

Малогабаритный плазменный диод с прозрачным внутренним катодом для генерации нейтронов

© А.Е. Шиканов, Е.Д. Вовченко, К.И. Козловский, В.Л. Шатохин

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия
e-mail: vlshatokhin@mephi.ru

(Поступило в Редакцию 27 декабря 2013 г.)

Исследована разрядная плазменная система для генерации нейтронов, основанная на принципе инерционно-электростатического удержания. Устройство выполнено в виде газонаполненного (давление 1–60 Па) диода с составным полым катодом, расположенным в центре диодной системы и симметрично охватываемым полым цилиндрическим анодом. Предыонизация разрядного промежутка и оригинальная конструкция электродной системы с прозрачной центральной областью обеспечивают формирование импульсного высоковольтного (~ 100 – 150 кВ) разряда с объемной формой и режимом осцилляции ионов. Оценка эмиссии нейтронов в таком диоде с дейтериевым наполнением показывает возможность генерации импульса с выходом $\sim 10^5$ нейтронов в реакции $D(d, n)^3\text{He}$ и подтверждается экспериментально в оптимизированной геометрии электродов.

Введение

Внедрение ядерно-физических методов в различные области науки и техники привело к созданию портативных импульсных нейтронных генераторов (ИГН) с широким диапазоном параметров излучения и высокими эксплуатационными характеристиками [1–3]. Подобные устройства уже широко применяются при геофизических исследованиях урановых месторождений и нефтегазовых скважин, а также при разработке компактных досмотровых систем обнаружения опасных веществ. Спектр задач, решаемых с помощью этих приборов, непрерывно расширяется и стимулирует поиск и развитие новых технических решений повышения нейтронного выхода и ресурса работы.

ИГН на основе плазменного фокуса (ПФ) — один из наиболее мощных и интенсивных источников нейтронного излучения. Формирование ПФ происходит в компактных камерах со специальной формой электродов [4,5], заполненных рабочим газом (дейтерий или дейтерий-третиевая смесь). ПФ-системы имеют высокий выход — от $3 \cdot 10^7$ до 10^{12} нейтронов за импульс [3], однако существенно уступают ИГН на основе ускорительных трубок (УТ) [6] по массогабаритным показателям. Привлекательной чертой нейтронных УТ является возможность работы в импульсно-периодическом режиме, что позволяет получать в достаточно компактной конструкции ИГН поток до 10^{11} нейтронов в секунду [3]. При этом одна из наиболее важных и сложных задач по повышению технических и эксплуатационных характеристик подобных малогабаритных ИГН заключается в снижении нестабильности нейтронного потока и повышении ресурса работы.

Импульсные нейтронные УТ представляют собой ионный диод, в котором организовано ускорение ионов дейтерия или трития с целью протекания ядерных

реакций синтеза $D(d, n)^3\text{He}$, $T(d, n)^4\text{He}$ или $D(t, n)^4\text{He}$. Импульс ускоряющего напряжения обычно формируется высоковольтным трансформатором с ферромагнитным сердечником или генератором Аркадьева–Маркса. По способу получения ионов тяжелого водорода принято различать два типа УТ: вакуумные и газонаполненные.

В вакуумных УТ в качестве источника ионов применяются вакуумно-дуговые разряды или лазерная плазма [7–9]. Нейтроны образуются в результате ядерных реакций при бомбардировке ионами дейтерия нейтронно-образующей твердотельной мишени, содержащей дейтерий или тритий в окклюдированном состоянии. ИНГ данного типа обеспечивают поток в полный телесный угол до $5 \cdot 10^8$ (DD-реакция) и 10^{11} (DT-реакция) нейтронов в секунду при частоте генерации импульсов до 100 Hz и среднем ресурсе работы порядка сотни часов.

Одним из основных узлов газонаполненной УТ-плазменного диода является ионный источник нуклидов водорода, в качестве которого обычно применяется источник типа Пеннинга. Для получения ионов в таком источнике используется электрический разряд в скрещенных электромагнитных полях. Нейтроны образуются при воздействии ускоренных потоков нуклидов водорода на мишень, которая в результате бомбардировки постепенно разрушается, что снижает ресурс работы генератора. Кроме подобных конструкций в последнее время рассматриваются газонаполненные (давление ≥ 5 Па) разрядные системы, в которых специальная геометрия электродов с максимально прозрачной для ионов центральной областью разрядного промежутка, обеспечивает осцилляцию заряженных частиц. Реализация подобного импульсного генератора нейтронов основана на принципе инерционно-электростатического удержания дейтронов [10] в ИЕС (Inertial Electrostatic Confinement) разрядных системах. Ядерные реакции осуществляются в результате двух видов столкновений ускоренных

дейтронов: встречных потоков между собой (канал 1) и потоков ускоренных дейтронов с дейтронами, нейтральными атомами и молекулами дейтерия, заполняющего объем плазменного диода (канал 2) [11]. Повышенный интерес к ИЕС-системам вызван возможностью организации ядерных реакций только за счет пучково-плазменного взаимодействия дейтронов без применения в конструкции ИГН твердотельной мишени. Как следствие — ожидаемый высокий ресурс устройства, хотя полный поток нейтронов составляет всего 10^7 (DD-реакция) нейтронов в секунду.

Эти идеи легли в основу разработки в НИЯУ МИФИ действующих макетов ИГН на основе малогабаритных плазменных ИЕС-диодов с осцилляцией дейтронов.

Лабораторная установка

Исследования проводились на лабораторной установке (рис. 1), состоящей из плазменного ИЕС-диода и системы диагностик. Плазменный диод размещался в рабочей камере (объем ~ 21 , давление $\sim 5 \cdot 10^{-2}$ Па), снабженной средствами откачки и контроля вакуума. Система электродов изолирована от стенок рабочей камеры. Анод заземлен, а на потенциальный катод подавался высоковольтный импульс отрицательной полярности. В качестве источника ускоряющего напряжения использовался генератор импульсных напряжений (ГИН) с повышающим трансформатором (амплитуда в режиме холостого хода $U \leq 150$ кВ, длительность импульса $t \approx 3 \mu\text{s}$).

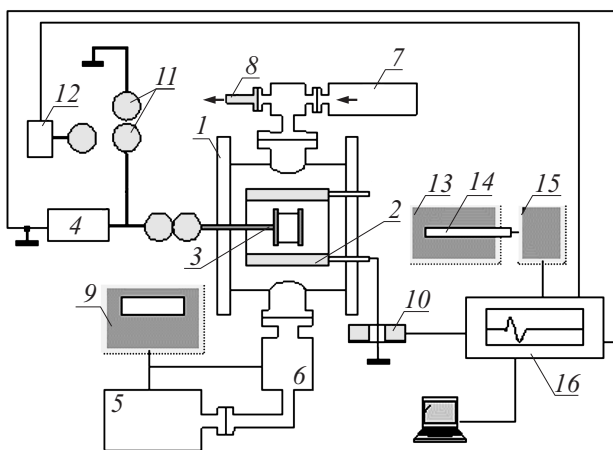


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 — рабочая камера (сталь 12X18H9T); 2 — анод; 3 — катод; 4 — генератор импульсных напряжений; 5 — мембранный насос (MD1, Vario); 6 — турбомолекулярный насос (TDH 071, Pfeiffer); 7 — система напуска и дозировки дейтерия; 8 — датчик давления (TPR 280, Pfeiffer); 9 — контроллер управления насосами; 10 — пояс Роговского; 11 — шаровой измерительный разрядник; 12 — делитель напряжения; 13 — замедлитель; 14 — нейтронный счетчик; 15 — предварительный усилитель; 16 — цифровой осциллограф.

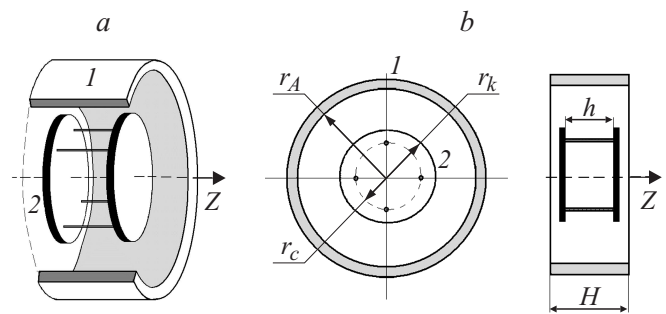


Рис. 2. Внешний вид (a) и конструкция (b) электродной системы аксиального ИЕС-диода: 1 — цилиндрический анод; 2 — катодные диски со стягивающими штангами.

Ток в цепи диода измерялся поясом Роговского. Для контроля напряжения на выходе ГИН использовался шаровой разрядник. Ускоряющее напряжение с плазменной нагрузкой измерялось емкостным делителем. Диагностика нейтронов включает замедлитель, счетчик тепловых нейтронов и предварительный усилитель с блоком питания. Регистрация всех импульсов осуществлялась цифровым осциллографом Tektronix TDS 2012B.

Электродная система аксиального ИЕС-диода (рис. 2) состоит из внутреннего полого катода, расположенного в центре диодной системы, и внешнего цилиндрического анода. Полный катод выполнен в виде двух параллельных соосных дисков радиуса r_k , соединенных между собой с помощью четырех тонких металлических стержней-штанг длиной h , расположенных перпендикулярно к поверхностям дисков и симметрично относительно оси диода на расстоянии r_c от нее. Внешний цилиндрический анод радиуса r_a и высотой H симметрично охватывает полный катод.

Эксперименты на водороде

В первых экспериментах решалась задача подавления искрового пробоя между электродами ИЕС-диода и получения однородного высоковольтного разряда. Эти эксперименты проводились при заполнении рабочего объема диода газообразным водородом, поскольку диагностика нейтронов на этом этапе не планировалась. Исследовалась особенность формирования разряда в зависимости от начальных условий: геометрии электродной системы, давления газа в рабочей камере диода, параметров высоковольтной системы возбуждения.

Эксперименты проводились при различных размерах электродной системы: $H = 0.06-0.10$ м, $h = 0.02-0.05$, $r_a = 0.03-0.06$, $r_k = 0.015-0.030$ м. Давление водорода варьировалось в пределах 1–60 Па. Под действием импульса высокого напряжения ($\sim 100-150$ кВ) в межэлектродном пространстве загорался разряд с полым катодом [12], характеризуемый большой величиной катодного падения потенциала (порядка напряжения на диодном зазоре). Устойчивая

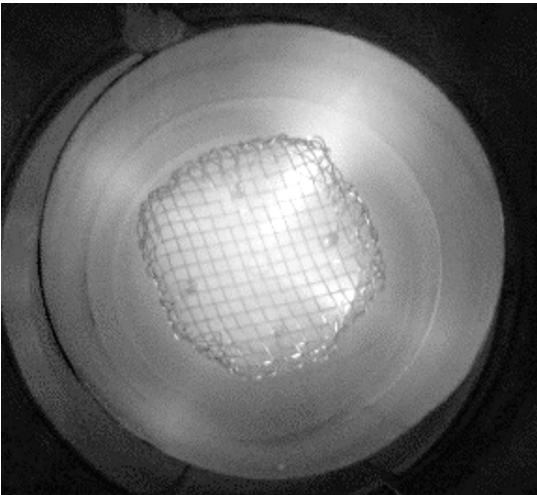


Рис. 3. Пространственная структура разряда при наличии преионизации.

объемная форма разряда наблюдалась только при сочетании высоковольтного возбуждения с предварительной ионизацией разрядного промежутка. В качестве источника преионизации использовался вспомогательный низковольтный тлеющий разряд с напряжением зажигания порядка 1 кВ. Ток в импульсе достигал 50 А.

Дополнительная качественная информация о пространственной структуре разряда получена с помощью цифровой фотокамеры. Регистрация осуществлялась со стороны, противоположной высоковольтному вводу. Для этого на вакуумную камеру был установлен прозрачный фланец из органического стекла. Катодный диск, расположенный ближе к фотокамере, в этих экспериментах выполнен в виде сетки. Такое изменение в конструкции катода оказалось несущественным для протекания высоковольтного разряда, однако обеспечило возможность наблюдения всего разрядного объема, включая и его центральную область.

На рис. 3 представлена фотография импульсного объемного разряда с полым катодом. Интенсивность его свечения слабо меняется в периферийной области между катодом и анодом. В центральной области (за сетчатым катодом) на фоне однородного свечения наблюдаются узкие яркие области, в которых интенсивность существенно возрастает по сравнению с другими зонами разряда. Эти области вместе составляют перекрестие из четырех лучей, проходящих посередине между стержнями, стягивающими катодные диски.

Формирование лучей обусловлено осцилляцией протонов в водородной плазме и наблюдалось только в узком диапазоне параметров возбуждения. Механизм осцилляций основан на следующих процессах. Извлекаемые из плазмы протоны ускоряются в области катодного падения потенциала и могут с большой вероятностью беспрепятственно пролетать через катодную полость, потеряв часть своей энергии на столкновениях в плазме.

В результате происходит захват протонов в потенциальную яму, где они начинают осциллировать. Таким образом, в радиальном направлении формируются встречные потоки протонов, которые взаимодействуют с плазмой в катодной полости и между собой. В дейтериевой плазме подобный режим обеспечивает эффективное протекание ядерной реакции $D(d, n)^3\text{He}$ и генерацию нейтронного импульса.

Расчетно-теоретическая модель

Проведен поиск оптимальной геометрии диодной системы и определены границы изменения всей совокупности ее геометрических параметров (r_a, r_k, r_c, H, h), в пределах которых ожидается получение максимального нейтронного выхода. Процесс оптимизации заключался в построении расчетно-теоретической модели удержания дейтронов в плазменном диоде и использовании компьютерного моделирования электростатических полей, поскольку экспериментальный путь требовал проведения большого объема измерений и весьма трудоемок.

В основе расчетно-теоретической модели лежит представление о зажигании в диодной системе электрического разряда на левой ветви кривой Пашена с последующим формированием в центральной области разрядного объема осциллирующих потоков быстрых дейтронов. В результате решения уравнения Пуассона численными методами в цилиндрических координатах r, z были выполнены расчеты распределения напряженностей электростатических полей $E_r(r, z)$ и $E_z(r, z)$. Затем эти данные использовались для решения системы уравнений динамики в сочетании с методом Монте-Карло и проведения компьютерного моделирования. Для области значений $50 < U < 150$ кВ в квазистационарном приближении получено аналитическое выражение для потока нейтронов Q (количества нейтронов, генерируемых плазменным ИЕС-диодом в единицу времени в полный телесный угол). Разработанная модель позволяет делать оценки величины Q в зависимости от параметров разряда, размеров электродной системы и допускает простую аппроксимацию, удобную для использования в практических целях,

$$Q \approx 10^5 w j r_a H (1 - 0.2w^2)(U - 30)(1 - t^{0.032})^{-1} [\text{n/s}], \quad (1)$$

где t — коэффициент прозрачности катодного электрода по дейтронному току, j [А/м²] — плотность разрядного тока, U [кВ] — напряжение на электродах, r_k, r_a, H [м] — размеры электродов, $w \approx 2pr_k/\theta$ — параметр. В условиях рассматриваемого эксперимента термодинамическое давление p лежит в пределах 1–60 Па, а температура $\theta \approx 1$ эВ, что соответствует диапазону изменения параметра w в пределах 10^{-1} –6 Па · м/эВ.

Для расчета потока нейтронов по формуле (1) анализировалась зависимость коэффициента прозрачности t от геометрических размеров электродной системы. Для

Коэффициент прозрачности, t	Множитель $(1 - t^{0.032})^{-1}$
0.5	45.6
0.6	61.7
0.7	88.1
0.8	140.6
0.9	297.1
0.95	609.7
0.97	1026.5

этого проводился компьютерный эксперимент, в котором рассматривалось движение дейтронов в диодной системе на основе уравнений динамики, и определялась вероятность попадания дейтронов на катодные диски и стержни. Результаты расчетов показали, что в области напряжений $U \leq 150$ kV коэффициент прозрачности зависит в основном от отношения радиуса ρ стержней, стягивающих катодные диски, к радиусу анода r_a . Для его оценки можно воспользоваться простым приближением $t \approx 1 - 2\rho/r_a$, которое выполняется с хорошей точностью и при выбранных экспериментальных условиях дает величину t , близкую к единице. Влияние коэффициента прозрачности и вклад последнего множителя формулы (1) в величину Q иллюстрируют данные таблицы.

Характерное семейство зависимостей потока нейтронов Q от напряжения U при различных значениях параметра p представлено на рис. 4. При проведении расчетов учитывалось, что $r_a = 5 \cdot 10^{-2}$ m, $r_k = 4 \cdot 10^{-2}$ m, $r_c = 2 \cdot 10^{-2}$ m, $H = 3 \cdot 10^{-2}$ m, коэффициент прозрачности $t = 0.97$. Плотности тока в разряде с полым катодом, согласно [11], в рассматриваемом случае составляют

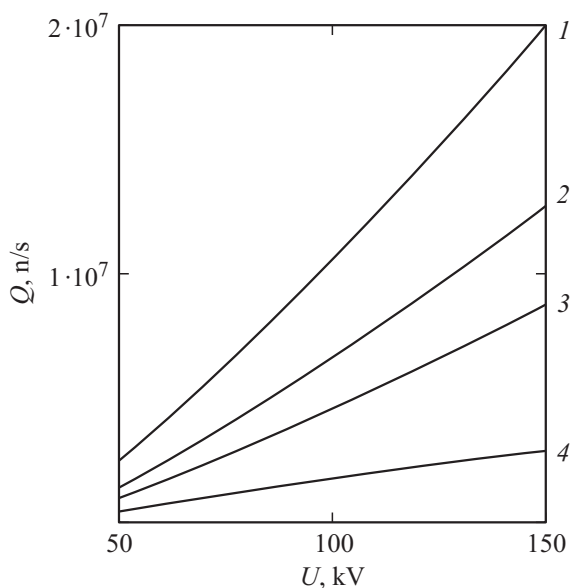


Рис. 4. Зависимости среднего потока нейтронов Q в полный телесный угол от напряжения U при различных значениях параметра $p = 1.0$ (1); 0.5 (2); 0.3 (3); 0.1 (4).

величину $j \approx 10^2$ [A/m²]. Эта величина получена с использованием данных из работ [12,13] и определяет режим горения разряда с полым катодом.

На основании этих расчетов с учетом формулы (1) были уточнены соотношения геометрических размеров диодной системы, при которых нейтронный выход максимален:

$$0.95 \leq \frac{H}{h} \leq 1.05, \quad 0.85 \leq \frac{r_k}{h} \leq 1.15,$$

$$1.25 \leq \frac{r_a}{r_k} \leq 1.45, \quad 0.50 \leq \frac{r_c}{r_k} \leq 0.75.$$

Эксперимент на дейтерии

Измерение выхода нейтронов в импульсе проводилось с помощью специально разработанного нейтронного детектора на основе ³He с предварительным замедлением нейтронов. Калибровка системы детектирования осуществлялась с использованием эталонного Pu-Ве-ампульного источника нейтронов с потоком в полный телесный угол 10^5 n/s.

На рис. 5 представлены экспериментальная и расчетная зависимости нейтронного выхода за один импульс от амплитуды напряжения на диодном зазоре. При снятии этой кривой для каждой экспериментальной точки осуществлялись оптимизация нейтронного выхода по давлению и контроль пространственной структуры импульсного разряда. При получении теоретической зависимости учитывались поправки в формуле (1) на импульсный режим (зависимости j и U от времени). Результаты эксперимента хорошо согласуются с расчетной моделью. Следует ожидать, что организация импульсно-периодического режима с частотой следования порядка 100 Hz приведет к потоку нейтронов $Q \approx 10^7$ n/s, который по порядку величины соответствует оценкам

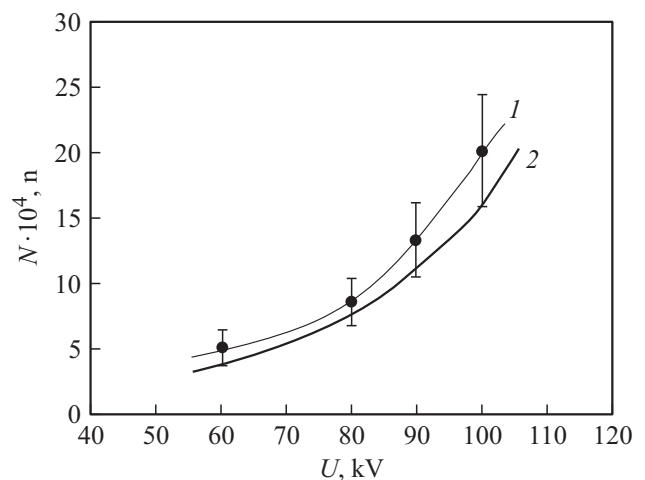


Рис. 5. Зависимость выхода нейтронов в импульсе N от амплитуды напряжения U на диодном зазоре: эксперимент (1); расчет (2).

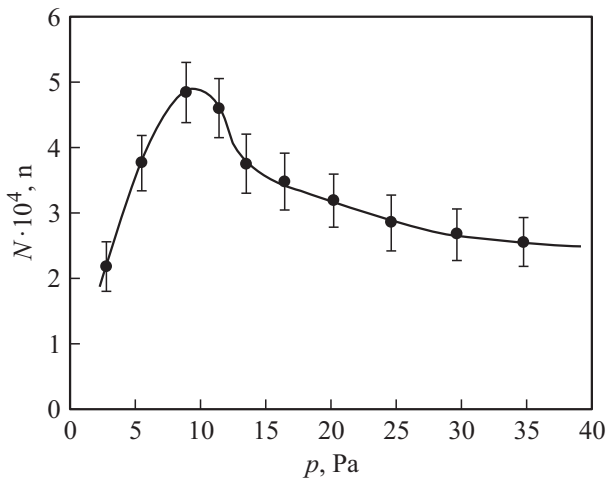


Рис. 6. Зависимость выхода нейтронов в импульсе N от давления p в рабочей камере.

величины Q , выполненным в квазистационарном приближении по формуле (1).

Исследовалось влияние давления в рабочей камере на выход нейтронов в импульсе (рис. 6). Увеличение давления, как и следовало ожидать, приводит к росту нейтронного выхода благодаря более эффективным условиям протекания ядерных реакций и увеличению числа актов взаимодействия между дейтронами. Однако дальнейший рост Q ограничивается развитием в разряде неустойчивостей, приводящих в конечном счете к искровому пробою между электродами. Таким образом, на экспериментальном графике отчетливо прослеживается максимум нейтронного выхода при давлении порядка 10 Па.

Заключение

Развита модель удержания ионов тяжелого водорода в плазменном ИЕС-диоде азимутально-симметричной геометрии с целью организации протекания реакции ядерного синтеза. Оригинальная конструкция электродной системы с внутренним полым катодом обеспечивает формирование импульсного высоковольтного разряда с объемной формой и режимом осцилляции. Оценка эмиссии нейтронов в таком диоде с дейтериевым наполнением показывает возможность генерации потока нейтронов $Q \approx 10^7$ n/s в импульсно-периодическом режиме (реакция $D(d, n)^3\text{He}$) с повышенным ресурсом срабатывания и подтверждается экспериментально в оптимизированной геометрии электродов.

Пересчет выхода на сечение реакции $T(d, n)^4\text{He}$ показал, что при переходе на дейтерий-тритиевую смесь реально ожидать получения нейтронного выхода, на два порядка превышающего выход, полученный в описанных экспериментах за счет увеличения сечения ядерной реакции. С учетом реализации частотного режима срабатываний устройства (рабочая частота до 100 Hz)

можно ожидать получения средних нейтронных потоков в полный телесный угол на уровне 10^9 n/s. Источник с такими параметрами может успешно конкурировать с традиционными ускорительными трубками. Имеется перспектива увеличения нейтронного выхода за счет одновременного увеличения напряжения и магнитной изоляции диодного зазора.

Список литературы

- [1] Боголюбов Е.П., Рыжков В.И. // ПТЭ. 2004. № 2. С. 160–163.
- [2] Бармаков Ю.Н., Боголюбов Е.П., Микеров В.И., Смирнов Г.А. // Ядерная физика и инжиниринг. 2010. Т. 1. № 1. С. 61–69.
- [3] Сб. докладов Международной научно-технической конференции „Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе“ / Под ред. Ю.Н. Бармакова. М.: ВНИИА, 2013. 620 с.
- [4] Макеев Н.Г., Румянцев В.Г., Черемухин Г.Н. Физика и техника импульсных источников ионизирующих излучений для исследования быстропротекающих процессов / Под ред. Н.Г. Макеева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1996. 281 с.
- [5] Боголюбов Е.П., Иванов Ю.П., Лемешко Б.Д. Сб. материалов Международной научно-технической конференции „Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе“. М.: ВНИИА, 2004. С. 95–98.
- [6] Гулько В.М., Ключников А.А., Коломиец Н.Ф., Михайлов Л.В., Шиканов А.Е. Ионно-вакуумные приборы для генерации нейтронов в электронной технике. Киев: Техника, 1988. 136 с.
- [7] Суховеев С.П. // ЖТФ. 1979. Т. 49, № 5. С. 1027–1029.
- [8] Цыбин А.С., Шиканов А.Е. Изв. ВУЗов. Физика. 1985. № 8. С. 3–31.
- [9] Диденко А.Н., Рациков В.И., Рыжков В.И., Шиканов А.Е. ВАНТ. 2012. № 4. С. 129–132.
- [10] Miley G.H. // J. Appl. Radiat. Isot. 1997. Vol. 48. N 10–12. P. 1557–1561.
- [11] Кузнецов А.Ю., Цыбин А.С., Шиканов А.Е. Изв. ВУЗов. Физика. 2010. Т. 53. № 4. С. 50–56.
- [12] Москалев Б.Н. Разряд с полым катодом. М.: Наука, 1967.
- [13] Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.