

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-3-192-200>

УДК 537.533.72; 537.632/.636; 533.9.07

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ОТКЛОНЕНИЯ ПЕРВИЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКЕ

А. Ж. Миниязов^{1,2}, М. К. Скаков³, Т. Р. Туленберген^{1,2,4*}, Б. Ж. Чектыбаев², И. А. Соколов^{1,2,4}, А. В. Градобоев⁵

¹ «Центр технологических компетенций в сфере водородной энергетики»
филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

² Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

³ РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан

⁴ НАО «Шәкәрім Университеті», Семей, Казахстан

⁵ Томский политехнический университет, Томск, Россия

* E-mail для контактов: tulenbergenov@nnc.kz

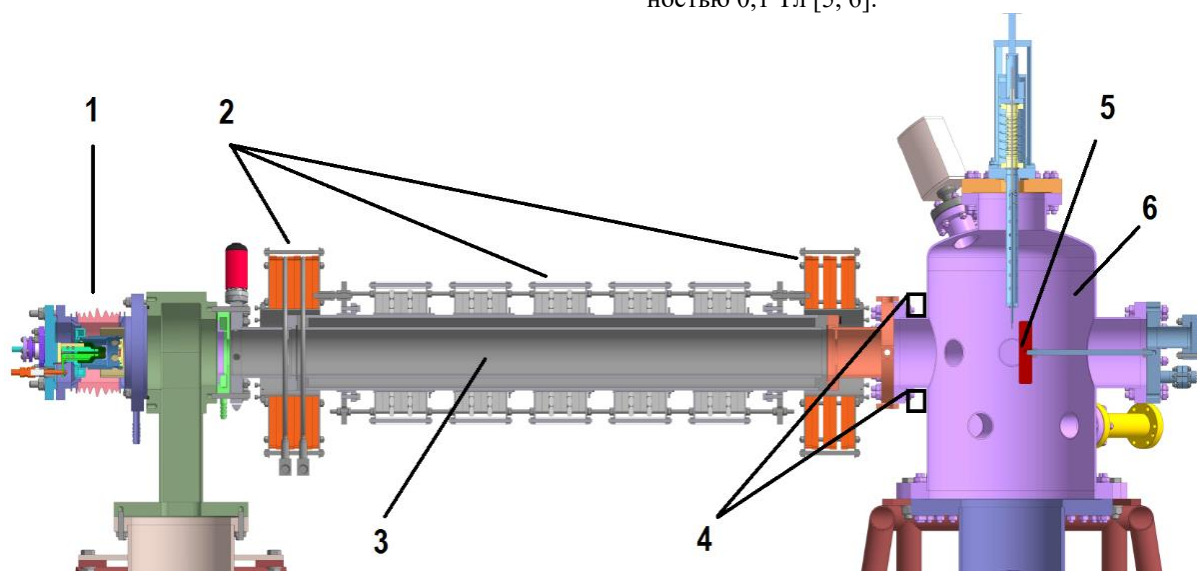
Работа посвящена разработке электромагнитной системы отклонения первичного электронного пучка на плазменно-пучковой установке (ППУ). Система, состоящая из двух пар взаимно перпендикулярных катушек, обеспечивает двухмерное управление положением пучка, что позволяет снизить удельную тепловую мощность, увеличить общую мощность пучково-плазменного разряда (ППР), проводить нагрев и рекристаллизационный отжиг с минимальным градиентом температуры. Рассчитаны параметры катушек для создания магнитной индукции до 62,66 мТл. Визуально подтверждено отклонение электронного пучка на поверхности металлической пластины, подтверждающее работоспособность и функциональную гибкость электромагнитной системы при управлении. Эксперименты в режиме ППР с применением метода дифференциального коллектора (апертурный зонд) показали увеличение ионного тока с 9 мА до 12 мА при ускоряющем напряжении электронного пучка 5 кВ, давлении дейтерия 1 мТорр и амплитуде развертки 27,95 дБ.

Ключевые слова: КТМ, ППУ, ППР, электромагнитная система, электронный пучок, развертка.

ВВЕДЕНИЕ

В поддержку исследований на токамаке КТМ для проведения маломасштабных экспериментальных работ в области взаимодействия плазмы с поверхностью кандидатных материалов, а также тестирования диагностического оборудования в НЯЦ РК создана специализированная плазменно-пучковая установка (ППУ), схема которой показана на рисунке 1 [1–4].

ППУ является универсальным инструментом, который позволяет проводить испытание материалов в условиях комплексного воздействия на них как плазменного потока, так и мощной тепловой нагрузки, создаваемой с помощью электронного пучка. ППУ состоит из трех основных узлов: электронной пушки, разрядной камеры и электромагнитной системы для создания продольного магнитного поля с напряженностью 0,1 Тл [5, 6].



1 – электронная пушка; 2 – электромагнитная система; 3 – разрядная камера; 4 – расположение системы отклонения электронного пучка; 5 – коллектор; 6 – камера взаимодействия.

Рисунок 1. Схема плазменно-пучковой установки

В вакуумном режиме, без напуска газа на мишень, в продольном магнитном поле транспортируется компенсированный электронный пучок. С его помощью можно изменять в широких пределах как общую мощность до 10 кВт, так и удельный тепловой поток на поверхность испытываемых материалов до 1 ГВт/м² при диаметре электронного пучка 3 мм. Это обеспечивает проведение широкого спектра теплофизических экспериментов, а также возможность проведения отжига материалов в контролируемых условиях.

В режиме пучково-плазменного разряда (ППР), при напуске рабочего газа в камеру взаимодействия, можно варьировать параметры генерируемой плазмы за счет изменения рабочего давления, тока и энергии электронов в первичном пучке, а также индукции магнитного поля электромагнитной системы. Общий ионный выход на мишень в режиме ППР может достигать 2 А.

ППР генерирует неравновесную плазму с выраженным надтепловым «хвостом» в энергетическом распределении электронов. Подобные высокоэнергетические группы электронов в силу особенностей работы токамака появляются и в периферийной плазме. Они могут приводить к появлению нестационарных, динамических дебаевских слоев с большой амплитудой изменения приэлектродных полей и токов, что кардинальным образом изменяет характер плазменно-поверхностного взаимодействия и переносов в периферии. ППР по своим специфическим свойствам позволяет достаточно просто проводить моделирование таких эффектов [7–10].

Для реализации методик проведения многих имитационных экспериментов необходимо перемещать по поверхности коллектора первичный электронный пучок. Это может быть удобно для управления плотностью потока энергии на поверхности коллектора при форсировании мощности ППР. Снижение удельной тепловой нагрузки на поверхности коллектора в результате бомбардировки первичными электронами, позволит значительно увеличить общую мощность ППР, а следовательно, плотность плазмы, степень ионизации и плотность ионного тока. Также отклонение электронного пучка позволит проводить рекристаллизационный отжиг образцов с минимальным градиентом температуры на поверхности. Для этих целей необходимо разработать, смонтировать, настроить и испытать электромагнитную систему отклонения первичного электронного пучка на ППУ.

Системы отклонения электронного пучка являются ключевыми компонентами в широком спектре технологий, включая электронно-лучевую обработку, ускорителей заряженных частиц и электронную микроскопию. Эти системы обеспечивают управление траекторией электронного пучка за счет электромагнитных или электростатических полей, что позволяет точно позиционировать пучок для конкретных задач. Они используют электромагниты для создания направленного магнитного поля, которое отклоняет

пучок за счет силы Лоренца. Современные исследования, например, представленные в [11], посвящены оптимизации геометрии и токовых параметров электромагнитных катушек с целью минимизации аберраций. В ускорительных установках, таких как проект NICA, магнитные отклоняющие устройства применяются для управления пучками в системах электронного охлаждения, как описано в работе [12].

Применение в современных технологиях охватывает электронно-лучевую сварку и наплавку, где точное управление положением пучка важно для формирования функциональных покрытий. В статье [13] подчеркивается значимость отклоняющих систем при нанесении износостойких слоев. В электронных микроскопах улучшение разрешающей способности связано с развитием точных отклоняющих устройств, как показано в [14].

Современные достижения включают интеграцию с цифровыми управляющими системами. Так, [15] сообщает об использовании алгоритмов машинного обучения для адаптивного управления в ускорителях. Кроме того, работы, опубликованные в [16, 17], фокусируются на миниатюризации отклоняющих систем для компактных электронно-лучевых устройств.

Учитывая вышеизложенное, можно выделить несколько задач, которые решаются разработкой электромагнитных систем в плазменно-пучковых установках. Эти задачи связаны с высокими тепловыми нагрузками, сложностью отклонения пучка, автоматизации управления и т.д.

Таким образом целью работы является разработка и экспериментальная валидация электромагнитной системы отклонения первичного электронного пучка на ППУ, предназначенной для моделирования взаимодействия плазмы с поверхностью, повышения плотности ионного тока, снижения локальной тепловой нагрузки и обеспечения равномерного нагрева для условий, приближенных к периферии плазмы токамака КТМ.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОТКЛОНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ППУ

Для реализации пространственного (двухмерного) управления положением пучка в плоскости мишени отклоняющая система должна состоять из двух пар катушек, расположенных взаимно перпендикулярно. Это позволяет формировать управляемые магнитные поля по горизонтальной (X) и вертикальной (Y) осям, каждое из которых воздействует на пучок в своей плоскости и обеспечивает его отклонение в заданном направлении.

Схема размещения отклоняющих катушек на камере взаимодействия, а также геометрические параметры траектории электронного пучка (радиус R , угол отклонения θ , расстояние до мишени L , ширина магнитного поля катушек z и высота отклонения h) приведены на рисунке 2.

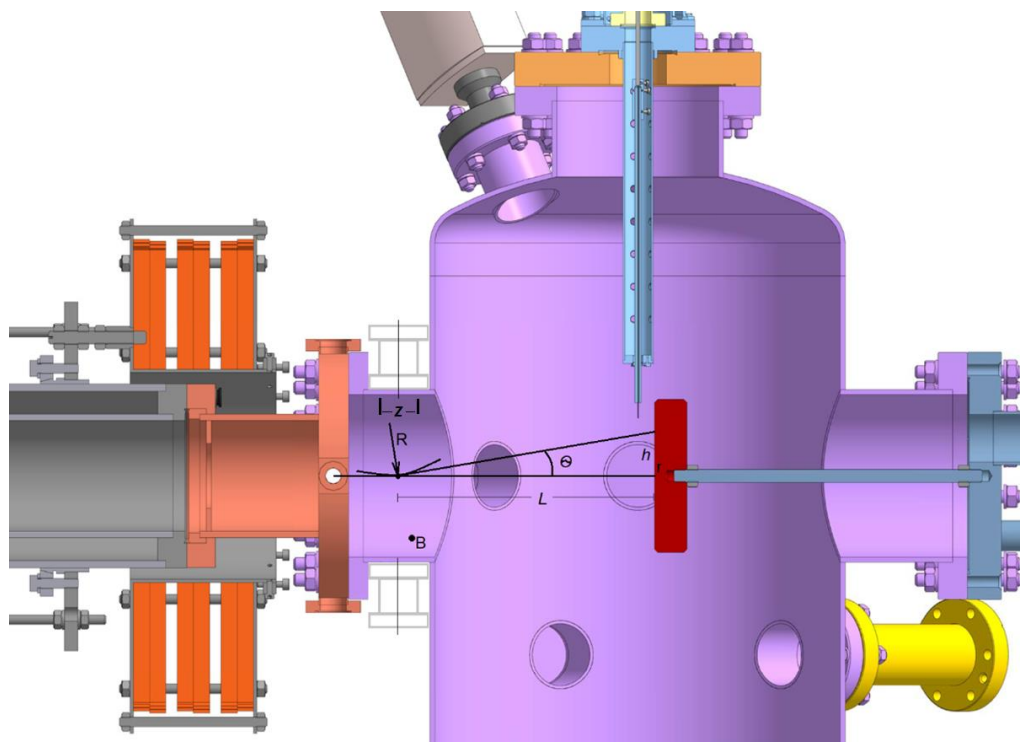


Рисунок 2. Схема размещения отклоняющих катушек и геометрия отклонения электронного пучка

В данных условиях траектория электрона представляет собой дугу окружности с радиусом R . Радиус окружности определяется по известному выражению (1), полученному из формулы силы Лоренца [8],

$$R = \frac{m_e \cdot v_e}{eB}, \quad (1)$$

где B – величина индукции отклоняющего поля, имеющая постоянное значение на всей протяженности поля, v_e – скорость движения электрона, ускоренного под действием разности потенциалов U и движущегося по инерции:

$$v_e = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}.$$

Подставляя в (1), получаем выражение для радиуса кривизны траектории электрона:

$$R = \frac{m_e}{eB} \cdot \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} = \frac{\sqrt{2m_e U / e}}{B}.$$

Для оценки линейного отклонения электрона h после прохождения области с магнитным полем шириной z и дальнейшего дрейфа на расстоянии L , можно воспользоваться приближением малых углов. При этом траектория электрона приближённо описывается параболой, а высота отклонения выражается через:

$$h \approx \frac{eBzL}{2m_e v_e} = \frac{BzL}{2} \cdot \sqrt{\frac{m_e}{2eU}}.$$

Отсюда выражение для магнитной индукции, необходимой для отклонения электрона на заданную величину h , принимает вид:

$$B = \frac{2h}{zL} \cdot \sqrt{\frac{2m_e U}{e}}. \quad (2)$$

При заданных значениях ускоряющего напряжения $U \in [100 \text{ В}, 10000 \text{ В}]$, из выражения (2) можно определить требуемую величину магнитной индукции B . В таблице 1 приведены результаты расчета магнитной индукции для различных ускоряющих напряжений, при отклонении электронного пучка на $h = 5 \text{ мм}$, эффективной ширине поля $z = 15 \text{ мм}$ и расстоянии до мишени $L = 155 \text{ мм}$.

Таблица 1. Результаты расчета магнитной индукции для различных ускоряющих напряжений

Ускоряющее напряжение U , В	Необходимая индукция B , мТл
100	6,27
500	14,01
1 000	19,81
2 000	28,01
5 000	44,31
10 000	62,66

Полученные значения будут использоваться в дальнейшем для расчета параметров катушки. Отметим, что даже при ускоряющем напряжении 10 кВ необходимая индукция не превышает $\sim 62,7 \text{ мТл}$, что упрощает конструкцию катушек и снижает требования к току и системе охлаждения. При проектировании системы важно учитывать, что увеличение

напряжения требует более пологой траектории и большего радиуса отклонения.

Поскольку для управления пучком требуется пара катушек, расчет следует вести для одной катушки, а затем учесть конфигурацию пары. Каждая пара катушек функционирует по принципу диполя, создавая почти однородное магнитное поле в центральной зоне, через которую проходит пучок.

С целью реализации пространственного управления положением электронного пучка на мишени была спроектирована система, показанная на рисунке 3, из двух пар взаимно перпендикулярных электромагнитных катушек, формирующих магнитные поля в направлениях X и Y.

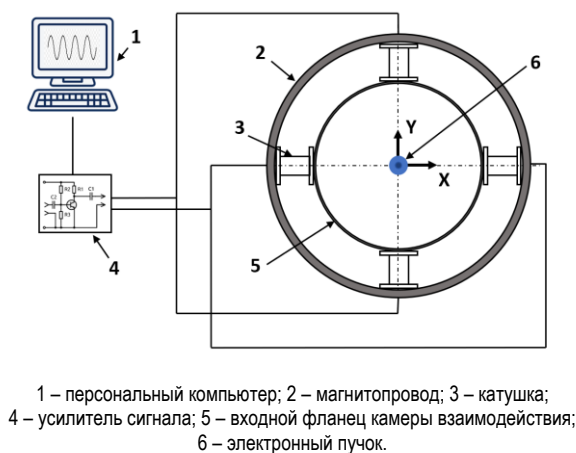


Рисунок 3. Схема электромагнитной системы отклонения первичного электронного пучка на ППУ

Конструкция каждой катушки представляет собой соленоид с сердечником из шихтованных металлических пластин, размещенный в непосредственной близости мишенного узла.

Задача состоит в определении параметров соленоида (диаметра провода и количества витков), обеспечивающего требуемую индукцию $B_{\text{макс}} = 62,7 \text{ мТл}$ в заданных габаритах, обусловленных конструкцией камеры взаимодействия ППУ. Каждая катушка имеет длину $l = 50 \text{ мм}$, внутренний радиус $r_{\text{вн}} = 16 \text{ мм}$ и внешний радиус $r_{\text{внеш}} = 32 \text{ мм}$. Расстояние между катушками в одной паре составляет 100 мм, что обеспечивает условие формирования магнитного поля, близкого к однородному, в центральной части между катушками.

Индукция в центре соленоида с ферромагнитным сердечником из трансформаторной стали приближенно выражается как:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N}{l} \cdot I,$$

где μ_0 – магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$; μ_r – относительная магнитная проницаемость сердечника (≈ 500); N – число витков; I – ток через катушку.

Подставим данные в выражение для магнитодвижущей силы и выразим произведение $N \cdot I$:

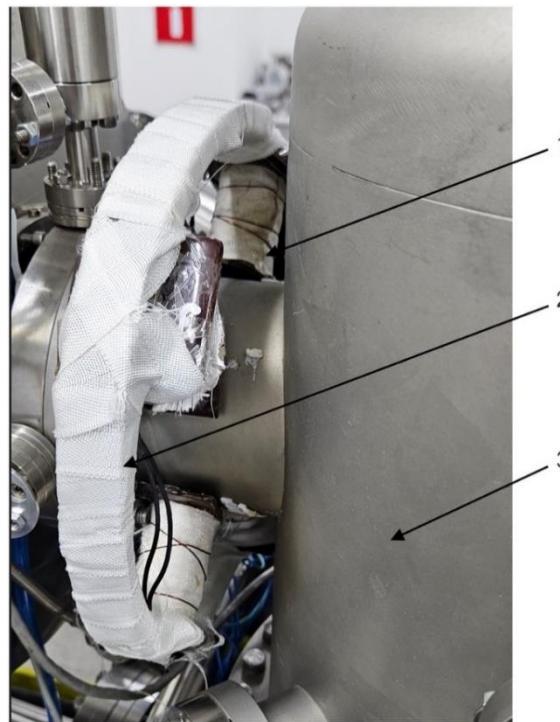
$$N \cdot I = \frac{B \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{62,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 500} \approx 4,99 \text{ А·витков}.$$

Таким образом, для создания требуемого магнитного поля необходимо обеспечить магнитодвижущую силу порядка 4,99 ампер-витков. Эта величина соответствует общей магнитодвижущей силе, необходимой для создания заданной магнитной индукции в центральной зоне. Если в системе работают две одинаковые катушки, каждая из которых вносит одинаковый вклад в общее магнитное поле, то:

$$N \cdot I_{\text{одной катушки}} = \frac{4,99}{2} = 2,49 \text{ А·витков}.$$

При заданных габаритных ограничениях (внутренний радиус катушки – 16 мм, внешний – 32 мм, толщина намотки – 5 мм, длина катушки по оси – 50 мм) и использовании эмалированного провода диаметром 0,65 мм, доступная намотка допускает размещение до 7 слоев по толщине и до 77 витков в каждом слое вдоль оси катушки, поэтому максимально возможное число витков составляет порядка 539.

После определения ключевых параметров отклоняющей электромагнитной катушки были изготовлены и установлены две пары катушек, которые впоследствии были смонтированы на камере взаимодействия. Внешний вид отклоняющей электромагнитной системы для ППУ представлен на рисунке 4.



1 – катушки; 2 – магнитопровод; 3 – камера взаимодействия

Рисунок 4. Внешний вид электромагнитной системы отклонения первичного электронного пучка

Для управления системой используется специальный двухканальный усилитель тока, питающий попарно электромагнитные катушки отклонения и программное обеспечение, задающее закон отклонения пучка во времени, путем изменения амплитуды, частоты и сдвига сигнала по фазам.

В ходе наладочных работ была проведена серия измерений магнитной индукции одной катушки системы в зависимости от амплитуды управляющего сигнала. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты измерения магнитной индукции для различных значений амплитуды

Амплитуда, дБ	$U_{\text{кат}}, \text{В}$	$B_{\text{кат}}, \text{мТл}$
0	0	0
9,5	1,3	4,5
19	3,7	11,7
27,95	9,8	30,6

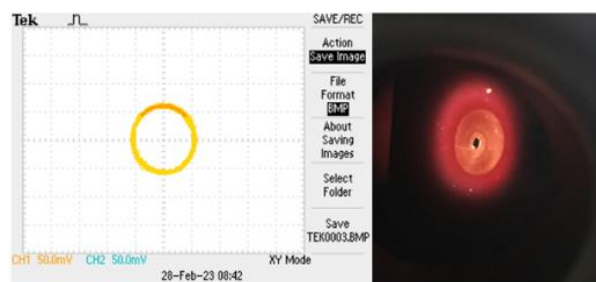
Установлено, что с увеличением амплитуды сигнала наблюдается рост как напряжения на катушке, так и создаваемой ею магнитной индукции. Расчёт показывает, что при достижении экспериментальной индукции порядка 30,6 мТл, возможно эффективное отклонение электрона на 5 мм при ускоряющем напряжении до ~2000 В.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках экспериментальных работ была выполнена проверка работоспособности разработанной электромагнитной системы отклонения первичного электронного пучка. Испытания проводились в режиме электронного нагрева ППУ при постоянном ускоряющем напряжении. Такой режим был выбран для оценки эффективности системы развертки и ее точности в управлении положением пучка на поверхности мишени путем изменения параметров тока в катушках.

На рисунке 5 представлено визуальное подтверждение отклонения пучка на поверхности металлической пластины, а также соответствующие осциллограммы сигналов управления в режиме XY. В данном режиме сигнал одного канала подается на горизонтальное отклонение (ось X), а второго – на вертикальное (ось Y), что позволяет реализовать различные траектории движения пучка в зависимости от формы и параметров управляющих сигналов.

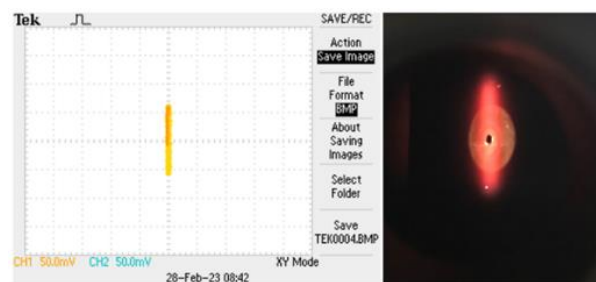
При подаче на оба канала синусоидальных сигналов одинаковой амплитуды и частоты, но со сдвигом фаз на 90° , система формирует круговую траекторию движения электронного пучка, как показано на рисунке 5а. В случае, если амплитуда одного из сигналов равна нулю, отклонение пучка происходит строго по одной координате – горизонтальной или вертикальной, в зависимости от активного канала, что проиллюстрировано на рисунках 5б и 5в соответственно. Таким образом, варьируя значениями амплитуды, частоты и сдвигом фаз, можно задавать различные формы воздействия электронным пучком.



а) отклонение по окружности



б) отклонение по горизонтали



в) отклонение по вертикали



г) отклонение по прямоугольному сечению

Рисунок 5. Отклонение первичного электронного пучка электромагнитной системы ППУ

При подаче сигналов различной частоты или формы на управляющие каналы формируются более сложные траектории, включая прямоугольные и эллиптические формы сканирования, как показано на рисунке 5г, которые можно использовать для реализации пространственной модуляции пучка при различных технологических задачах. Проведенные испытания подтвердили работоспособность и функциональную гибкость электромагнитной системы в условиях эксперимента.

Экспериментальные исследования были проведены на ППУ с целью оценки эффективности разра-

ботанной электромагнитной системы отклонения первичного электронного пучка в режиме ППР. Основной задачей являлось изучение влияния отклонения пучка на ионный ток и удельную тепловую мощность, создаваемую на мишени, при различных значениях ускоряющего напряжения и амплитуды сигнала развертки.

Для определения плотности ионного потока использовался метод дифференциального коллектора (апертурный зонд), путем измерения тока при подаче отрицательного напряжения на мишень. Дифференциальный коллектор во время проведения измерений показан на рисунке 6. Отверстие дифференциального коллектора имеет площадь сечения $6,54 \text{ мм}^2$.

Эксперимент проводился при давлении рабочего газа (дейтерия) 1 мТорр, разных значениях амплитуды сигнала развертки: без отклонения (0 дБ), с отклонением (9,5 дБ, 19 дБ и 27,95 дБ) и разных значениях ускоряющего напряжения в диапазоне от 1000 В до 5000 В с шагом 1000 В. На мишень подавалось напряжение смещения минус 100 В. Результаты измерений электронного (I_e) и ионного (I_i)

токов, а также плотность ионного потока (j_i) в зависимости от ускоряющего напряжения и амплитуды сигнала развертки приведены в таблице 3. Погрешность измерений электронного и ионного токов обусловлена характеристиками измерительного прибора, при этом максимальная относительная погрешность составило не более $\pm 5\%$.

Таким образом, установлено, что электронный ток I_e монотонно возрастает с увеличением ускоряющего напряжения от 7 мА при 1000 В до 62 мА при 5000 В. Это соответствует увеличению энергии электронов, что усиливает интенсивность разряда и генерацию плазмы в режиме ППР. Ионный ток без отклонения (0 дБ) увеличивается с ростом ускоряющего напряжения от 1 мА при 1000 В до 9 мА при 5000 В. Это связано с увеличением энергии электронов, что усиливает ионизацию водорода в разрядной камере. Значительный рост ионного тока наблюдается при напряжениях выше 3000 В (с 3 мА до 8–9 мА), что указывает на переход к более интенсивному режиму ионизации.

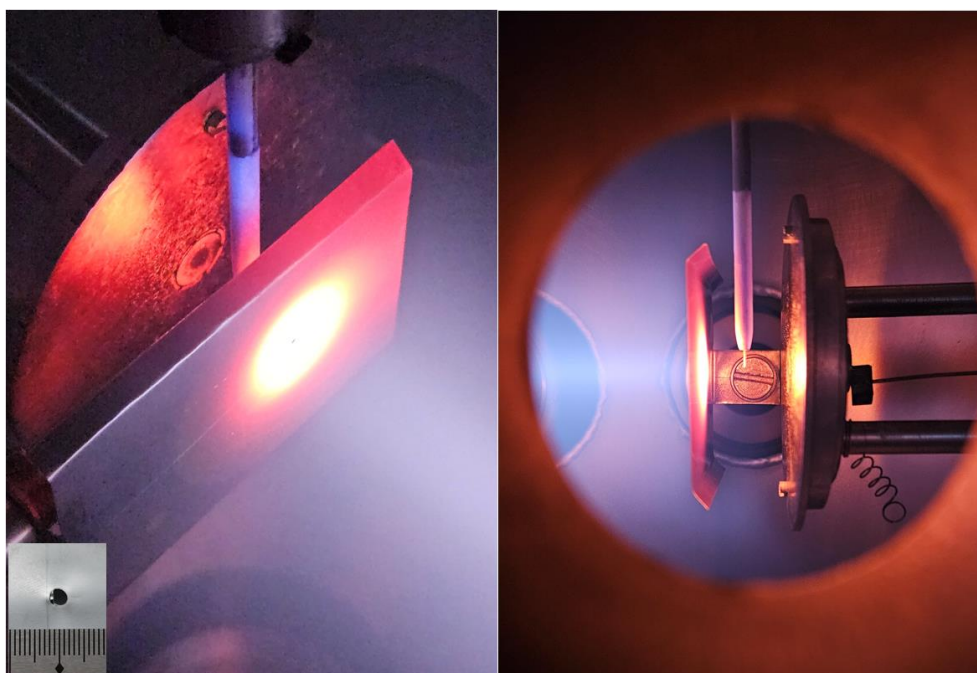


Рисунок 6. Дифференциальный коллектор в камере взаимодействия ППУ

Таблица 3. Результаты измерений электронного, ионного токов и расчет плотности ионного потока в зависимости от ускоряющего напряжения и амплитуды сигнала развертки

Ускоряющее напряжение U , В	Электронный ток I_e , мА	без отклонения (0 дБ)		с отклонением (9,5 дБ)		с отклонением (19 дБ)		с отклонением (27,95 дБ)	
		I_i , мА	j_i , А/м ²	I_i , мА	j_i , А/м ²	I_i , мА	j_i , А/м ²	I_i , мА	j_i , А/м ²
1 000	7	1	152,91	1	152,91	1	152,91	1	152,91
2 000	17	2	305,81	2	305,81	2	305,81	2	305,81
3 000	28	3	458,72	3	458,72	3	458,72	3	458,72
4 000	43	8	1223,24	7	1070,34	9	1376,15	9	1376,15
5 000	62	9	1376,15	9	1376,15	11	1681,96	12	1834,86

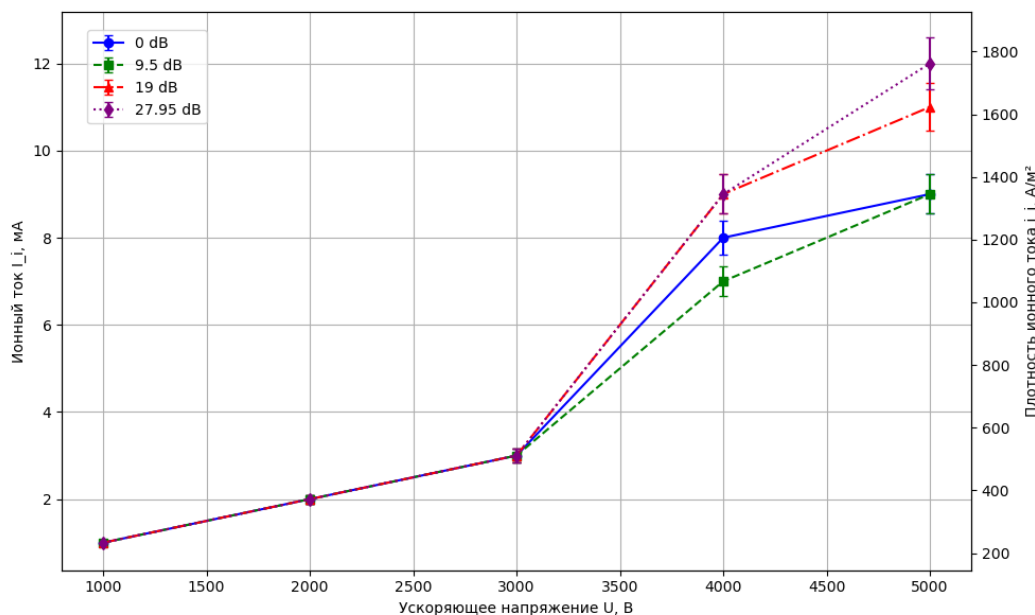


Рисунок 7. Зависимость ионного тока и плотности ионного тока от ускоряющего напряжения при разных амплитудах сигнала развертки

Зависимость ионного тока и плотности ионного тока от ускоряющего напряжения при различных амплитудах сигнала развертки представлена на графике, показанного на рисунке 7.

При низких напряжениях (1000–3000 В) включение системы отклонения (9,5 дБ, 19 дБ, 27,95 дБ) не приводит к изменению ионного тока, который остается на уровне 1–3 мА. Это может быть связано с тем, что при низких энергиях электронов влияние отклонения пучка на ионизацию отсутствует, либо слишком мала и скорее всего обусловлена погрешностью измерения прибором. При напряжениях 4000 В и выше влияние развертки становится заметным. Например, при 5000 В ионный ток увеличивается с 9 мА (без развертки) до 12 мА (при 27,95 дБ). Повышение ускоряющего напряжения выше 5000 В было ограничено температурой плавления материала дифференциального коллектора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распределение энергии пучка по большей площади мишени снижает локальный нагрев, что позволяет увеличить общую мощность разряда без риска термического повреждения мишени. Это особенно важно для моделирования экстремальных тепловых нагрузок, характерных для токамака КТМ или проведения рекристаллизационного отжига с минимальным градиентом температуры.

Полученные результаты подтверждают, что разработанная авторами электромагнитная система отклонения эффективно влияет на характеристики ППР. Увеличение ионного тока при включении развертки (например, с 9 мА до 12 мА при 5000 В и 27,95 дБ) свидетельствует об усилении ионной составляющей разряда. Это связано с тем, что

отклонение пучка увеличивает эффективную площадь взаимодействия электронов с рабочим газом (дейтерием), что способствует более интенсивной ионизации. Данный эффект особенно выражен при высоких ускоряющих напряжениях (4000–5000 В), где энергия электронов достаточна для значительного увеличения плотности плазмы.

В заключение следует отметить, что повышение ускоряющего напряжения свыше 5000 В было ограничено температурой плавления материала дифференциального коллектора, дальнейшая модернизация коллектора с применением системы охлаждения в сочетании с системой отклонения электронного пучка позволит существенно увеличить мощность плазменного пучкового разряда и, соответственно, ионную составляющую.

Результаты данной работы направлены на развитие электромагнитных систем отклонения, включая их оптимизацию и интеграцию с цифровыми технологиями, что значительно расширяет возможности прецизионного управления электронными пучками в различных научных и промышленных направлениях.

Работа выполнена в Национальном ядерном центре Республики Казахстан в рамках научно-технической программы № BR23891779 по теме «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахском материаловедческом токамаке КТМ».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Kazakhstan Material Testing Tokamak KTM Construction [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: <https://www.nnc.kz/ru/news/show/348> (дата обращения: 22.03.2025 г.).
2. Патент РК на полезную модель № 2080. Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой / Колодешников А.А., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Туленберген Т.Р. и др. – опубл. 15.03.2017. – Бюл. № 5. [Patent RK na poleznuyu model' No. 2080. Imitatsionnyy stand s plazmenno-puchkovoy ustanovkoy / Kolodeshnikov A.A., Zuev V.A., Ganovich D.A., Tulenbergenov T.R. i dr. – opubl. 15.03.2017. – Byul. No. 5. (In Russ.)]
3. Chektybayev B.Zh., Skakov M.K., Tulenbergenov T.R., Sokolov I.A., Miniyazov A.Zh., Zhanbolatova G.K., Nauryzbayev R.Zh. Measurement of plasma parameters in the PBI using the Langmuir probe // Fusion Engineering and Design. – August 2024. – Vol. 205. – P. 114546. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114546>
4. Chektybayev B., Zhunisbek S., Kashikbayev Ye, Duisen A., Sokolov I., Tulenbergenov T. First spectroscopic studies in the plasma-beam installation // AIP Advances. – 2024. – Vol. 14. – P. 095218. <https://doi.org/10.1063/5.0224254>
5. Kurnaev V., Vizgalov I., Gutorov K., Tulenbergenov T., Sokolov I., Kolodeshnikov A., Ignashev V., Zuev V., Bogomolova I., Klimov N. Investigation of plasma-surface interaction at plasma beam facilities // Journal of Nuclear Materials. – 2015. – Vol. 463. – P. 228–232. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.076>
6. Tulenbergenov T.R., Skakov M.K., Miniyazov A.Zh., Sokolov I.A., Kaiyrdy G.K. The role of a simulation stand with a plasma-beam installation in studies of plasma-surface interaction // NNC RK Bulletin. – 2019. – Issue 4(80). – P. 51–58.
7. Coda, S. Diagnostic techniques for measuring suprathermal electron dynamics in plasmas // Review of Scientific Instruments. – 2008. – Vol. 79. – P. 10F501. <https://doi.org/10.1063/1.2966599>
8. Dadyka, D. I., & Anisimov, I. O. Ignition of the beam-plasma discharge in the initially neutral gas // Problems of Atomic Science and Technology. – 2018. – Vol. 116(4). – P. 204–207.
9. Savinov, V. P., Kruglov, M. S., Riaby, V. A., Chervyakov, A. V., & Yakunin, V. G. Plasma Interaction with Boundary Surfaces in Low-Pressure Radio-Frequency Capacitive Discharge // Physics of Atomic Nuclei. – 2019. – Vol. 82(10). – P. 1433–1436. <https://doi.org/10.1134/S106377881910017X>
10. Dadyka, D. I., & Anisimov, I. O. Quasi-stationary mode of the beam-plasma discharge // Problems of Atomic Science and Technology. – 2018. – Vol. 118(6). – P. 164–167.
11. A. A. Kaptanoglu, G. P. Langlois, M. Landreman, Topology optimization for inverse magnetostatics as sparse regression: Application to electromagnetic coils for stellarators // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2024. – Vol. 418. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116504>
12. L. V. Zinoviyev et al., Start of Electron Cooling System for the NICA Booster // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2018. – Vol. 15. – P. 745–748. <https://doi.org/10.1134/S1547477118070737>
13. Zenker, R. Modern electron beam technologies for soldering and surface treatment / R. Zenker, A. Buchwalder, N. Frenkler, S. Thiemer // Vakuum in Forschung und Praxis. – 2005. – Vol. 17. – P. 66–72. <https://doi.org/10.1002/vipr.200500247>
14. Momoyo Enyama, Ryuji Nishi, Hiroyuki Ito, Jun Yamasaki, Low-aberration ExB deflector optics for scanning electron microscopy // Microscopy. – 2023. – Vol. 72. – Issue 5. – P. 399–407. <https://doi.org/10.1093/jmicro/dfad001>
15. A. Scheinker, Adaptive machine learning for robust diagnostics and control of time-varying particle accelerator components and beams // Information (Switzerland). – 2021. – Vol. 12(4). – P. 181. <https://doi.org/10.3390/info12040161>
16. M. A. R. Krielaart, D. J. Maas, S. V. Loginov, P. Kruit, Miniature electron beam separator based on three stacked dipoles // Journal of Applied Physics. – 2020. – Vol. 127. <https://doi.org/10.1063/5.0008089>
17. R. Zenker, A. Buchwalder, N. Frenkler, S. Thiemer, Moderne Elektronenstrahltechnologien zum Fügen und zur Randschichtbehandlung. Modern Electron Beam Technologies for Soldering and Surface Treatment // Vakuum in Forschung und Praxis. – 2005. – Vol. 17. – Issue 2. – P. 66–72. <https://doi.org/10.1002/vipr.200500247>

ПСҚ БАСТАПҚЫ ЭЛЕКТРОНДЫ СӘУЛЕНІ АУЫТҚЫТУДЫҢ
ЭЛЕКТРОМАГНИТТІК ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ

А. Ж. Миниязов^{1,2}, М. Қ. Скаков³, Т. Р. Төленберген^{1,2,4*}, Б. Ж. Чектыбаев², И. А. Соколов^{1,2,4}, А. В. Градобоев⁵

¹ «Сутегі энергетикасындағы технологиялық құзыреттілік орталығы» ҚР ҰАО РМК АЭИ филиалы,
Курчатов, Қазақстан

² ҚР ҰАО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

³ «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК, Курчатов, Қазақстан

⁴ «Шәкәрім университет» КЕАҚ, Семей, Қазақстан

⁵ Томск политехникалық университеті, Томск, Ресей

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

Жұмыс плазмалық-сәулелік қондырғыда (ПСҚ) бастапқы электронды сәулені ауытқытатын электромагниттік жүйені әзірлеуге арналған. Өзара перпендикуляр орналасқан екі жұп катушкадан тұратын бұл жүйе сәуленің орнын екі өлшемде басқаруға мүмкіндік береді. Бұл меншікті жылу қуатын төмендетуге, пучок-плазмалық разрядтың (ППР) жалпы қуатын арттыруға, сондай-ақ температура градиенті аз болатын қыздыру мен рекристаллизациялық күйдіруді жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Магниттік индукциясы 62,66 мТл-ге дейін жететін катушкалардың параметрлері есептелді. Электронды сәуленің металл пластина бетінде ауытқуы визуалды түрде расталып, электромагниттік басқару жүйесінің жұмысқа қабілеттілігі мен функционалдық икемділігін дәлелдеді. ППР режимінде апертуралық зонд (дифференциалды коллектор) әдісін қолдана отырып жүргізілген эксперименттер электронды сәуле үшін 5000 В үдеткіш кернеуде, дейтерий қысымы 1 мТорр және развртка амплитудасы 27,95 дБ болған кезде иондық токтың 9 мА-дан 12 мА-ға дейін артқанын көрсетті.

Түйін сөздер: КТМ, ПСҚ, ППР, электромагниттік жүйе, электронды сәуле, ауытқу.

DEVELOPMENT OF AN ELECTROMAGNETIC SYSTEM
FOR DEFLECTING THE PRIMARY ELECTRON BEAM IN A PBI

A. Zh. Miniyazov^{1,2}, M. K. Skakov³, T. R. Tulenbergenov^{1,2,4*}, B. Zh. Chektybayev², I. A. Sokolov^{1,2,4}, A. V. Gradoboev⁵

¹ "Center for Technological Competence in Hydrogen Energy" branch IAE RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

² Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

³ RSE "National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan", Kurchatov, Kazakhstan

⁴ NP JSC "Shakarim University", Semey, Kazakhstan

⁵ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

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

The work is dedicated to the development of an electromagnetic system for deflecting the primary electron beam in a plasma-beam installation (PBI). The system, consisting of two pairs of mutually perpendicular coils, enables two-dimensional control of the beam position, which allows for a reduction in specific thermal power, an increase in the total power of the beam-plasma discharge (BPD), and the implementation of heating and recrystallization annealing with a minimal temperature gradient. The coil parameters were calculated to generate a magnetic induction of up to 62.66 mT. The deflection of the electron beam on the surface of a metal plate was visually confirmed, demonstrating the operability and functional flexibility of the electromagnetic control system. Experiments in BPD mode using the differential collector method (aperture probe) showed an increase in ion current from 9 mA to 12 mA at an electron beam accelerating voltage of 5000 V, a deuterium pressure of 1 mTorr, and a deflection amplitude of 27.95 dB.

Keywords: KTM, PBI, BPD, electromagnetic system, electron beam, deflection.