

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 533.922

ПЕННИНГОВСКИЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ В СИСТЕМАХ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ

© 2024 г. И. А. Прокуратов^а, Ю. В. Михайлов^а, Б. Д. Лемешко^а, И. В. Ильичев^а,
Т. А. Григорьев^а, А. К. Дулатов^{а, *}, Д. И. Юрков^а

^аВсероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова
Россия, 127030, Москва, ул. Сушевская, 22
*e-mail: akdulatov@vniia.ru

Поступила в редакцию 30.06.2023 г.

После доработки 01.08.2023 г.

Принята к публикации 12.09.2023 г.

Изучены характеристики пеннинговских источников ионов (ПИИ) применительно к их использованию в системе инерциального электростатического удержания плазмы (ИЭУП) на базе двухэлектродной сферической камеры. В камере ИЭУП при ее заполнении дейтерием за счет многократных осцилляций ионных пучков через газоплазменную мишень внутри центрального электрода реализуется пучково-мишенный механизм генерации нейтронного излучения. В данной статье на основе метода расчета выхода нейтронов систем ИЭУП сформулированы требования к ПИИ для обеспечения выхода нейтронов с энергией 2.5 МэВ в диапазоне 10^6 – 10^7 нейтр./с. Проведено расчетно-экспериментальное изучение режимов горения разряда в ПИИ в зависимости от конфигурации внешнего магнитного поля, а также сравнение токов в ПИИ и вытягиваемых токов на центральный электрод камеры ИЭУП в диапазоне давлений от 0.1 до 10 мТорр. Обосновано оптимальное количество ПИИ в рассматриваемой сферической камере ИЭУП.

DOI: 10.31857/S0032816224020108 EDN: QSTUBO

1. ВВЕДЕНИЕ

Системы инерциального электростатического удержания плазмы (ИЭУП) получили распространение как источники потоков нейтронного излучения при реализации в них реакций ядерного синтеза дейтерия с дейтерием (DD), дейтерия с тритием (DT), сопровождающихся генерацией нейтронов с энергией 2.5 МэВ и 14 МэВ соответственно, или трития с тритием (TT) с широким энергетическим спектром нейтронов (диапазон 0–9 МэВ). Такие системы представляют собой двухэлектродные сферические либо цилиндрические камеры с сетчатым внутренним электродом с газоплазменной мишенью внутри него и осциллирующими через мишень ионами. Внешний электрод (анод) сплошной, он заземлен и обычно является корпусом прибора. Внутренний электрод (катод) выполняется в виде сетки, на него подается высокое напряжение отрицательной полярности. Конструктивно

катод может выполняться в виде сетки [1, 2], набора шпилек [3], системы колец [4] и др., он может иметь различные конструктивные решения с главной задачей — обеспечить максимальную прозрачность для ускоренных ионов. Ионы в камере ИЭУП образуются в пространстве между анодом и катодом (или инжектируются туда из ПИИ), часть из них, ускоряясь в межэлектродном промежутке, попадает в центральную область (внутри катода), проходит ее насквозь, испытывает торможение встречным электрическим полем и впоследствии повторно ускоряется к центру. Многократные осцилляции ионов повышают вероятность их столкновений друг с другом и с нейтральным газом, обеспечивая генерацию нейтронного излучения в ходе реакций $D(d,n)He^3$, $D(t,n)He^4$ или $T(t,2n)He^4$.

За счет использования газоплазменной мишени системы ИЭУП обладают большим ресурсом работы (тысячи часов), они также находят

свое применение в областях активационного анализа веществ [5], нейтронной радиографии и спектроскопии [6, 7], исследованиях процессов в высоковольтных газовых разрядах и протекания реакций ядерного синтеза. Уровень потока нейтронов в системах ИЭУП лежит в диапазоне от 10^4 до 10^{10} нейтр./с [8] при использовании DD- и DT-реакций в зависимости от характеристик системы и поставленных задач. В рассматриваемой работе изучаются использование только DD-реакций и генерация нейтронов с энергией 2.5 МэВ. Для нейтронов с энергией 2.5 МэВ выход нейтронов, как правило, составляет 10^6 – 10^7 нейтр./с, что обеспечивает решение практических задач, надежность и большой ресурс работы без необходимости реализации предельных режимов работы, а также приемлемую потребляемую мощность (порядка 100–1000 Вт) и возможность повышения уровня выхода примерно на два порядка в случае перехода на DT-смесь в качестве рабочего газа. Уровень выхода нейтронов систем ИЭУП напрямую связан с суммарным током осциллирующих ионов. Нарботка ионов может происходить либо в области горения тлеющего разряда в межэлектродном промежутке, либо с помощью внешних источников ионов, расположенных на корпусе камеры. Вторым вариантом является более надежным и контролируемым с точки зрения рабочих параметров, потому что, во-первых, инжектируемые ионы проходят всю разность потенциалов, прикладываемую между электродами камеры ИЭУП; во-вторых, имеется возможность тонкой регулировки рабочего режима за счет отдельной регулировки тока инжектируемых ионов ионного источника и ускоряющего напряжения системы ИЭУП; в-третьих, диапазон рабочих давлений подбирается так, чтобы газовый разряд в таких системах горел только в источниках ионов (в камере отсутствуют области горения паразитного разряда, в которых снижается эффективность работы).

В работе рассмотрена возможность применения пеннинговских источников ионов (ПИИ) для обеспечения ионного тока в камере ИЭУП. ПИИ представляет собой газоразрядную ячейку, в которой реализуется разряд с осциллирующими во внешнем магнитном поле электронами. В такой ячейке цилиндрический анод и два катода (катод и антикатод) помещены в продольное магнитное поле, направленное параллельно оси ячейки. За счет приложения

магнитного поля электроны колеблются внутри анода ячейки и эффективно ионизуют рабочий газ, т. е. в ПИИ извлечение ионов (в нашем случае D_2^+ и D^+) происходит из плазмы, образующейся при горении высоковольтного магнитосвязанного газового разряда низкого давления, горящего в скрещенных электрическом и магнитном полях специальной конфигурации. ПИИ отличаются универсальностью, надежностью, компактностью и простотой реализации, поэтому они удобны для использования в качестве источников ионов в системе ИЭУП.

В настоящей работе описан стенд со сферической камерой ИЭУП с ПИИ, расчетным путем сформулировано требование к суммарному току для обеспечения потока нейтронов порядка 10^6 нейтр./с (2.5 МэВ) и экспериментально получены достижимые значения токов ПИИ в зависимости от давления D_2 в камере и режимов горения разряда ПИИ.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД С КАМЕРОЙ ИЭУП

Экспериментальный стенд состоял из двух-электродной камеры ИЭУП с подключенным с одной стороны ПИИ, высоковольтного источника напряжения отрицательной полярности от 0 до –25 кВ, подключенного к центральному электроду камеры через высоковольтный вакуумный ввод, источника напряжения положительной полярности от 0 до 3 кВ, подключенного к аноду ПИИ через балластное сопротивление величиной 510 кОм, и системы откачки и напуска рабочего газа. Камера ИЭУП устанавливалась непосредственно на откачной вакуумный пост MiniTask Agilent Technologies через шибберный вакуумный затвор. Откачной пост состоит из мембранного форвакуумного и турбомолекулярного насосов. Откачка камеры ИЭУП осуществлялась до давления остаточных газов на уровне $6 \cdot 10^{-6}$ Торр. Контроль давления осуществлялся с помощью широкодиапазонного комбинированного (датчик Пирани используется совместно с инверсным магнетронным датчиком) вакуумного датчика MPG400 Inficon (точность измерения давления $\pm 30\%$, повторяемость $\pm 5\%$ от показаний). Датчик устанавливался непосредственно на камеру ИЭУП через патрубок длиной около 100 мм для исключения влияния постоянных магнитов из состава датчика на результаты исследований разряда в камере.

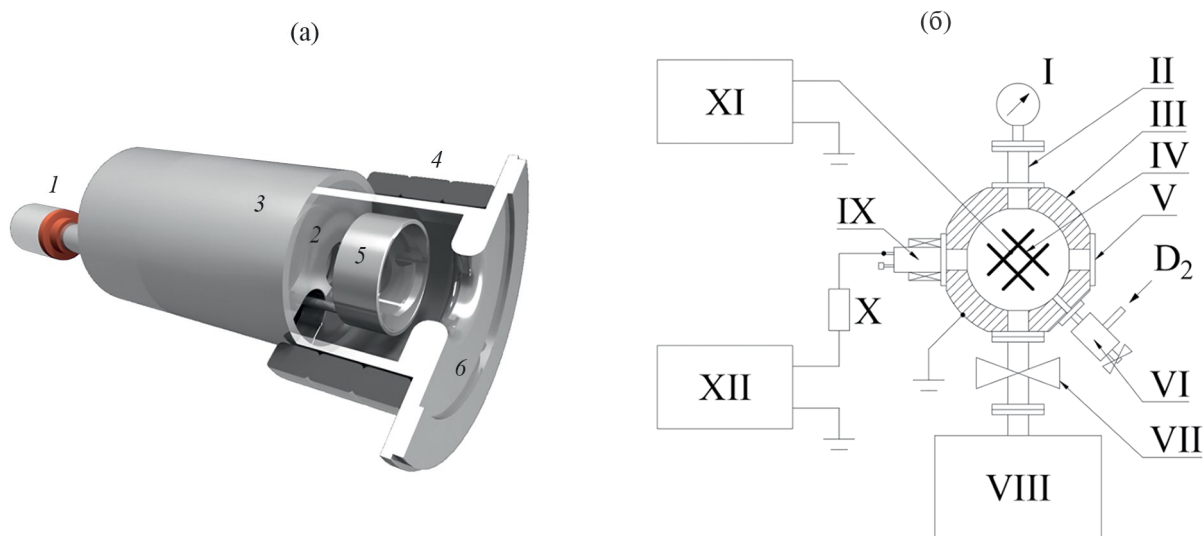


Рис. 1. а) Конструкция и устройство ПИИ: 1 – патрубок для откачки (запаянный), 2 – катод, 3 – корпус, 4 – магниты, 5 – анод, 6 – антикатод. б) Принципиальная схема стенда с камерой ИЭУП: I – манометр, II – вакуумный патрубок, III – анод (корпус камеры), IV – катод (центральный электрод), V – смотровое окно, VI – натекаль (подача газа), VII – шиберный вакуумный затвор, VIII – откачной вакуумный пост, IX – ПИИ, X – балластное сопротивление, XI – источник ускоряющего напряжения (до -25 кВ), XII – источник напряжения питания ПИИ (до 3 кВ).

В качестве рабочего газа использовался D_2 . Установка давления в экспериментах проводилась при помощи механического прецизионного натекаля M9515106 #204067 VARIAN с точностью не хуже $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ Торр.

Принципиальная схема стенда с камерой ИЭУП и конструкция исследованного ПИИ приведены на рис. 1. ПИИ устанавливался на корпус камеры ИЭУП напротив одного из промежутков между катодными кольцами. Конструкция ПИИ представляет собой электродную систему, состоящую из анода, катода и антикатада в едином цилиндрическом корпусе из немагнитной нержавеющей стали, по центру антикатада сделано отверстие, через которое ионы инжектируются за пределы ПИИ в основной разрядный промежуток камеры ИЭУП. Питание на ПИИ подается через вакуумный электрический ввод. ПИИ в сборе имеет размеры $\varnothing 20 \times 40$ мм². Магнитное поле создается набором внешних магнитных колец, важными параметрами для которых являются величина и однородность магнитного поля в ПИИ. Рабочее давление составляет несколько мТорр, анодное напряжение равно примерно 2 кВ.

Камера ИЭУП (рис. 2) имеет цилиндрическую конструкцию с конусными вставками для создания близкой к сферической геометрии анода и сетчатый катод, расположенный в середине. Катод представляет собой четыре кольца

эллиптической формы с размерами 60×40 мм² и шириной 5 мм, вырезанных из дюралюминиевого листа толщиной 1 мм и прикрепленных друг к другу крест-накрест.

Анализ параметров камеры ИЭУП проводился с использованием подхода, описанного в статье [9]. Для проведения расчетов и определения работоспособности рассматриваемой системы определялся ряд параметров, влияющих на ее работоспособность. Первым параметром была прозрачность катода, которая, по сути, является вероятностью ускоренным ионам пролететь сквозь катод при одиночном пролете. Прозрачность определяет эффективность работы системы ИЭУП – чем выше прозрачность, тем меньше ионов уходит на катод при каждом пролете. При проведении расчетов ввиду достаточно сложной геометрии катода его прозрачность не определялась просто из геометрии и соотношения площади, через которую ионы могут пролетать (S_0), к суммарной площади катода, если бы он был сплошным (S_C), $\eta = S_0/S_C$. Данный параметр определялся путем трассировки ионов дейтерия в исследуемой камере ИЭУП с использованием метода конечных элементов [10]. При проведении расчетов использовалась трехмерная модель камеры ИЭУП, учитывающая особенности конструкции всех ее элементов (корпуса, катода, высоковольтного ввода и диагностических окон). Ионы дейтерия запускались в систему электродов из периферийной области

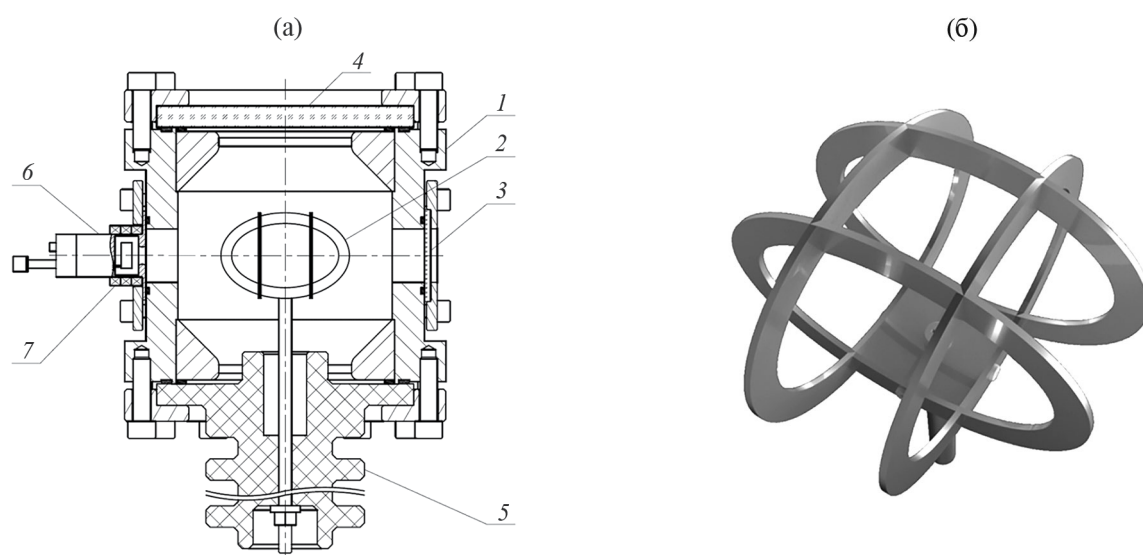


Рис. 2. а) Конструкция камеры ИЭУП: 1 – анод (корпус камеры ИЭУП), 2 – сетчатый катод, 3, 4 – смотровые окна, 5 – высоковольтный ввод камеры ИЭУП, 6 – ПИИ, 7 – магниты. б) Конструкция сетчатого катода.

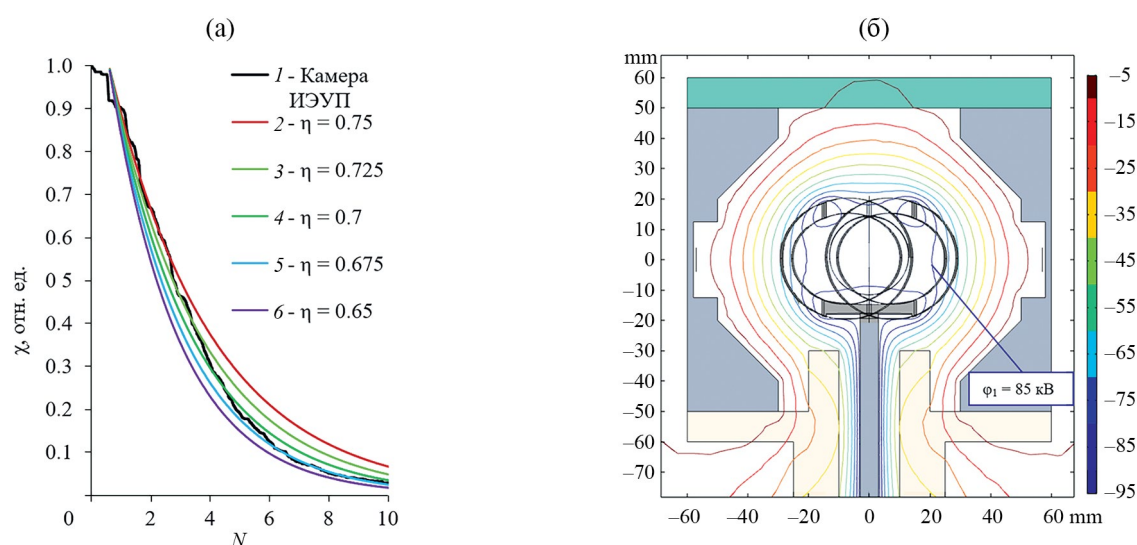


Рис. 3. Параметры камеры ИЭУП: а – зависимости нормированного среднего количества ионов от количества их пролетов через сетчатый катод для используемой конструкции катода и катодов с известными прозрачностью η , б – распределение потенциала в камере ИЭУП.

анода (из отверстия в корпусе), где располагался ПИИ, затем анализировались траектории их движения под действием сил, действующих со стороны электрического поля. С течением времени (по мере совершения ионами колебаний через сетчатый катод) количество ионов, совершающих колебательные движения, уменьшалось. По результатам расчетов получена зависимость нормированного среднего количества ионов χ (от изначального количества) от количества их пролетов через сетчатый катод (кривая 1 на рис. 3а). С учетом того

факта, что прозрачность является вероятностью ускоренным ионам пролететь сквозь катод при одиночном пролете, $P_1 = \eta$, при многократных пролетах ионов сквозь катод вероятность иона продолжить колебательное движение и не попасть на катод составит $P_N = \eta^N$, где N – номер пролета. Сопоставляя рассчитанную зависимость для используемой конструкции камеры ИЭУП (кривая 1 на рис. 3а) с аналогичными зависимостями, полученными для катодов с разными прозрачностью (кривые 2–6 на рис. 3а), мы определили, что наиболее близко процесс

уменьшения количества колеблющихся в системе ионов соответствует катоду с прозрачностью $\eta = 0.7$. Данное значение этого параметра и используется при проведении дальнейших вычислений.

Вторым важным параметром камеры ИЭУП является эффективность ускорения ионов, $\xi = \phi_1/U$, где ϕ_1 — значение последней эквипотенциали первого типа, U — приложенная разность потенциалов между катодом и анодом (вследствие того, что катод камеры ИЭУП имеет сложную конструкцию, возникает уменьшение эффективной разности потенциалов, ускоряющей ионы в межэлектродном промежутке). Эквипотенциальные линии первого типа замыкаются вне катода, и значение последней эквипотенциальной линии первого типа ϕ_1 определяет энергию, которую фактически набирают ионы относительно максимально возможной. Для исследуемой камеры ИЭУП эффективность ускорения составила $\xi \approx 0.85$, распределение потенциала в камере ИЭУП показано на рис. 3б.

3. РАСЧЕТ ТОКА РАЗРЯДА

В данном разделе рассматривается связь выхода нейтронов камеры ИЭУП с протекающим током между электродами камеры для того, чтобы сформулировать требования к вытягиваемому току из ПИИ. Выход нейтронов Y камеры ИЭУП определяется числом протекающих реакций синтеза и записывается в интегральном виде как

$$Y = \iint_{iV} v_i \sigma(E) n_i n_t dV dt, \quad (1)$$

где n_t — объемная концентрация частиц в газоплазменной мишени, n_i — объемная концентрация налетающих на мишень ионов, σ — сечение реакции синтеза (в данном случае DD), v_i — скорость налетающих ионов, V — объем области взаимодействия ионов, t — длительность взаимодействия.

Считая, что генерация нейтронов в основном происходит за счет взаимодействия ускоренных ионов с молекулами газа, заполняющего объем камеры ИЭУП, соотношение (1) можно упростить, проведя интегрирование только по объему газоплазменной мишени, а для случая системы ИЭУП — по внутреннему объему катода V_C , считая, что всю энергию взаимодействия $\xi E = q_i \xi U$ ионы набирают при подлете к катоду

и что его внутренний объем они пролетают с данной энергией. Поскольку в работе рассматривается камера ИЭУП для генерации нейтронов в непрерывном режиме ($Y(t) = \text{const}$), правомерно пренебречь зависимостями от времени всех рассматриваемых параметров и заменить интегрирование по времени просто временем работы системы. Формула (1) упрощается следующим образом:

$$Y = v_i \sigma(\xi E) n_i n_t V t. \quad (2)$$

Далее рассмотрим по отдельности каждый параметр в формуле (2) и выразим n_i для перехода к вытягиваемому току из ПИИ. Рассмотрим генерацию нейтронов в случае реализации реакции $D(d, n)\text{He}^3$. В качестве ускоренных частиц в ней могут выступать ионы D_2^+ , D^+ (высокоэнергетичными нейтральными частицами, образовавшимися, например, в результате перезарядки, предлагается пренебречь для упрощения задачи). В газовом разряде ПИИ степень ионизации невысока и образование ионов D^+ менее вероятно, чем образование ионов D_2^+ . Поэтому далее будем рассматривать случай взаимодействия ионов D_2^+ с газоплазменной мишенью. Учитывая, что подобные ионы содержат два ядра дейтерия массой $2m_i$ (m_i — масса иона дейтерия), скорость ионов D_2^+ в камере ИЭУП определяем как

$$v_i = \sqrt{q_i \xi U / m_i}. \quad (3)$$

При заполнении объема системы рабочим газом D_2 концентрацию молекул можно определить из основного газодинамического соотношения $n = p/kT$, зная давление рабочего газа в системе p и температуру окружающей среды T . Для характерных рабочих для ПИИ давлений дейтерия, порядка нескольких мТорр, концентрация нейтральных молекул дейтерия n при комнатной температуре будет лежать в диапазоне $10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Поскольку во взаимодействие вступают ядра, в случае двухатомных молекул (D_2) концентрация ядер газа n будет в 2 раза больше, т.е. $n_t = 2p/kT$. Поскольку ионы в основной межэлектродный промежуток инжектируются из ПИИ и общая степень ионизации газа в камере ИЭУП низка, влиянием инжектируемых и ускоряемых ионов на концентрацию мишени n_t в работе мы пренебрегаем.

Концентрация налетающих ионов n_i является одной из наиболее сложных характеристик для расчета. Она определяется через объемный

ионный ток I_{0i} в камере ИЭУП следующим образом:

$$n_i = \frac{I_{0i}}{q_i v_i S_0}, \quad (4)$$

где I_{0i} — объемный ионный ток (определяется количеством ионов, проходящих через область реакции внутри объема катода за единицу времени), q_i — заряд ионов, S_0 — площадь поверхности, через которую протекает объемный ионный ток I_{0i} .

Площадь S_0 связана с площадью поверхности катода S_C следующим образом: $S_0 = \eta S_C$. В таком случае объемный ионный ток I_{0i} может быть выражен через выход нейтронов из формул (2)–(4) следующим образом:

$$I_{0i} = \frac{Y k T q_i \eta S_C}{2 p t V_C \sigma(\xi E)}. \quad (5)$$

При этом общий объемный ионный ток складывается из тока ионов I_{0i} , попадающих во внутреннюю область катода и приводящих к генерации нейтронов, и из тока ионов, попавших на катод I_C . Соотношение между этими токами определяется прозрачностью катода η , $I_{0i}/I_C = \eta/(1 - \eta)$ или в другой записи

$$I_C = \frac{I_{0i}(1 - \eta)}{\eta}. \quad (6)$$

Однако ионный ток на катод I_C не измеряется экспериментально, поскольку в экспериментах присутствует электронная составляющая тока на анод камеры, т.е. $I = I_C + I_A$, где I_A — электронный ток на анод. Связь между I_C и I_A может быть выражена через параметры камеры: прозрачность катода η и максимально возможное количество пролетов ионов через область мишени $N_{\max}$. Это позволяет перейти от тока I_C к экспериментально измеряемому току разряда I между катодом и анодом камеры ИЭУП:

$$I = I_C \left[1 + \left((1 - \eta) \sum_{z=1}^{N_{\max}} \eta^z \right)^{-1} \right], \quad (7)$$

где z — номер пролета иона через катод (область газоплазменной мишени). Для $\eta = 0.7$ сумма в скобках принимает значение 2.42, тогда $I = 2.42 I_C$.

Спустя определенное количество пролетов ионы непременно уходят на катод. С каждым следующим пролетом количество ионов, совершающих колебательное движение между электродами, уменьшается. Описать данный процесс можно, определяя прозрачность η катода как долю ионов P_1 , не попавших на его поверхность при одном пролете. При N пролетах доля пролетающих ионов будет записываться как $P_N = \eta^N$. Максимальное количество пролетов ионов $N_{\max}$ составит $N_{\max} = \log_{\eta} P_{N_{\max}}$. Задавая $P_{N_{\max}} = 1\%$ (0.01) и имея прозрачность катода $\eta = 0.7$, получим максимальное количество пролетов $N_{\max} = 12$.

Обобщая формулы (5)–(7), можно связать экспериментально измеряемый разрядный ток с уровнем выхода нейтронного излучения камеры ИЭУП:

$$I = \frac{Y k T q_i S_C (1 - \eta)}{2 p t V_C \sigma(\xi E)} \left[1 + \left((1 - \eta) \sum_{z=1}^{N_{\max}} \eta^z \right)^{-1} \right]. \quad (8)$$

Таким образом, можно определить связь между нейтронным выходом и требуемым для его обеспечения током разряда для систем ИЭУП. Данный подход позволяет анализировать и получать оценки необходимого тока разряда без учета процессов зажигания и горения газового разряда в системе ИЭУП и ПИИ. В реальности же применять данный метод необходимо с учетом ряда факторов, определяющих вольтамперную характеристику разряда, таких как сорт рабочего газа, его давление, материал электродов, состояние их поверхности и др. В данной работе это соотношение используется в сочетании с экспериментально полученными результатами измерений токов ПИИ и разряда между анодом и катодом камеры ИЭУП.

Также необходимо отметить, что взаимодействие ускоренных ионов с катодом приводит к вторичной ион-электронной эмиссии и образованию электронов, ускоряющихся электрическим полем в сторону анода (корпуса камеры ИЭУП). Данные электроны также вносят вклад в суммарный ток разряда. При энергиях ионов в диапазоне кэВ коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии может принимать значения больше единицы [11], поэтому, несмотря на то, что катод в рассматриваемой системе ИЭУП имеет высокую прозрачность и данный процесс

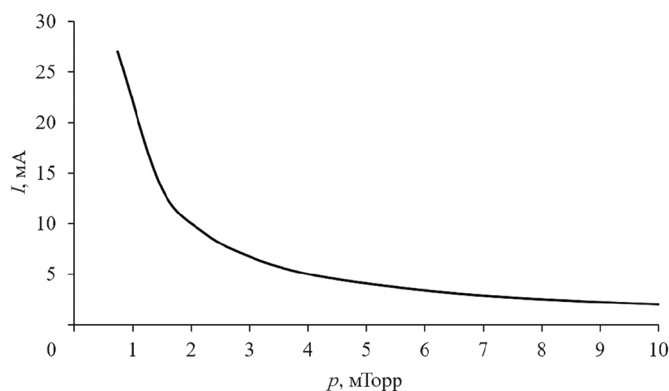


Рис. 4. Зависимость вытягиваемого из ПИИ тока от давления дейтерия в камере ИЭУП.

оказывает не столь высокий вклад, как в случае сплошного катода, получаемые из соотношения (8) значения токов могут быть несколько заниженными.

Используя формулу (8), проведем расчет вытягиваемого тока из ПИИ камеры ИЭУП согласно рис. 2 (с учетом электронной компоненты), исходя из базисного значения выхода нейтронов $Y = 10^6$ нейтр./с при реализации DD-реакции и непрерывном режиме генерации нейтронов. Выход 10^6 нейтр./с позволяет использовать камеру ИЭУП в широком ряде практических задач и научных исследований и не требует работ в предельно нагруженных электрических режимах. В расчетах использовались следующие значения прозрачности катода, эффективности ускорения и максимального числа пролетов: $\eta = 0.7$, $\xi = 0.85$, $N_{\max} = 12$. Напряжение на катоде $U = 100$ кВ. Давление варьировалось от 1 до 10 мТорр, что является характерным рабочим давлением ПИИ. В таком случае межэлектродный ток камеры ИЭУП будет находиться в диапазоне от 2 до 22 мА для давлений от 10 до 1 мТорр соответственно. Фактически это требование к суммарному току, вытягиваемому из ПИИ, для обеспечения заданного уровня выхода нейтронов Y . Зависимость значения вытягиваемого тока I от рабочего давления исследуемой камеры ИЭУП приведена на рис. 4.

4. ВЫБОР КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ПЕННИНГОВСКОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ

Конфигурация магнитного поля в ПИИ значительно влияет на параметры разряда. От конфигурации магнитного поля и, как следствие,

размера и расположения области скрещенных электрического и магнитного полей напрямую зависят область горения разряда в ПИИ, ток разряда и вытягиваемый ток на катод камеры ИЭУП. Изменение конфигурации магнитного поля возможно путем изменения размеров и количества магнитов или изменения их положения на корпусе ПИИ. В связи с этим проведены исследования для определения оптимальной конфигурации магнитной системы, обеспечивающей наибольший вытягиваемый ток из ПИИ.

Магнитная система выполнена в виде сборки из кольцевых постоянных магнитов. При этом после установки системы на ПИИ конфигурация магнитного поля может сильно изменяться, так как ПИИ имеет в своем составе элементы с относительной магнитной проницаемостью, отличной от единицы. Провести измерения распределения магнитного поля в ПИИ с установленной магнитной системой невозможно из-за его конструктивных особенностей (доступ во внутренний объем ПИИ возможен только через отверстие в антикатоде), поэтому определение пространственного распределения магнитного поля внутри ПИИ проводилось в три этапа. Сначала проводились измерения индукции магнитного поля на сборках из нескольких магнитных колец с помощью тесламетра. Затем методом конечных элементов строилась расчетная модель, в которую закладывались геометрические размеры использованных магнитных колец и подбирались значения их намагниченности так, чтобы пространственное распределение индукции магнитного поля в рассчитанной геометрии максимально совпадало с измеренным распределением. На завершающем этапе в рассчитываемую геометрию магнитной системы добавлялись элементы конструкции исследуемого ПИИ и рассчитывалось пространственное распределение индукции магнитного поля в ПИИ.

Результаты определения пространственного распределения магнитного поля внутри исследуемого ПИИ для конфигурации магнитной системы с тремя кольцевыми магнитами из $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ показаны на рис. 5.

Аналогичные измерения тесламетром и расчеты проведены для конфигурации магнитного поля в ПИИ для набора от одного до шести магнитных колец (таким образом, чтобы покрыть всю длину ПИИ). Сравнительные результаты расчетов конфигурации магнитного поля

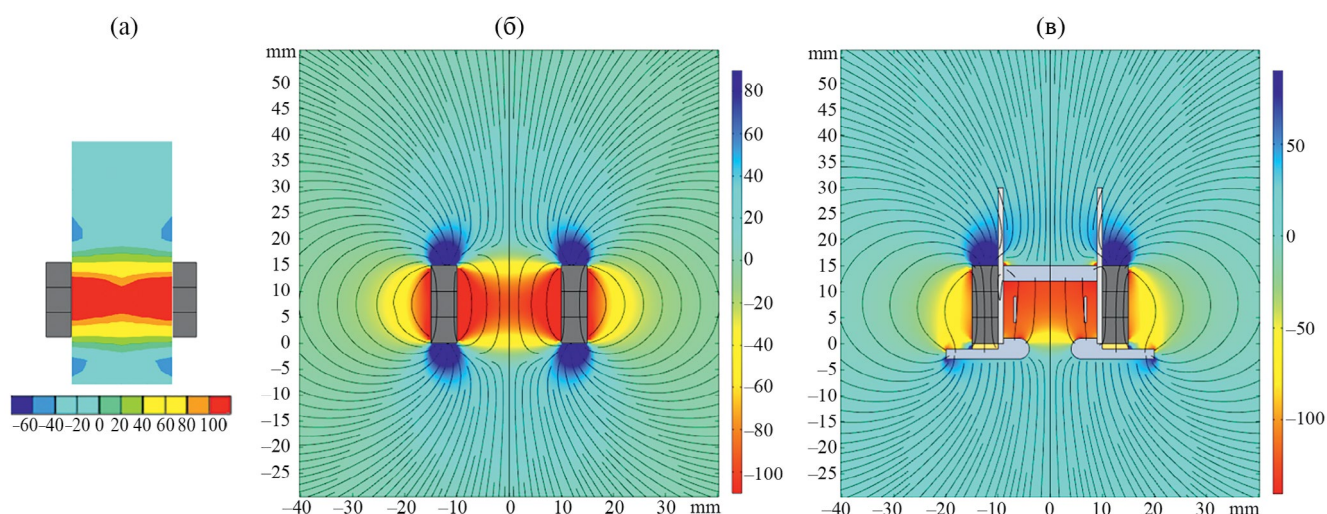


Рис. 5. Распределение индукции магнитного поля системы из трех магнитных колец: а – измеренное с помощью тесламетра, б – расчет без учета конструктивных элементов ПИИ, в – расчет с учетом конструктивных элементов ПИИ.

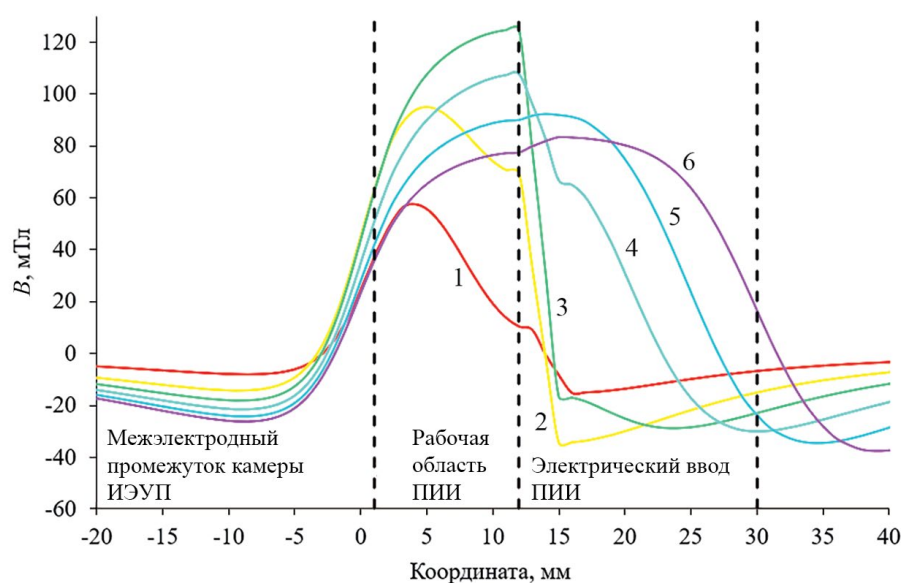


Рис. 6. Расчет конфигурации магнитного поля в ПИИ для разного количества внешних магнитов.

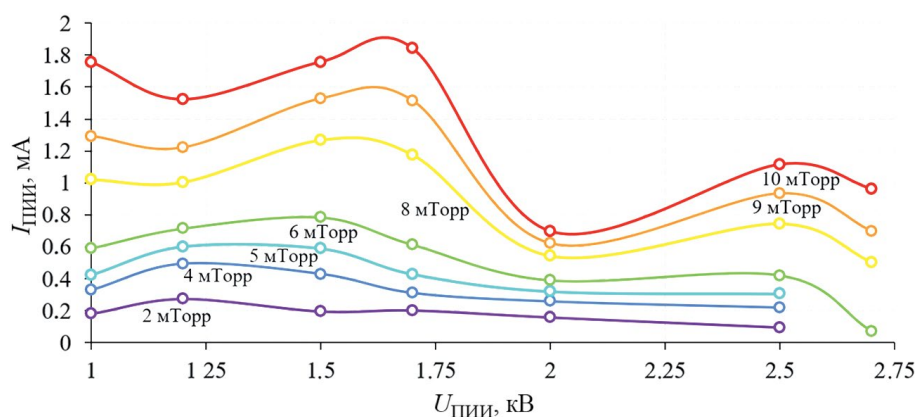


Рис. 7. Зависимость тока $I_{\text{ПИИ}}$ от напряжения питания $U_{\text{ПИИ}}$ для различных давлений дейтерия в камере ИЭУП.

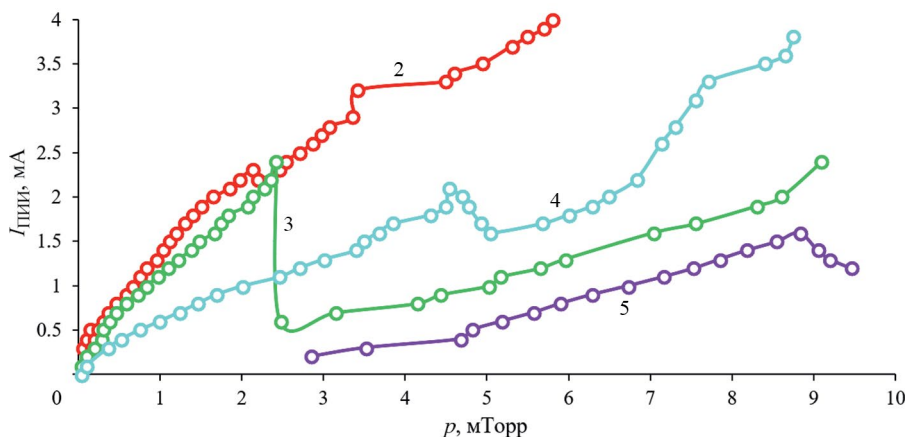


Рис. 8. Зависимости токов в ПИИ от давления в камере ИЭУП при различном количестве магнитов на ПИИ ($U_{\text{ПИИ}} = 1.7$ кВ).

приведены на рис. 6. Критериями по выбору оптимальной конфигурации магнитного поля являлись абсолютное максимальное значение магнитного поля в рабочей области ПИИ, однородность магнитного поля в рабочей области и минимальное влияние внешнего магнитного поля на элементы ПИИ вне рабочей области. С этой точки зрения, конфигурация из трех магнитов обеспечивает наибольшее значение магнитного поля в рабочей области на уровне более 120 мТл, имеет достаточно резкие границы спада и нарастания поля и достаточно небольшое значение поля вне области горения разряда по сравнению с другими исследованными конфигурациями и будет в дальнейших экспериментах рассматриваться в качестве основной конфигурации.

5. ИЗМЕРЕНИЕ РАБОЧИХ ТОКОВ ПЕННИНГОВСКОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ

Целью первой серии экспериментальных исследований ПИИ в камере ИЭУП было выяснение режима работы ПИИ в конфигурации с тремя магнитами (выбранной оптимальной). Сняты зависимости тока в ПИИ ($I_{\text{ПИИ}}$) от напряжения питания ПИИ $U_{\text{ПИИ}}$ для различных значений давления p — рис. 7. Максимальные значения $I_{\text{ПИИ}}$ достигаются при напряжении 1.2–1.7 кВ для разных давлений. При увеличении напряжения ток ПИИ снижается, что, возможно, связано с изменением режима горения разряда.

Далее проведены экспериментальные исследования зависимостей параметров ПИИ, а именно, тока в ПИИ $I_{\text{ПИИ}}$ и вытягиваемого

в межэлектродный промежуток тока I от давления рабочего газа в диапазоне от 0.1 до 10 мТорр и числа используемых на ПИИ магнитов. Напряжение питания на аноде ПИИ составляло 1.7 кВ. В условиях без подачи вытягивающего напряжения на центральный электрод камеры ИЭУП получены кривые зависимости тока в ПИИ от давления $I_{\text{ПИИ}}(p)$ для разных количеств магнитов на ПИИ (рис. 8). Видно, что наибольший ток ПИИ достигается при конфигурации с двумя магнитами, он составляет 4 мА при давлении около 6 мТорр. При увеличении числа магнитов $I_{\text{ПИИ}}$ снижается и наблюдаются резкие изменения режимов горения разряда в ПИИ. Например, в конфигурации с тремя магнитами значение $I_{\text{ПИИ}}$ близко к таковому в конфигурации с двумя магнитами при давлениях до 2.5 мТорр (ток достигает значения 2.4 мА), затем ток резко снижается до 0.6 мА и плавно увеличивается до 2.5 мА при росте давления до 9 мТорр. Таким образом, можно условно выделить два режима горения разряда в ПИИ: при низких давлениях в диапазоне 1–2 мТорр и при условно высоких давлениях 4–5 мТорр и более. При этом с двумя магнитами переход из режима низкого давления в режим высокого давления не наблюдается, что, видимо, связано с существенно отличающимся общим характером распределения магнитного поля внутри ПИИ по сравнению с остальными рассмотренными вариантами с тремя, четырьмя и пятью магнитами. При увеличении числа магнитов до четырех переход разряда между режимами низкого и высокого давления также наблюдается, хотя и менее резкий, в области 4.5 мТорр. Значение тока $I_{\text{ПИИ}} = 4$ мА с четырьмя магнитами достигается

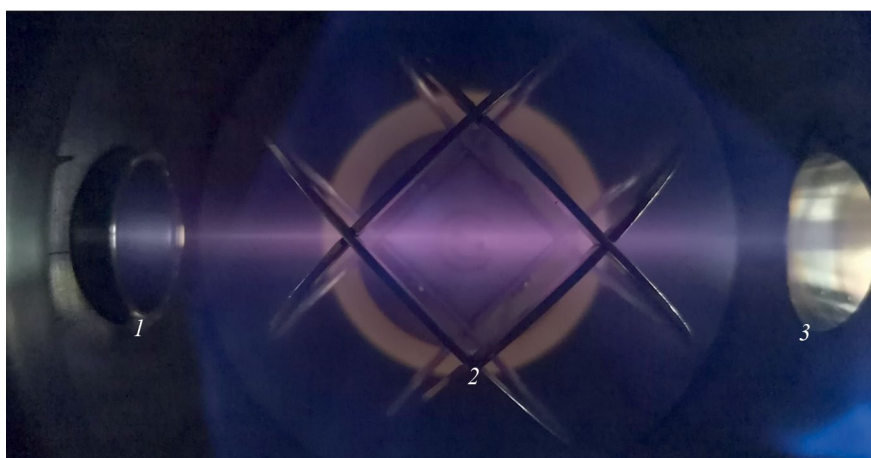


Рис. 9. Характерный вид свечения разряда в дейтерии в камере ИЭУП при работе ПИИ: 1 – ПИИ, 2 – сетчатый катод, 3 – смотровое окно.

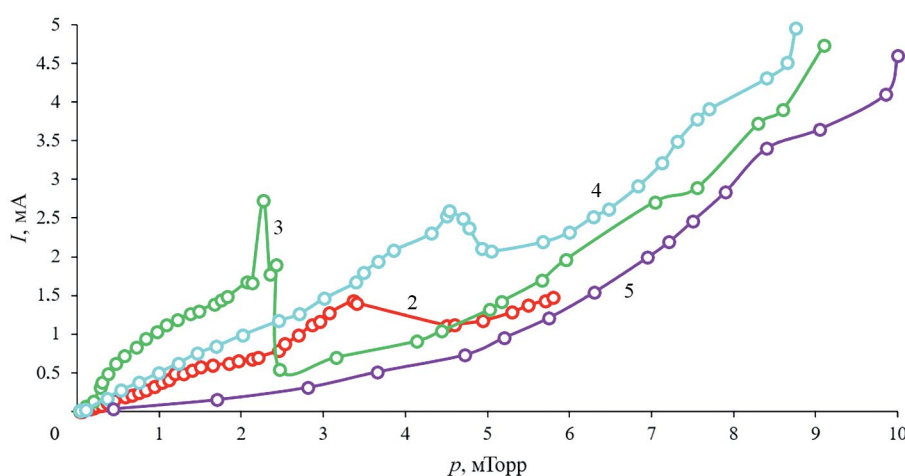


Рис. 10. Зависимости вытягиваемого из ПИИ тока от давления газа в камере ИЭУП при различном количестве магнитов на ПИИ ($U_{\text{ПИИ}} = 1.7$ кВ).

только при давлении около 9 мТорр. Дальнейшее увеличение числа магнитов приводит к снижению $I_{\text{ПИИ}}$ и смещению области рабочих давлений в сторону более высоких значений, разряд в ПИИ загорается только при давлениях около 3 мТорр и при увеличении давления примерно до 9 мТорр $I_{\text{ПИИ}}$ возрастает только до значений около 1.5 мА. Видимо, это связано с более низкими значениями магнитного поля в рабочей области ПИИ и высокими значениями магнитного поля в области электрического ввода ПИИ, снижающими эффективность горения разряда в рабочей области ПИИ.

Практическую значимость больше представляет вытягиваемый из ПИИ в межэлектродный промежуток камеры ИЭУП ток I . При проведении экспериментов на катод камеры ИЭУП прикладывалось напряжение $U = -20$ кВ. Характерный вид свечения разряда в камере ИЭУП при

напряжении питания ПИИ $U_{\text{ПИИ}} = 1.7$ кВ и напряжении на катоде камеры ИЭУП приведен на рис. 9.

Зависимости вытягиваемого из ПИИ тока от давления газа в камере ИЭУП $I(p)$ показаны на рис. 10. В целом, по приведенным зависимостям $I(p)$ с разным количеством магнитов на ПИИ наблюдается рост тока при увеличении давления. Так же, как и на рис. 8, видны два режима горения разряда с резким переходом из одного в другой: для двух и четырех магнитов при $p \sim 3-5$ мТорр; для трех магнитов при $p \sim 2.5$ мТорр. Для пяти магнитов кривая нарастания тока достаточно гладкая, однако абсолютные значения тока I меньше, чем в остальных случаях. Следует отметить, что, как и в случае рис. 8, при использовании трех магнитов переход из одного режима горения разряда

в другой сопровождается наиболее резким скачком по сравнению с остальными случаями.

Важным выводом из рис. 10 является то, что значения вытягиваемых из ПИИ токов I и токов в самом ПИИ $I_{\text{ПИИ}}$ не имеют прямой связи для одной и той же конфигурации магнитной системы. Так, в режиме высокого давления наибольший ток I достигается с четырьмя магнитами, значение тока доходит до 5 мА при давлении 9 мТорр. В режиме с низким давлением для трех магнитов характер кривых рис. 8, 9 сохраняется. Данные результаты иллюстрируют влияние распределения магнитного поля внутри ПИИ на его рабочие характеристики. В экспериментах без подачи высокого (вытягивающего) напряжения на катод камеры ИЭУП конфигурация с двумя магнитами на ПИИ показывала лучшие результаты среди всех исследованных случаев, обеспечивая режимы с наибольшими токами в ПИИ ($I_{\text{ПИИ}}$) и практически отсутствие скачков. При приложении вытягивающего напряжения на катод ИЭУП ситуация полностью менялась и случай с двумя магнитами на ПИИ стал чуть ли не худшим, особенно в области низких давлений газа. Данный результат, по-видимому, связан с существенно отличающимся общим характером распределения магнитного поля внутри ПИИ по сравнению с остальными рассмотренными вариантами с тремя, четырьмя и пятью магнитами. В случае с двумя магнитами максимум магнитного поля в ПИИ расположен непосредственно у выходного отверстия в антикатоде ПИИ, вблизи границы рабочей области ПИИ и межэлектродного промежутка камеры ИЭУП (рис. 6). В остальных рассмотренных случаях с тремя, четырьмя и пятью магнитами в данной области наблюдается спад магнитного поля.

В целом по результатам проведенных экспериментов можно выделить два приоритетных режима работы исследуемого ПИИ. Во-первых, при давлении 9–10 мТорр вытягиваемый ток из источника превышает 4 мА для нескольких конфигураций магнитной системы, что является достаточным для обеспечения выхода нейтронов $Y = 10^6$ нейтр./с в соответствии с рис. 4. Однако в случае использования только одного источника ПИИ площадь поверхности, через которую протекает объемный ионный ток $S_C (1 - \eta)$, изменяется за счет уменьшения S_C , ионный пучок фактически пролетает только через одну ось катода (см. рис. 9), и рабочая площадь составит примерно $0.25 S_C (1 - \eta)$. В то же время за счет

применения только одного ПИИ уменьшится и объем области генерации нейтронов V_C , которая вырождается в цилиндр с длиной $2r$ и высотой порядка $0.75r$ (в расчетах по формуле (8) объем V_C считался по объему сферы радиусом r). Видоизменяя параметры S_C и V_C в формуле (8), можно получить следующую оценку тока I для выхода 10^6 нейтр./с и давления 10 мТорр: $I = 2.4$ мА, что, тем не менее, является достаточным для использования одного ПИИ. Во-вторых, интересным представляется режим с тремя магнитами при давлении около 2 мТорр. В этой области обеспечивается достаточно большое значение тока (около 1.5 мА), а снижение рабочего давления позволит повысить электропрочность системы электродов и высоковольтного ввода камеры ИЭУП. Однако в данном случае одного ПИИ не хватает для обеспечения требуемого тока: если ориентироваться на выход нейтронов 10^6 нейтр./с (рис. 4), то суммарное значение тока I должно быть около 10 мА. Это надежно достигается при использовании семи-восьми ПИИ, подключенных с разных сторон к камере ИЭУП. Это возможно, поскольку каждый ПИИ может работать независимо, и в литературе известны системы ИЭУП с большим количеством ионных источников [12, 13]. При этом в расчетах считается, что весь внутренний объем V_C и площадь S_C используются в процессе генерации излучения.

Аналогичным образом можно аппроксимировать данные рис. 10 для разного количества источников, подключенных к камере ИЭУП, причем при увеличении числа источников необходимо учитывать изменение эффективных рабочих площади S_C и объема взаимодействия V_C . С учетом высказанных заключений, соотношения (8) и данных рис. 4, 10 мы построили семейство расчетных зависимостей токов разряда от давления дейтерия в рассматриваемой системе ИЭУП для различного количества присоединяемых на камеру ПИИ и различных выходов нейтронов (рис. 11). Число ПИИ выбиралось, исходя из геометрии катода камеры ИЭУП. При увеличении числа ПИИ каждый следующий располагался относительно предыдущего под углом 45° , поскольку это позволяло заполнить наибольший объем V_C , в котором происходила генерация нейтронного излучения.

На рис. 11 использованы максимальные достигнутые значения вытягиваемого из ПИИ тока I для исследованного числа внешних магнитов, поэтому в соответствии с рис. 10 части кривых

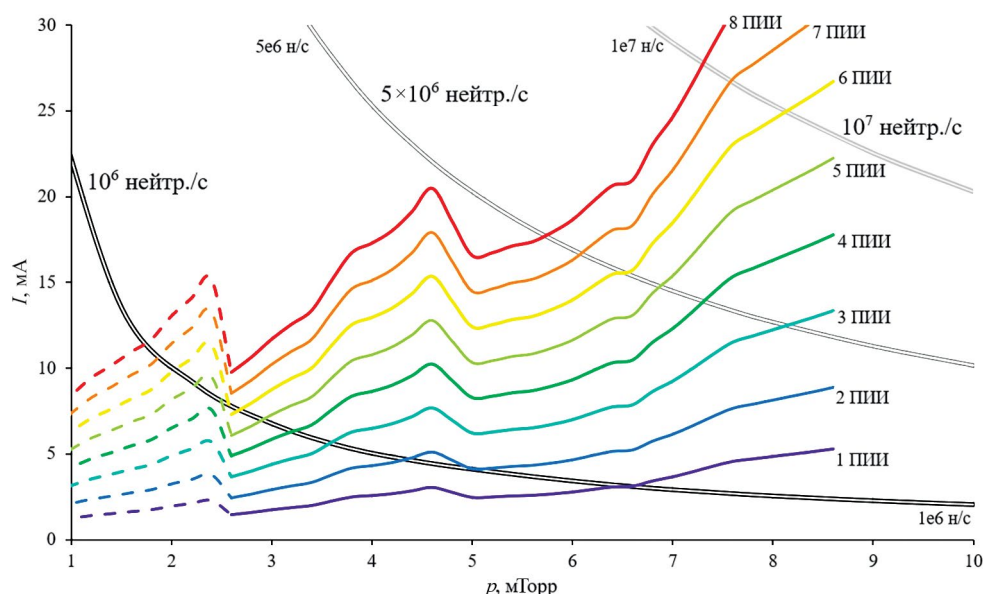


Рис. 11. Расчетные зависимости токов разряда от давления дейтерия $I(p)$ для разного числа ПИИ (от одного до восьми снизу вверх; штриховые линии — конфигурация из трех магнитов на ПИИ, сплошные линии — из четырех) и для разных значений нейтронного выхода (двойные линии).

при низком давлении (до 2.6 мТорр) обеспечивают максимальный ток при конфигурации из трех магнитов (эти кривые обозначены штриховыми линиями на рис. 11). При увеличении давления максимальные значения I достигаются уже в конфигурации с четырьмя магнитами, эти части кривых на рис. 11 обозначены сплошными линиями.

Расчеты проведены без учета изменения траекторий ионов при их многократных осцилляциях через катод ($N_{\max} = 12$). Это может в незначительной степени повлиять на значения рабочих S_C и V_C , поскольку в результате разворота и осцилляций ионы отклоняются от начальной траектории ионного пучка из ПИИ. К тому же приведенный расчет фактически является оценкой снизу требуемого тока I , так как значение ускоряющего напряжения в экспериментах на стенде составляло 20 кВ, а при построении рис. 11 использовалось значение напряжения на катоде $U = 100$ кВ. Но теоретические и экспериментальные исследования характеристик используемых ПИИ показывают, что при напряжении свыше 20 кВ диаметр пучка перестает уменьшаться и остается неизменным [14], а при росте ускоряющего напряжения межэлектродного промежутка ток I , вероятно, будет увеличиваться, но он не должен превышать значения $I_{\text{ПИИ}}$ рис. 8, т.е. I останется в диапазоне нескольких миллиампер для одного ПИИ.

В целом рис. 11 позволяет определять оптимальное число ПИИ и их требуемый рабочий диапазон по току I и давлению дейтерия для обеспечения требуемого уровня выхода нейтронного излучения в условиях рассмотренной геометрии электродной системы камеры ИЭУП. Например, для давления около 7.3 мТорр можно использовать четыре рассмотренных ПИИ с суммарным током 13 мА для обеспечения выхода нейтронов $5 \cdot 10^6$ нейтр./с. На рис. 10 видно, что в таком режиме ток с одного ПИИ составляет примерно 3.5 мА.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная статья посвящена исследованию работы ПИИ в камере ИЭУП, рассчитанной на генерацию потока нейтронного излучения с использованием газоплазменной мишени. В результате расчетных исследований показана связь вытягиваемого тока из ПИИ с уровнем выхода нейтронов. Для обеспечения потока 10^6 нейтр./с вытягиваемый ток ПИИ должен лежать в пределах 2–22 мА.

Показано, что конфигурация магнитной системы оказывает значительное влияние на работу ПИИ, и расчетным путем определено, что оптимальной конфигурацией является такое число магнитов на ПИИ, при котором основная часть магнитного поля сосредоточена в рабочей

области ПИИ и поле минимально проникает в соседние области электрического ввода ПИИ и межэлектродного промежутка камеры ИЭУП.

Экспериментальное изучение характеристик ПИИ показало, что оптимальное напряжение питания ПИИ составляет 1.2–1.7 кВ с точки зрения достижения наибольших токов $I_{\text{ПИИ}}$. Зависимости $I_{\text{ПИИ}}$ и вытягиваемого тока I показали наличие двух областей горения разряда, условно при низком давлении (1–2 мТорр) и высоком давлении (4–5 мТорр и более). По зависимости $I(p)$ определено несколько приоритетных режимов работы ПИИ для достижения выхода нейтронов 10^6 нейтр./с. На основе экспериментальных и расчетных данных построено семейство зависимостей $I(p)$ для разного числа ПИИ, используемых в камере ИЭУП, и для разных выходов нейтронов, по которым можно определять требуемый вытягиваемый из ПИИ ток, рабочее давление и число ПИИ для обеспечения требуемого выхода нейтронов в камере ИЭУП составляет 10^6 – 10^7 нейтр./с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rasmussen J., Jensen T., Korsholm S.B., Kihm N.E., Ohms F.K., Gockenbach M., Schmidt B.S., Goss E.* // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. P. 083515. <https://doi.org/10.1063/5.0013013>
2. *Kumar Sharma S., Vinayak Tewari S., Waghmare N., Jagannadha Raju S.D.V.S., Divakar Rao K., Sharma A.* // Ann. Nuclear Energy. 2021. V. 159. P. 108358. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108358>
3. *Tomiyasu K., Yokoyama K., Yamauchi K., Watanabe M., Okino A., Hotta E.* // Fusion Science and Technology. 2017. V. 56. P. 967. <https://doi.org/10.13182/FST09-A9035>
4. *Sved J.* // AIP Conference Proceedings. 1999. V. 475. P. 704. <https://doi.org/10.1063/1.59215>
5. *Miley G.H., Wu L., Kim H.J.* // J. Radioanalyt. Nuclear Chemistry. 2005. V. 263. № 1. P. 159. <https://doi.org/10.1007/s10967-005-0031-3>
6. *Takakura K., Sako T., Miyadera H., Yoshioka K., Karino Y., Nakayama K., Sugita T., Uematsu D., Okutomo K., Hasegawa J., Kohno T., Hotta E.* // Plasm. Fusin Research. 2018. V. 13. P. 2406075. <https://doi.org/10.1585/pfr.13.2406075>
7. *Lang R.F., Pienaar J., Hogenbirk E., Masson D., Nolte R., Zimbal A., Röttger S., Benabderrahmane M.L., Bruno G.* // Nuclear Instrum. Methods Phys. Resear. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detect. Associated Equipment. 2018. V. 879. P. 31. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.10.001>
8. *Miley G.H., Murali S.K.* Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion Fundamentals and Applications. New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer, 2014. P. 261. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9338-9>
9. *Прокуратов И.А., Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Дулатов А.К.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2022. Т. 45. Вып. 1. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2022-45-1-108-118>
10. *Сагдеева Ю.А., Копысов С.П., Новиков А.К.* Введение в метод конечных элементов: метод. пособие. Ижевск: Изд-во “Удмуртский университет”, 2011.
11. *Рейхрудель Э.М., Смирницкая Г.В., Мавлянов А.Н.* // Вестник Московского Университета. 1969. № 6. С. 46.
12. *Hirsch R.L.* // Journal of Applied Physics. 1967. V. 38. P. 4522. <https://doi.org/10.1063/1.1709162>
13. *Michalak M.K., Eagle B.J., Kulcinski G.L., Santarius J.F.* Six Ion Gun Fusion Experiment (SIGFE) Findings and Future Work. // 13th US-Japan IEC Workshop. Sydney: NSW, 2011.
14. *Мамедов Н.В., Прохорович Д.Е., Юрков Д.И., Каньшин И.А., Солодовников А.А., Колодко Д.В., Соколин И.А.* // ПТЭ. 2018. № 4. С. 62. <https://doi.org/10.1134/S0032816218030242>