка камеры до давления 10⁻⁶ Торр с помощью одного безмасляного форвакуумного и трех турбомолекулярных насосов. Контроль давления в полости ВК ведется вакуумными датчиками Agilent IMG-100 (диапазон измерений 5·10⁻⁹ - 1·10⁻³ Торр). Параллельно с откачкой проводится омический прогрев элементов вакуумной камеры до температуры 180±10 °С для удаления адсорбированных паров воды [10].



а – фотография анода тлеющего разряда; б – схема введения анода в ВК КТМ

Рисунок 1. Электрод тлеющего разряда токамака КТМ

Завершающим этапом подготовки является обработка поверхности тлеющим разрядом с использованием газов: аргона, водорода и гелия. Ионы рабочего газа, ускоряясь в области катодного падения потенциала, бомбардируют внутреннюю поверхность камеры. Данный процесс обеспечивает десорбцию примесей, наличие которых ограничивает достижение предельных параметров плазмы. Для организации тлеющего разряда в верхнем патрубке токамака установлен вакуумный манипулятор, вводящий в камеру одиночный молибденовый электрод (анод) размером 25×20 см (см. рисунок 1). На анод подается высокий положительный потенциал относительно заземленных стенок камеры. При давлении газа порядка 10^{-3} Торр пробой наступает при напряжении 1,5 кВ. В дальнейшем горение разряда поддерживается при напряжении 300–600 В и токе 6 А.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ БОРНИЗАЦИИ

Исходя из опыта подготовки вакуумной камеры к экспериментам на установках термоядерного синтеза, борнизация плазмообращенных компонентов должна быть заключительным этапом кондиционирования вакуумной камеры. Для борнизации необходимо прогреть вакуумную камеру до 180°C , зажечь тлеющий разряд в среде гелия. Во время тлеющего разряда необходимо открыть клапан тракта подачи паров карборана. Важно поддерживать соотношение паров гелия и карборана в пределах от 3/1 до 5/1 и давление $4\text{--}5 \cdot 10^{-3}$ Торр в вакуумной камере.

Контроль и мониторинг процесса борнизации и интенсивность осаждения пленки во время тлеющего разряда будут осуществляться с помощью квадрупольного масс-спектрометра ExTorr 200M, который необходим для регистрации всех присутствующих

элементов внутри вакуумной камеры. Планируется снимать масс-спектры с периодичностью 30 мин для контроля паров карборана и определения масс 144 (молекулярная масса карборана $\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_{12}$), 70 (соединения из карборана, образующиеся при диссоциации молекулы).

Система борнизации на комплексе токамака КТМ представляет собой прогреваемый контейнер и сильфонный тракт подачи паров карборана в ВК, оснащенные вакуумными клапанами. Принципиальная схема системы борнизации и фотографии сильфонного тракта с контейнером представлены на рисунке 3. Для обеспечения процесса сублимации (перехода порошка в газовую фазу), а также предотвращения конденсации паров карборана, система оснащена тремя нихромовыми нагревателями для независимого прогрева стенок контейнера, его днища и сильфонного тракта. При проведении борнизации система предварительно вакуумируется, стенки контейнера и сильфонный тракт прогреваются до 70°C , а днище контейнера – до максимальной температуры 120°C .

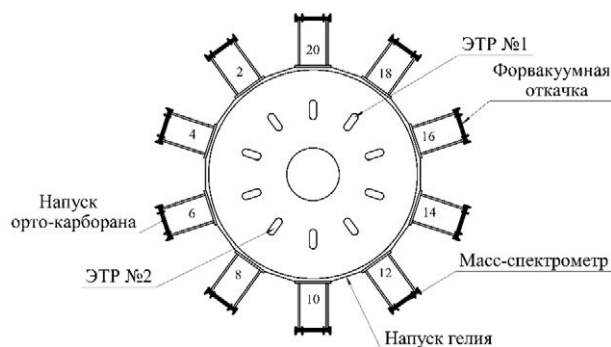
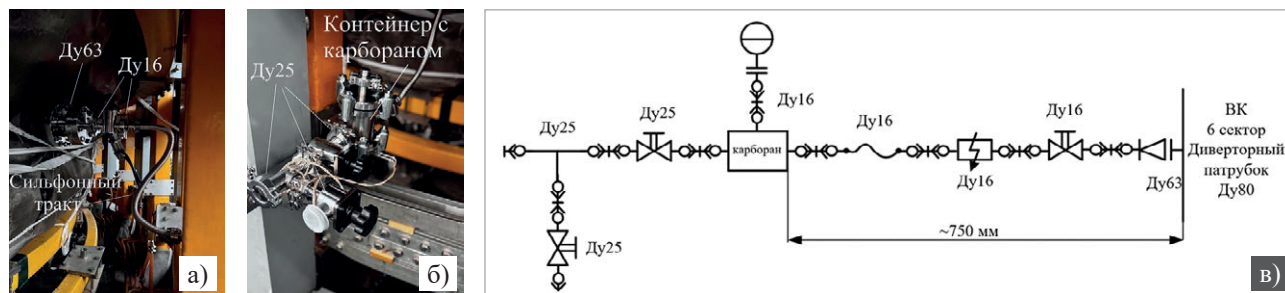


Рисунок 2. Тороидальное сечение вакуумной камеры КТМ



а – тракт подачи паров карборана; б – контейнер с порошком карборана; в – принципиальная схема системы боронизации.

Рисунок 3. Система боронизации токамака КТМ

Мониторинг результатов боронизации

Для оценки равномерности формирования боруглеродного покрытия на внутренней поверхности вакуумной камеры были изготовлены и будут размещены специальные диагностические образцы, представляющие собой молибденовые винты с предварительно нанесенным углеродным покрытием толщиной 300 нм [11], а также полированные графитовые образцы. Использование молибдена обусловлено его высокой химической инертностью, термической стойкостью и стабильностью свойств в условиях плазменного воздействия, благодаря чему он не взаимодействует с осаждаемой пленкой и позволяет проводить последующие измерения толщины покрытия с высокой точностью. Предварительное углеродное покрытие формирует хорошо различимую границу раздела между исходной поверхностью и осаждаемым в процессе боронизации боруглеродным слоем, что существенно повышает достоверность профилометрических измерений.

В качестве дополнительного диагностического материала будут использованы графитовые образцы с предварительно отполированной рабочей поверхностью, изготовленные из той же марки графита, который применяется для облицовки первой стенки вакуумной камеры токамака КТМ. Использование графитовых образцов позволяет оценить особенности формирования боруглеродного покрытия непосредственно на материале первой стенки вакуумной камеры, что обеспечивает получение результатов, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации токамака.

Внешний вид молибденового диагностического винта, графитовых образцов и держателя для их размещения внутри вакуумной камеры представлен на рисунке 4. Конструкция держателя обеспечивает надежную фиксацию диагностических образцов, при этом рабочие поверхности молибденового винта и графитовых вставок ориентированы в сторону внутреннего объема вакуумной камеры и непосредственно подвергаются воздействию плазмы тлеющего разряда и потока осаждаемых частиц.

Как можно заметить из рисунка 4, рабочая поверхность каждого диагностического образца частично закрыта графитовой пластиной на ~50% ее площади. Такое решение обеспечивает формирование на одном образце как области, подвергавшейся осаждению боруглеродного покрытия, так и области, сохранившей исходное состояние поверхности.

Использование частично закрытых образцов позволяет непосредственно после боронизации определить толщину осажденной пленки по перепаду высот между открытой и закрытой областями, оценить равномерность осаждения боруглеродного покрытия, а также исследовать характер его распределения по поверхности подложки.

Диагностические подложки будут установлены в двух тороидально разнесенных сечениях вакуумной камеры, соответствующих 8 и 18 секторам токамака КТМ (см. рисунок 2). Выбор именно этих точек обусловлен необходимостью оценки пространственной неоднородности процесса боронизации. В 18 секторе ВК КТМ расположен электрод тлеющего разряда, являющийся источником формирования плазмы при проведении боронизации. В связи с этим в данной области можно ожидать более интенсивного воздействия плазмы на поверхность образцов, что потенци-

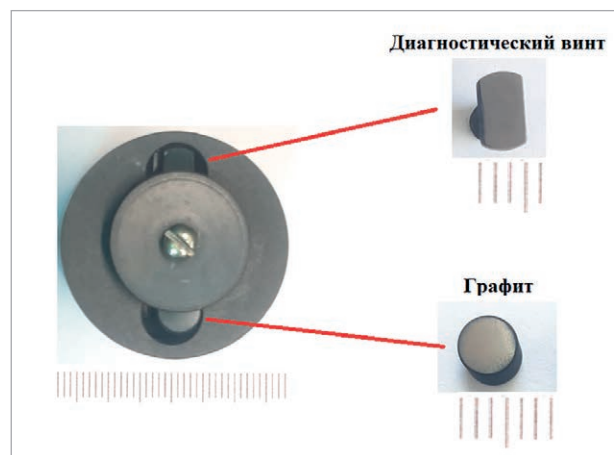


Рисунок 4. Фотография держателей с диагностическими образцами для измерения толщины покрытия

ально может привести к изменению скорости осаждения покрытия.

В свою очередь, 8 сектор расположен практически на противоположной стороне тороидальной камеры относительно электрода тлеющего разряда. Размещение диагностических образцов в данной области позволяет определить, насколько эффективно плазма и пары карборана распространяются по всему объему вакуумной камеры и обеспечивает ли выбранная технология формирование однородного боруглеродного покрытия на удаленных от источника разряда участках. Сравнение толщины и морфологии покрытий, сформированных на образцах, установленных в 8 и 18 секторах, позволит количественно оценить равномерность процесса боронизации по тороидальному направлению и определить влияние расположения относительно электрода тлеющего разряда на характеристики осаждаемой пленки.

После проведения боронизации диагностические образцы будут извлечены из вакуумной камеры и подвергнуты комплексному анализу. Толщина сформированного покрытия будет определяться с использованием профилометра SJ-410 (Mitutoyo) методом измерения перепада высот между исходной поверхностью и областью осаждения. Для детального изучения морфологии поверхности и структуры нанесенного покрытия методы электронной микроскопии и элементного анализа будут применены ко всем типам извлеченных образцов.

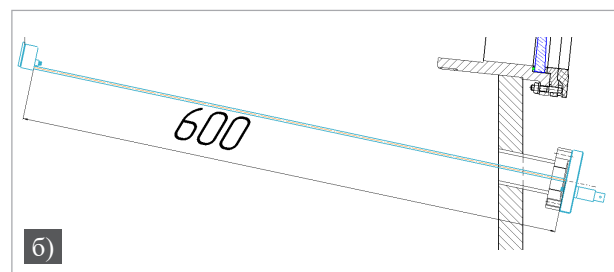
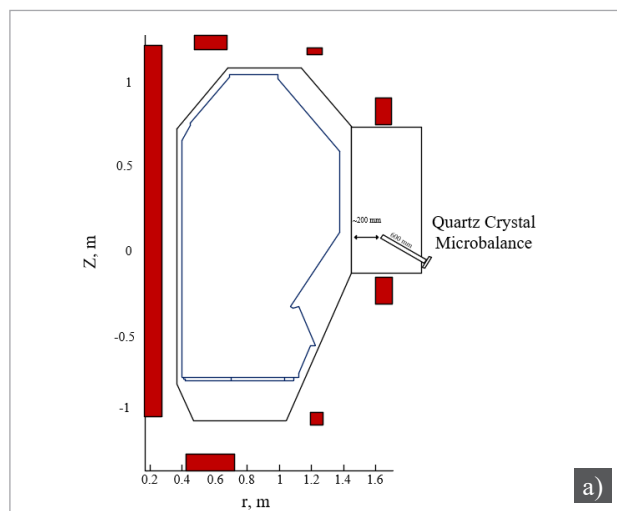
Дополнительно для in-situ определения толщины напыляемого покрытия разрабатывается система измерения на основе кварцевых микровесов (Quartz Crystal Microbalance). Данный метод измерения активно используется на токамаках, таких как EAST, ASDEX-U [12, 13]. Физический принцип работы QCM основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте, при котором переменное электрическое поле возбуждает в кварцевом резонаторе высокостабильные акустические колебания сдвига. Осаждение исследуемого

вещества на поверхность кристалла увеличивает его эффективную массу, что приводит к строго пропорциональному снижению базовой резонансной частоты колебаний. Диапазон измерений такой системы обладает субнанограммовой чувствительностью по массе (с разрешением по толщине до $0,1 \text{ \AA}$) и позволяет непрерывно регистрировать толщину наносимого покрытия в широком интервале от долей нанометра до нескольких микрометров. На рисунке 5 показана предполагаемая схема размещения QCM на токамаке КТМ.

Для косвенного контроля состояния защитной боруглеродной пленки внутрикамерных элементов планируется внедрить монитор излучения бора В II (линия однократно ионизованного бора) на длине волны $345,1 \text{ нм}$. Сразу после боронизации первая стенка полностью закрыта борсодержащим слоем, поэтому в первых рабочих разрядах интенсивность линии В II максимальна. По мере эрозии и уноса пленки интенсивность В II снижается, а интенсивность линий С III растет. Падение сигнала В II ниже порогового уровня служит сигналом о деградации покрытия и необходимости повторной боронизации.

Основными диагностическими преимуществами линии В II ($345,1 \text{ нм}$) являются высокая чистота сигнала и ее доступность для стандартных оптических систем. Благодаря расположению в ближнем УФ-диапазоне, излучение беспрепятственно проходит через кварцевые окна, а отсутствие самопоглощения в плазме обеспечивает высокую надежность количественного анализа. Именно на этой длине волны проводятся измерения на токамаках EAST, ASDEX-U и KSTAR, что подтверждает практическую реализуемость метода на современных установках [14, 15, 16].

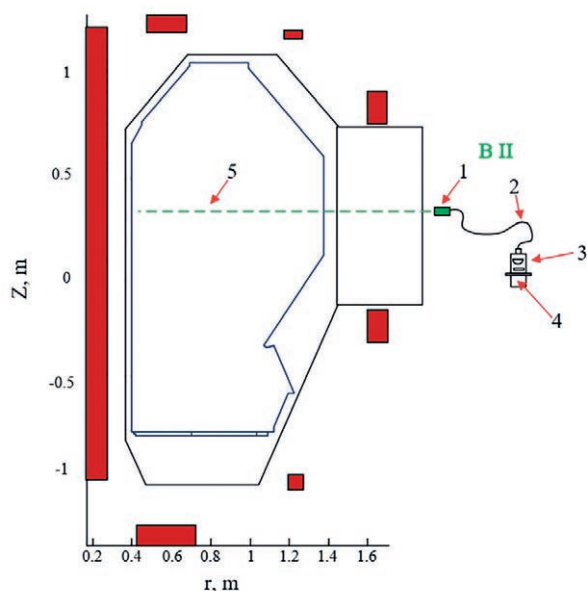
Для регистрации излучения бора в ультрафиолетовой области спектра плазмы выбран объектив COL-UV/VIS от Avantes с рабочим диапазоном $200\text{--}2500 \text{ нм}$. Передача сигнала осуществляется при помощи оптоволокну, работающего в широком спектре от УФ до видимой области. Используемый интерфе-



- а) общий вид установки узла QCM на экваториальной трубке ВК;
- б) положение чувствительного кварцевого кристалла относительно внутреннего объема камеры

Рисунок 5. Размещение QCM для контроля процесса боронизации вакуумной камеры токамака КТМ

ренционный фильтр имеет центральную длину волны (CWL) 343 нм и ширину полосы пропускания на полувысоте (FWHM) 5 нм. Для усиления выходного сигнала будет использован фотоэлектронный умножитель Hamamatsu H10722-210 со спектральной чувствительностью 230–700 нм. Схема мониторинга излучения линии бора, аналогичная монитору NaDa, который был собран ранее и показал свою работоспособность на токамаке КТМ, представлена на рисунке 6 [17].



1-объектив; 2-оптоволоконно; 3-оптическая трубка с фильтром и линзой; 4-фотоэлектронный умножитель; 5-линия наблюдения монитора

Рисунок 6. Схема регистрации монитора излучения бора

Таким образом, предлагаемый диагностический комплекс обеспечивает комплексный контроль процесса боронизации на различных этапах. Кварцевые микровесы предназначены для непрерывного измерения скорости осаждения и толщины покрытия непосредственно во время боронизации, профилометр используется для последующего контроля толщины сформированной пленки на диагностических образцах, а монитор линии излучения В II позволяет оценивать сохранность и эффективность борсодержащего покрытия в процессе дальнейших плазменных экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведен литературный обзор и приведено обоснование проектирования и необходимости внедрения системы боронизации для комплекса токамака КТМ, которая выступит заключительным этапом кондиционирования первой стенки вакуумной камеры перед плазменными экспериментами. На основе детального анализа мирового опыта в качестве прекурсора был выбран нетоксичный и безопасный в эксплуатации твердый карборан, обеспечивающий

формирование равномерных аморфных боруглеродных покрытий с высокой адгезией.

Для внедрения методики была успешно спроектирована и изготовлена система подачи паров, состоящая из контейнера-ресивера и сильфонного тракта, которые оснащены тремя независимыми нихромовыми нагревателями для обеспечения сублимации и предотвращения конденсации прекурсора. В ходе работы были четко определены и регламентированы оптимальные технологические параметры процесса, включающие омический прогрев элементов камеры до 180 ± 10 °С, зажигание тлеющего разряда в гелии при давлении 10^{-3} Торр и поддержание соотношения смеси гелия и паров карборана в диапазоне 3:1–5:1.

Для обеспечения всестороннего оперативного и последующего контроля разработан многокомпонентный диагностический комплекс, объединяющий масс-спектрометр ExTorr 200M для непрерывного анализа газовой среды, частично экранированные молибденовые и графитовые образцы-свидетели в тороидально разнесенных 8 и 18 секторах для профилометрических измерений на SJ-410, а также создаваемые системы кварцевых микровесов (QCM) для in-situ мониторинга толщины пленки и оптический монитор спектральной линии бора В II (345,1 нм).

Практическая реализация предложенных решений должна позволить в значительной степени снизить поступление легких примесей кислорода и углерода в плазменный шнур со стенок, минимизировать радиационные потери энергии и эффективно контролировать рециклинг водорода. В конечном итоге это обеспечит высокую стабильность и воспроизводимость плазменных разрядов, что критически важно для проведения контролируемых материаловедческих испытаний элементов первой стенки при экстремальных тепловых нагрузках до 20 МВт/м².

Данная исследовательская работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках грантового финансирования МНВО РК проекта AP26103385 по теме «Исследование влияния условий проведения экспериментов на параметры плазменного разряда токамака КТМ».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

1. J. Winter, H.G. Esser, L. Konen, V. Philipps, H. Reimer, J. von Seggern, J. Schlüter, E. Vietzke, F. Waelbroeck, P. Wienhold, T. Banno, D. Ringer, S. Veprek, Boronization in TEXTOR, J. Nucl. Mater. 162 (1989) 713–723, [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(89\)90352-8](https://doi.org/10.1016/0022-3115(89)90352-8).
2. H. F. Dylla, M. G. Bell, R. J. Hawryluk, et al., J. Nucl. Mater. 176–177, 337 (1990).
3. Saidoh, M.; Ogiwara, N.; Shimada, M.; Arai, T.; Hiratsuka, H.; Koike, T.; Shimizu, M.; Ninomiya, H.; Nakamura, H.; Jimbou, R. Initial boronization of JT-60U tokamak using

- decaborane. Jpn. J. Appl. Phys. 1993, 32, 3276–3281 J. Winter, et al., "Bomtrimethyl B(CH₃)₃ - A less hazardous substance for boronization," J. Nucl. Mater., 1768–177, pp 486–489, (1990).
4. Sharapov, V.M.; Mirnov, S.V.; Grashin, S.A.; Lebedev, S.V.; Kovan, I.A.; Krasilnikov, A.V.; Krupin, V.A.; Levin, L.S.; Romannikov, A.N.; Zakharov, A.P. Boronization of Russian tokamaks from carborane precursors. J. Nucl. Mater. 1995, 220–222, 730–735.
5. J. Winter, et al., "Borotrimethyl B(CH₃)₃ - A less hazardous substance for boronization," J. Nucl. Mater., 1768–177, pp 486–489, (1990).
6. F. L. Tabarés, E. de la Cal, D. Tafalla, R. Balbín, T. Estrada, I. García-Cortés, M. A. Ochando, M. A. Pedrosa, and B. Zurro, "Boronization of the TJ-I tokamak by trimethylboron and decaborane," J. Nucl. Mater. 220–222, 688–692 (1995).
7. Skinner C.H., Bedoya F., Scotti F., Allain J.P., Blanchard W., Cai D., Jaworski M. and Koel B.E. 2017 Nucl. Mater. Energy 12 744–8.
8. K. Kondo, et al., Impurity behavior in boronized Heliotron E, J. Nucl. Mater. 220–222 (1995) 1052–1056.
9. E.A. Azizov, et al., Kazakhstan tokamak for material testing conceptual design and basis parameters, Fusion Eng. Des. 56–57 (2001) 831–835.
10. I.S. Obraztsov, D.V. Ryzhakov, B.Z. Chektybaev, et al., Preparation of vacuum chamber of the KTM tokamak for experiments, Phys. At. Nucl. 86 (Suppl 1) (2023), S53–S56, <https://doi.org/10.1134/S1063778823130069>.
11. Krat, S.A., Chektybaev, B.Z., Bатырбеков, E.G. et al. Diagnostics of Long-Term Erosion and Deposition of the Material of the First Wall in the KTM Tokamak: Testing and First Results. Phys. Atom. Nuclei 88 (Suppl 2), S186–S194 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1063778825140078>.
12. Liu Y.M. et al 2025 Studies of material deposition during boronization using quartz crystal microbalance in EAST Nucl. Mater. Energy 44 101964.
13. Rohde V., Krieger K., Hohmann T.-O., Redl A., Hobirk J., AnS. and Sasidharan S. 2025 Nucl. Mater. Energy 45 102036.
14. Fu Jia et al 2012 Plasma Sci. Technol. 14 1048
15. Bortolon A. et al 2019 Nucl. Mater. Energy 19 384
16. Hanna Schamis et al 2025 Nucl. Fusion 65 086037
17. Жүнісбек С.А., Чектыбаев Б.Ж., Садыков А.Д., Жаксыбаева А.А., Женис Қ., Мадиянова Ә.Н. «Результаты спектроскопических измерений плазменных разрядов на Токамаке КТМ». Вестник НЯЦ РК. 2023;(3):193. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-3-193>.

КТМ ТОКАМАГЫН БОР АТОМДАРЫМЕН ҚАНЫҚТЫРУ ӘДІСТЕМЕСІН ӘЗІРЛЕУ

**А. Ж. Дүйсен^{1*}, Б. Ж. Чектыбаев^{1,2}, А. Г. Коровиков¹, Е. А. Кашикбаев^{1,2},
В. С. Полковников¹, Д. А. Ольховик¹, А. Т. Кусайнов¹, Қ. Женис¹**

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

²Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан

* Байланыс үшін e-mail: duysen@nnc.kz

Бұл жұмыста токамак типті қондырғыларды бор атомдарымен қанықтыруды қолдану және оның ерекшеліктеріне әдеби шолу жасалды, сондай-ақ карборан негізіндегі боронизациялау жүйесін пайдалана отырып, КТМ токамагының вакуумдық камерасын плазмалық эксперименттерге дайындау әдістемесі негізделді. Солғын разряд жағдайындағы процестің техникалық жүзеге асырылуы, соның ішінде қыздырылатын ресивері бар бу беру жүйесінің және КТМ токамагындағы тасымалдау трактының конструкциясы сипатталған. Масс-спектрометрия мен бордың сәулелену сызығын оптикалық мониторингілеуді біріктіретін, орта тазалығын жедел бақылауға арналған әзірленіп жатқан диагностикалық кешен жобасы ұсынылды.

Түйін сөздер: *токамак, КТМ, бор атомдарымен қанықтыру, солғын разряд, бірінші қабырға.*

DEVELOPMENT OF BORONIZATION METHODOLOGY FOR THE KTM TOKAMAK

**A.Zh. Duysen^{1*}, B.Zh. Chektybaev^{1,2}, A.G. Korovikov¹, Ye.A. Kashikbayev^{1,2},
V.S. Polkovnikov¹, D.A. Olkhovik¹, A.T. Kussainov¹, K. Zhenis¹**

¹Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²NP JSC "Shakarim University", Semey, Kazakhstan

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

In this paper, a literature review on the application and features of boronization in tokamak-type devices is presented, and a methodology for preparing the vacuum chamber of the KTM tokamak for plasma experiments using a carborane-based boronization system is substantiated. The technical implementation of the process under glow discharge conditions is described, including the design of the vapor delivery system with a heated receiver and the transport line on the KTM tokamak. A project of the diagnostic complex under development for real-time monitoring of the environment purity, combining mass spectrometry and optical monitoring of the boron emission line, is presented.

Keywords: *tokamak, KTM, boronization, glow discharge, first wall.*