

2. Аблеев А.Н., Ануфриев Б.Ф., Мартыненко С.П., Шульман Ю.С. Система контроля чистоты гелия в твэлах ядерных реакторов. — Датчики и системы, 2012, № 7(158), с. 52—56.
  3. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Кудряев А.А. и др. Разработка способа неразрушающего контроля концентрации гелия в тепловыделяющих элементах для перспективных ядерных энергетических установок. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2023, № 2, с. 69—80.
  4. Красников Ю.В., Дворников П.А., Ковтун С.Н. и др. Способ измерения концентрации гелия в тепловыделяющем элементе. Патент RU № 2634309. Заявл. 15.11.2016. Оpubл. 25.10.2017.
  5. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Кудряев А.А. и др. Устройство для измерения концентрации гелия в тепловыделяющем элементе (твэле). Патент RU № 2760561. Заявл. 17.02.2021. Оpubл. 29.11.2021.
  6. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Кудряев А.А. и др. Тепловыделяющий элемент ядерного реактора. Патент RU № 2760492. Заявл. 31.12.2020. Оpubл. 25.11.2021.
  7. Красников Ю.В., Степанов А.М., Стародубцев А.В. Способ измерения концентрации гелия в тепловыделяющем элементе. Патент RU № 2772652. Заявл. 02.12.2021. Оpubл. 23.05.2022.
  8. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Кудряев А.А. и др. Способ измерения концентрации гелия в тепловыделяющем элементе. Патент RU № 2792982. Заявл. 07.12.2022. Оpubл. 28.03.2023.
  9. Измерения прямые многократные. Метод обработки результатов измерений. Основные положения. ГОСТ Р 8.736—2011. М.: Стандартинформ, 2019.
  10. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. МИ 2083—90. М., Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991.
  11. Эталоны. Способы выражения точности. ГОСТ 8.381—2009. М.: Стандартинформ, 2012.
- Поступила в Редакцию 21.10.24  
Принята к опубликованию 28.03.25

УДК 537.534.2

## ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ИСТОЧНИКА ИОНОВ ПЕННИНГА МИНИАТЮРНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

*Мамедов И.М., Масленников С.П. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)*

e-mail: schildkrote5552@yandex.ru

Малогабаритные нейтронные генераторы являются основой для создания аппаратуры, которая находит применение при решении исследовательских и технологических задач в ядерной медицине, геофизике, системах безопасности, комплексах по определению элементного состава веществ [1—6]. Для эксплуатируемых в непрерывном режиме промышленных анализаторов, предназначенных для определения концентрации химических элементов в образцах горных пород и материалов на ленточных транспортерах, повышение ресурса оборудования приобретает особую актуальность.

Одним из ключевых элементов нейтронного генератора является миниатюрный линейный ускоритель, в котором нейтронные потоки образуются в результате реакций термоядерного синтеза изотопов водорода ( $D-D$ ,  $D-T$ ). Широкое распространение приобрели генераторы, в которых ускоряемые до энергии  $\sim 10^5$  эВ ионы извлекаются из ионных источников Пеннинга с газовым разрядом, горящим в скрещенных электрическом и магнитном полях.

В настоящее время проводятся активные исследования, направленные как на повышение

эксплуатационных характеристик источников Пеннинга для конкретных областей применения, так и на изучение физических процессов формирования и мод горения разряда [7—10].

Источник ионов Пеннинга имеет относительно простое конструктивное исполнение: внутри металлического корпуса располагаются дисковые катод и антикатод (катод с отверстием), между которыми размещается анод, выполненный в форме цилиндрической втулки. С внешней стороны корпуса устанавливается магнитная система источника, составленная из нескольких магнитных колец  $Nd-Fe-B$ . Анод крепится внутри разрядной ячейки на трех траверсах, пропущенных через отверстия в катоде. Напряжение на анод подается через керамический проходной изолятор, размещенный на торце ионного источника [11—13].

Практика эксплуатации ионных источников показывает, что с течением времени поверхность керамического изолятора покрывается слоем распыленного в разряде материала электродов. Вследствие этого поверхностное сопротивление и электропрочность изолятора снижа-

ются, что является одной из причин выхода прибора из строя.

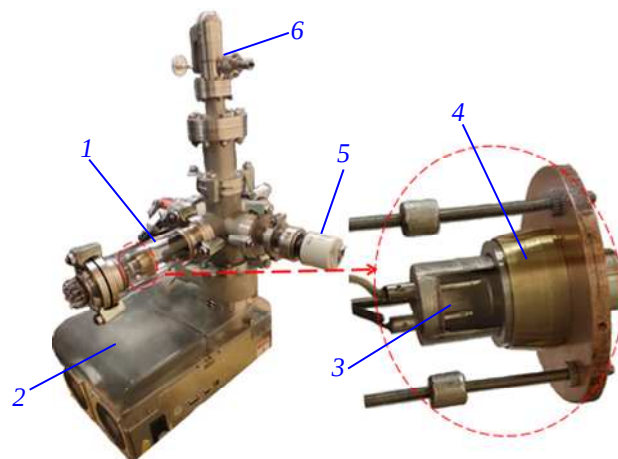
Продукты распыления электродов, возникающие при воздействии основного разряда, оседают преимущественно внутри разрядной ячейки и не оказывают существенного влияния на металлизацию проходного изолятора. Продукты этого разряда разлетаются за пределы ионного источника в направлении ионно-оптической системы ускорителя через отверстие в антикатоде [14, 15]. В то же время скорость металлизации поверхности проходного изолятора резко возрастает, если в ионном источнике возникают условия, при которых инициируются побочные разряды за пределами разрядной ячейки.

Цель настоящей работы — устранение побочного разряда с внешней стороны катода ионного источника Пеннинга вблизи проходного изолятора анодного напряжения. Оно может быть достигнуто путем уменьшения магнитного поля за пределами основного разрядного промежутка. При этом ток ионов в основной ячейке сохраняется.

В настоящей статье приведены результаты исследований, направленных на изучение условий зажигания разряда с внешней стороны катода ионного источника Пеннинга вблизи проходного изолятора анодного напряжения, а также разработку магнитных систем, исключающих зажигание побочных разрядов, что повышает ресурс создаваемой аппаратуры.

**Схема и методика эксперимента.** Экспериментальные исследования режимов зажигания побочного разряда за пределами основной разрядной ячейки ионного источника проводились с использованием разборных макетов миниатюрного ускорителя, которые размещались в вакуумной камере экспериментального стенда (рис. 1).

Конструктивную основу стенда составляет стандартный (ISO) вакуумный элемент Cross 6-way, смонтированный на безмасляном высоковакуумном откачном посту Agilent TPS Compact TV81M. Система откачки поста построена на основе турбомолекулярного насоса Twis Torr 84 FS, в качестве форвакуумного насоса используется спиральный насос IDP-3. Режим подачи водорода  $H_2$  в стеклянную вакуумную камеру регулировали с помощью преци-



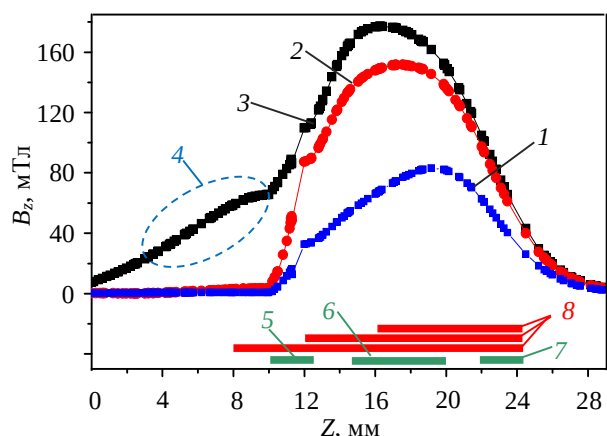
Р и с. 1. Экспериментальный стенд: 1 — вакуумная камера; 2 — система откачки; 3 — смотровое окно; 4 — ионный источник; 5 — датчик давления; 6 — вентили

зионных вентилей. Давление контролировали широкодиапазонным датчиком FRG-702 [15].

При изучении режимов работы ионного источника вакуумную камеру откачивали до предельного давления остаточного газа 0,7—0,9 мПа. На анод разрядной ячейки через высоковольтный ввод подавали постоянное напряжение положительной полярности  $U_a = 2$  кВ от высоковольтного источника питания Spellman SL 150. Рабочее давление водорода в разрядной камере устанавливали на уровне 0,4—1 Па и поддерживали непрерывной прокачкой. Суммарный ток ионного источника, включавший в себя токи основного и побочного разрядов, изменялся в диапазоне  $I_p = 0—3$  мА. Для визуального наблюдения и фоторегистрации побочных разрядов, возникающих за пределами разрядной ячейки вблизи проходного изолятора, в корпусе ионного источника было вырезано прямоугольное смотровое окно.

При исследовании режимов генерации нейтронных потоков с помощью малогабаритного ускорителя, в котором устанавливали ионные источники с разными магнитными системами, разрядные камеры наполняли дейтерием при давлении 0,4—1 Па. На анод ионного источника Пеннинга подавали постоянное напряжение 1—2,5 кВ. Ускоряющее напряжение, приложенное к ионно-оптической системе источника ионов, регулировали в диапазоне 50—85 кВ. Нейтронный поток определяли средствами автоматизированной аппаратуры.

**Результаты исследований и обсуждение.** В расчетах использовали трехмерную модель ионного источника, позволившую анализиро-



Р и с. 2. Распределение индукции магнитного поля по оси источника для магнитных систем длиной 10 (1), 15 (2), 20 мм (3); 4 — область источника за катодом; 5, 6, 7, 8 — положение катода, анода, антикатада и магнитных систем соответственно

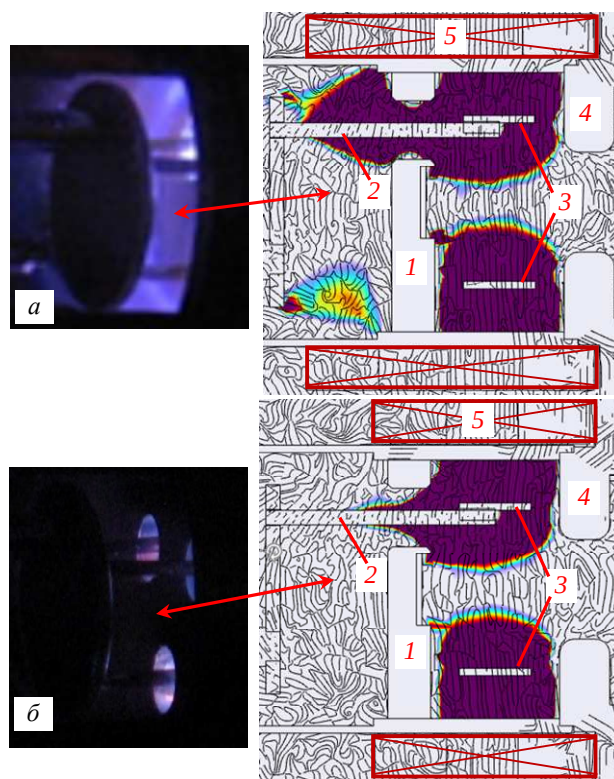
вать распределение магнитного поля внутри источника. На рис. 2 показаны расчетные зависимости аксиальной составляющей индукции магнитного поля вдоль оси ионного источника для магнитных систем длиной 10, 15 и 20 мм. На рисунке в виде отрезков также схематично показаны координаты расположения электродов и магнитных систем длиной 10, 15 и 20 мм. При монтаже магнитных систем на ионный источник совмещали положение внешней стороны антикатада и магнитной системы [11—13]. Магнитные системы набирали из магнитных колец Nd—Fe—В с габаритным типоразмером К 26×20×5 мм. Индукция поля в геометрическом центре отдельного магнитного кольца составляла 55 мТл.

Штатная магнитная система, применяемая на ионном источнике, имеет длину 20 мм и включает в себя четыре скрепленных одно с другим магнитных кольца. Эта магнитная система на несколько миллиметров превосходит длину разрядной ячейки, вследствие чего магнитное поле выходит за ее пределы. При этом с обратной стороны катода ионного источника возникает область со скрещенными электрическими и магнитными полями, в которой могут создаваться условия для зажигания побочного разряда.

Для магнитных систем длиной 10 и 15 мм, которые состояются из двух и трех магнитных колец, одновременно с подавлением магнитного поля с обратной стороны катода снижается напряженность поля внутри разрядной ячейки,

что может нарушить условия горения основного разряда. Это потребовало анализа распределения вектора Пойнтинга в ионном источнике и экспериментальных исследований режимов работы миниатюрного ускорителя с разными укороченными магнитными системами.

На рис. 3 показаны результаты моделирования распределения модуля вектора Пойнтинга и разряд в области ионного источника, расположенной за его катодом, для магнитных систем длиной 15 и 20 мм. Представленные данные показывают, что при длине 20 мм зона, в которой достигается максимальный вектор Пойнтинга, выходит за пределы разрядной ячейки через отверстие в катоде ионного источника и охватывает траверс с анодным напряжением. В процессе исследования режимов работы ускорителя в этих условиях фиксировали объемное свечение разряда на обратной стороне катода ионного источника. Для магнитной системы длиной 15 мм напряженность магнитного поля за катодом снижалась, и зона максимального вектора Пойнтинга была локализована внутри разрядной ячейки. При работе установки с укороченной магнитной системой побочный разряд на внеш-



Р и с. 3. Распределение вектора Пойнтинга и области горения побочного разряда для штатной (а) и укороченной магнитной системы (б): 1 — катод; 2 — траверс; 3 — анод; 4 — антикатод; 5 — магнитная система

ней стороне катода ионного источника не зажигался.

Для практического применения ионных источников с укороченными магнитными системами в составе разрабатываемой аппаратуры необходимо одновременно с подавлением условий зажигания побочных разрядов добиться сохранения выходных параметров малогабаритных ускорителей. В частности, при использовании таких ускорителей в нейтронных генераторах должен обеспечиваться заданный нейтронный поток при определенных параметрах системы питания (анодное и ускоряющее напряжение, мощность источника ионов).

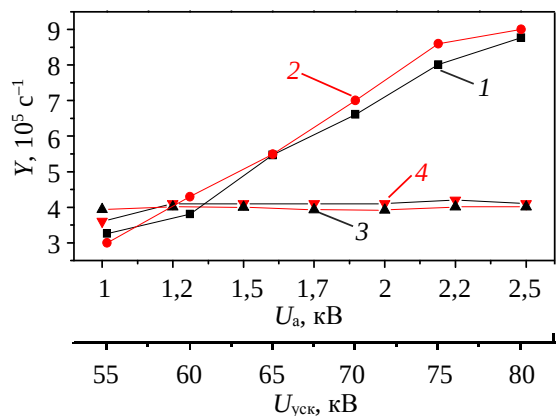
На рис. 4 показаны измеренные зависимости потока нейтронов от ускоряющего и анодного напряжения, полученные при исследовании режимов работы малогабаритного ускорителя со штатной 20 мм и укороченной 15 мм длиной магнитной системы. Приведенные данные показывают, что при использовании на ионном источнике предложенной по результатам исследований укороченной магнитной системы нейтронный поток не уменьшился.

**Заключение.** Таким образом, результаты моделирования распределения магнитного поля и вектора Пойнтинга в ионном источнике Пеннинга для разных магнитных систем позволили выявить область горения побочного разряда за пределами разрядной ячейки при использовании штатной магнитной системы. На основе исследований предложена и апробирована магнитная система, позволившая предотвратить горение побочного разряда с одновременным сохранением режимов работы ионного источника и нейтронного потока малогабаритного ускорите-

ля. Практическое использование предложенной магнитной системы на нескольких миниатюрных линейных ускорителях подтвердило запыление проходного анодного изолятора и более чем в 2 раза увеличило ресурс ионного источника и ускорительных систем, созданных на его основе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сыромуков С.В., Степнов В.В., Добров Р.В. и др. Генератор нейтронов НГ-24 для ядерной медицины и термоядерных исследований. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 1, с. 58—60.
2. Головин Д.В., Мокроусов М.И., Митрофанов И.Г. и др. Прибор АПРОН-ЛР для активного нейтронного зондирования состава лунного вещества. — Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы, 2021, т. 55, вып. 6, с. 542—549.
3. Рачков Р.С., Пресняков А.Ю., Юрков Д.И. Исследование влияния магнитного поля скважины на нейтронную трубку геофизической аппаратуры. — Атомная энергия, 2019, т. 126, вып. 6, с. 334—337.
4. Valkovic V. 14 MeV Neutrons. Physics and Applications. Boca Raton: CRC Press Taylor&Francis Group, 2016. 500 p.
5. Aleksakhin V.Yu., Bystritsky V.M., Zamyatin N.I. e.a. Detection of diamonds in kimberlite by the tagged neutron method. — Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2015, v. 785, p. 9—13.
6. Алексехин В.Ю., Быстрицкий В.М., Замятин Н.И. и др. Применение метода меченых нейтронов для обнаружения опасных веществ под водой. — Письма в ЭЧАЯ, 2013, т. 10, вып. 7, с. 1384—1395.
7. Mamedov N.V., Shchitov N.N., Kolodko D.V. e.a. Discharge characteristics of the Penning plasma source. — Techn. Phys., 2018, v. 63, № 8, p. 1129—1136. DOI: 10.1134/S1063784218080121.
8. Sy A., Ji Q. Ion beam collimation for improved resolution in associated particle imaging. — AIP Conf. Proc., 2011, № 1336, p. 533—537. DOI: 10.1063/1.3586157.
9. Sy A., Ji Q., Persaud A. e.a. Ion source and beam guiding studies for an API neutron generator — Ibid., 2013, № 1525, p. 123—127. DOI: 10.1063/1.4802304.
10. Yu Z., Zhao S., Guo W. e.a. Simulation of Penning ion source with optimized beam extraction system for tagged neutron tube. — Optik, 2020, № 213(113), p. 164789. DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.164789.
11. Mamedov N.V., Gubarev A.V., Zverev V.I. e.a. Magnetic field design for miniature pulse penning ion source. — Plasma Sources Sci. Techn., 2020, v. 29, № 2, p. 025001.
12. Mamedov N.V., Maslennikov S.P., Solodovnikov A.A. e.a. Effect of the magnetic field on the characteristics of a pulsed Penning ion source. — Plasma Phys. Rep., 2020, v. 46, № 2, p. 217—229.
13. Mamedov N.V., Maslennikov S.P., Presnyakov Yu.K. e.a. Penning ion source discharge modes for pulsed and continuous power supplies. — Techn. Phys., 2019, v. 64, № 9, p. 1290—1297. DOI: 10.1134/S1063784219090081.



Р и с. 4. Зависимость нейтронного потока от ускоряющего (1, 2) и анодного напряжения (3, 4) для штатной (1, 3) и укороченной магнитной системы (2, 4)

14. Каньшин И.А., Солодовников А.А. Измерение эмиттанса пучка заряженных частиц в малогабаритных линейных ускорителях. — Приборы и техника эксперимента, 2020, № 2, с. 30—39.
15. Kanshin I.A. Trajectory analysis of the corpuscular flow extracted from a small-sized linear accelerator plasma

source. — In: 7th Intern. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), 2020, p. 474—478. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9241976.

Поступила в Редакцию 25.05.24  
Принята к опубликованию 28.03.25

УДК 621.039.6

## РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО БЛАНКЕТА ТЕРМОЯДЕРНОЙ ГИБРИДНОЙ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАРАБОТКИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Данилов И.В., Ларионов И.А., Лешуков А.Ю., Лопаткин А.В., Лукасевич И.Б., Размеров А.В., Свириденко М.Н., Стребков Ю.С., Сысоев А.Г. (АО «НИКИЭТ», г. Москва)  
e-mail: lksv@nikiet.ru

Одним из направлений применения управляемого термоядерного синтеза является топливообеспечение крупномасштабной ядерной энергетики. Эта идея, предложенная А.Д. Сахаровым и поддержанная И.В. Курчатовым в первой половине 1950-х гг., заключалась в использовании нейтронов термоядерного реактора для конверсии сырьевых изотопов в делящиеся [1, 2]. Реализация управляемого термоядерного синтеза в гибридном варианте, когда в установке задействованы реакции не только синтеза, но и деления, заметно расширяет его возможности, повышает эффективность с точки зрения энерговыхода и при решении задач, связанных как с дожиганием радиоактивных отходов ядерной энергетики, так и с наработкой топлива для ядерных и термоядерных реакторов [3—6].

В настоящее время в тепловых реакторах АЭС используется уран, обогащенный  $^{235}\text{U}$  до 4—5%. При этом более 90% добываемого природного урана направляется в отвал. В этих условиях включение отвального урана в энергетический цикл оказывается важной задачей. Естественным решением в рамках реализации наработки топлива с помощью термоядерной гибридной реакторной установки является его облучение. Другим вариантом является облучение тория в рамках развития торий-уранового ядерного цикла. Бланкет на основе отвального урана обладает большей эффективностью с точки зрения производительности, но ториевый бланкет характеризуется определенной спецификой, которая может быть использована в построении разных вариантов взаимодействия управляемого термоядерного синтеза и ядерной энергетики [7—9].

Указанная наработка топлива может быть реализована в бланкете термоядерной гибридной реакторной установки — конструкции, в которой сырьевые изотопы  $^{238}\text{U}$  или  $^{232}\text{Th}$  размещены в непосредственной близости от плазмы, облучаются высокоэнергетичными нейтронами, поступающими из плазмы, и в результате радиационного захвата нейтронов превращаются в делящиеся  $^{239}\text{Pu}$  или  $^{233}\text{U}$ .

Количественные исследования по наработке топлива в гибридной термоядерной системе были проведены в отношении как ториевого [10, 11], так и уранового бланкета [12, 13]. Однако они в основном выполнялись в условиях, не учитывающих инженерную реализацию конструкций. В настоящей статье рассматриваются урановый и ториевый бланкеты с функцией наработки ядерного топлива в рамках конструкторской разработки их элементов.

**Постановка задачи, задание исходных данных, критерии, определение расчетной схемы.** В 2021 г. в АО «НИКИЭТ» была начата разработка концепции и проекта твердотельного бланкета термоядерной гибридной реакторной установки, предназначенной исключительно для наработки топлива для ядерных реакторов АЭС. Первые исследования и решения на начальной стадии разработки проекта описаны в [14, 15]. В 2024 г. разработка продолжилась на этапе эскизного проекта.

Твердотельный бланкет термоядерной установки разрабатывается в рамках следующих положений:

бланкет рассматривается как наработчик топлива для ядерных реакторов АЭС, другие функции не предусматриваются;