

Сохраняемость камер плазменного фокуса с дейтерий-тритиевым заполнением

Д. И. Юрков, В. А. Лавренин, Б. Д. Лемешко, Ю. В. Михайлов,
И. А. Прокуратов, А. К. Дулатов

В работе приведены результаты экспериментального изучения сохраняемости герметичных камер плазменного фокуса (ПФ) с дейтерий-тритиевым и дейтериевым заполнениями. Сохраняемость определяется как поддержание уровня выхода нейтронного излучения при работе камер ПФ в составе импульсных нейтронных генераторов после длительных интервалов хранения. Выделение примесей с внутренних поверхностей камеры ПФ и накопление гелия He^3 вследствие распада трития в объеме отпаянных камер ПФ приводит к значительному снижению уровня выхода нейтронного излучения через несколько лет после заполнения камеры рабочей смесью. В статье показано, что сохраняемость камер значительно увеличивается при использовании генератора газа, в котором изотопы водорода содержатся в связанном состоянии, и выделяются во внутренний объем камеры только на время работы в составе нейтронных генераторов. Экспериментально показано, что сферические камеры типа ПФ9 обеспечивают уровень выхода нейтронного излучения Y , близкий к начальному значению Y_0 при производстве камер, спустя более чем 10 лет хранения.

Ключевые слова: камера плазменного фокуса, плазменный фокус, импульсное нейтронное излучение, дейтерий-тритий, дейтерий.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-4-347-358

Введение

В работе рассматриваются импульсные источники нейтронного излучения на основе камер плазменного фокуса (ПФ) [1],

обеспечивающие длительность импульса нейтронов порядка десятков наносекунд. Такой тип нейтронных источников обеспечивает максимальные значения плотности потока нейтронов (в единицах

Юрков Дмитрий Игоревич¹, зам. директора – первый зам. гл. конструктора¹, к.т.н.

Лавренин Виктор Анатольевич², начальник ВП.

Лемешко Борис Дмитриевич¹, в.н.с, д.т.н.

Михайлов Юрий Владимирович¹, нач. лаборатории, к.т.н.

Прокуратов Илья Александрович¹, вед. инженер.

Дулатов Али Каюмович¹, нач. отдела, к.т.н.

E-mail: akdulatov@vniia.ru

¹ ФГУП ВНИИА им. Н. Л. Духова.

Россия, 127055, Москва, Суцевская ул., 22.

² 1425 военное представительство Министерства обороны РФ.

Россия, 127055, Москва, Суцевская ул., 22.

Статья поступила в редакцию 24 мая 2021 г.

© Юрков Д. И., Лавренин В. А., Лемешко Б. Д., Михайлов Ю. В., Прокуратов И. А., Дулатов А. К., 2021

нейтр./с см²) и представляет интерес для целей изучения взаимодействия нейтронов с веществом [2], нейтронографии [3], настройки импульсных детекторов ионизирующих излучений [4] и др.

Как правило, импульсные нейтронные источники являются достаточно громоздкими, лабораторными устройствами (например, Z-пинчевые установки на основе генераторов Аркадьева-Маркса, источники на основе взаимодействия лазерного излучения с твердотельной мишенью и т. д. [5–7]), поэтому исследуемые образцы должны быть установлены вблизи этих устройств, что является не всегда удобным и возможным. Во ВНИИА разработана линейка достаточно компактных, транспортабельных импульсных нейтронных генераторов на базе камер ПФ, обеспечивающих выход нейтронов от 10^5 до 10^{12} нейтр./имп. и длительность импульса от 10 до 50 нс [8]. Относительно небольшие размеры генераторов и уникальные параметры излучения позволяют использовать нейтронные генераторы ВНИИА на камерах ПФ в различного рода физических экспериментах.

В таких генераторах в качестве высокопоточного источника питания использована конденсаторно-коммутаторная сборка, а в качестве нагрузки – камера ПФ. Камера ПФ является двухэлектродной герметичной вакуумной системой. Конструкция камер ПФ выполнена таким образом, чтобы цилиндрические или сферические проводящие электроды камеры были расположены вдоль одной оси один внутри другого и разделены изоляторным узлом. Внутренний объем камер ПФ заполняется рабочим газом, а именно, дейтерием (D) для генерации нейтронов с энергией 2,5 МэВ и дейтерий-третиевой (D-T) смесью для генерации нейтронов с энергией 14 МэВ. При передаче энергии от конденсаторно-коммутаторной сборки, заряжаемой до рабочего напряжения 20–25 кВ, в камеру ПФ происходит пробой газа вдоль

изолятора, формирование токоплазменной оболочки, её последующее ускорение вдоль электродов камеры и сжатие на оси в плотное высокотемпературное пинчевое образование [9]. Пинч является импульсным источником нейтронов с характерным размером порядка мм и длительностью генерации импульса нейтронов порядка десятка нс [10].

Сама по себе камера ПФ является сменной частью генератора. Таким образом, один образец импульсного нейтронного генератора обеспечивает выход нейтронов с энергиями 2,5 МэВ или 14 МэВ в зависимости от типа установленной камеры ПФ. Поскольку для генерации 14 МэВ-ных нейтронов камеры ПФ заполняются D-T смесью, то они относятся к классу радиоактивных источников. После отработки своего ресурса камеры ПФ с D-T смесью квалифицируются как радиоактивные отходы и утилизируются в соответствии с установленными правилами. Ресурс работы камер ПФ сильно зависит от вкладываемой энергии накопителя и для малогабаритных камер с выходом $10^5 \div 10^8$ нейтр./имп. составляет тысячи срабатываний [11]. При увеличении вкладываемой энергии, ресурс камер ПФ резко снижается. Характерный ресурс работы камер ПФ, обеспечивающих выход нейтронов 10^{11} нейтр./имп. (D-T-наполнение), составляет сотни срабатываний. Обычно при применении импульсных источников нейтронов на камерах ПФ с большим выходом за один импульс для целей калибровки измерительной аппаратуры и нейтронно-физических исследований, работа проводится сериями срабатываний по несколько десятков включений и длительными перерывами между сериями. Генераторы с камерами ПФ, например, используются при первичной калибровке импульсных детекторов нейтронного излучения и их последующей проверке через фиксированные промежутки времени. В таком случае встает вопрос сохранности характеристик нейтронного

излучения, в особенности уровня выхода нейтронов, при длительном хранении камер ПФ с дейтерий-тритиевым наполнением. Период полураспада трития составляет 12,3 года, его распад сопровождается накоплением He^3 в объеме камер [12], что негативно сказывается на уровне выхода нейтронов. Для камер ПФ отпаянной конструкции, постоянно заполненных рабочим газом (D-T-наполнение), с номинальным выходом $(0,8 \div 1,2) \times 10^{11}$ нейтр./имп. срок сохраняемости составляет 1–2 года, после чего значение среднего выхода снижается более чем в 3 раза.

Целью данной работы является подробное рассмотрение процессов накопления He^3 в объеме отпаянных камер ПФ и конструкций камер ПФ, исключаящих накопление He^3 в рабочем объеме камер, а также результатов экспериментальных исследований сохраняемости камер ПФ с D-T-наполнением.

Процессы в объеме камеры ПФ при хранении

Начнем рассмотрение с газонаполненных отпаянных камер ПФ с D-T-наполнением, которые после изготовления заполняются рабочим газом до определенного давления и герметизируются. В качестве электродов камер используется бескислородная медь (99,97 %). При срабатывании камеры происходит локальный нагрев поверхностей электродов и изолятора камеры с выделением адсорбированных газов и накоплением их в рабочем объеме. Проведенные экспериментальные исследования показали, что при содержании вредных примесей в количестве $1 \div 2$ % выход уменьшается в $2 \div 3$ раза, а при содержании вредных примесей в количестве $10 \div 15$ %

примерно в $5 \div 10$ раз [13]. Надо отметить, что при хранении камеры происходит распад трития по закону радиоактивного распада:

$$N_T(t) = N_{T_0} \exp(-t/t_e), \quad (1)$$

где $N_T(t)$ – концентрация атомов трития, N_{T_0} – начальная концентрация атомов трития, а $t_e = 17,7$ лет – время уменьшения числа атомов трития в e раз. Кроме того, электроны β -распада трития $T_1^3 \rightarrow e^- + \nu_e + \text{He}^3$, имеющие среднюю энергию 5,7 кэВ [12], бомбардируют поверхность электродов и изолятора, что способствует выделению газов в объем камеры и уменьшает нейтронный выход. Изменение относительных концентраций атомов трития $N_{T\%}(t)$ и гелия $N_{\text{He}^3\%}(t)$ в объеме газонаполненной камеры ПФ при хранении в течение времени t при исходном наполнении 50/50 % D и T (начальные концентрации атомов дейтерия и трития равны, $N_{T_0} = N_{D_0}$) определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} N_{T\%}(t) &= \frac{N_T}{N_D + N_T} = \\ &= \frac{N_{T_0} \exp(-t/t_e)}{N_{D_0} + N_{T_0} \exp(-t/t_e)} = \frac{\exp(-t/t_e)}{1 + \exp(-t/t_e)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{He}^3\%}(t) &= \frac{N_{\text{He}^3}}{N_D + N_T} = \\ &= \frac{N_{T_0} (1 - \exp(-t/t_e))}{N_{D_0} + N_{T_0} \exp(-t/t_e)} = \frac{1 - \exp(-t/t_e)}{1 + \exp(-t/t_e)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где N_{He^3} , N_D и N_T концентрации атомов He^3 , D и T в рабочем газе камеры ПФ. Расчеты по формулам (2), (3) убыли $N_{T\%}$ и накопления $N_{\text{He}^3\%}$ в объеме камеры по годам представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчеты убыли $N_{T\%}$ и накопления $N_{\text{He}^3\%}$ в объеме камеры по годам

Время хранения, лет	0	1	2	3	4	6	9	12,5	18
$N_{T\%}$, %	50,0	48,6	47,2	45,8	44,4	41,6	37,6	33,0	26,6
$N_{\text{He}^3\%}$, %	0	2,8	5,6	8,4	11,3	16,8	24,9	33,9	46,9

Накопление He^3 в объеме камеры вследствие распада трития влияет на выход нейтронов. Проведенные экспериментальные исследования на камерах ПФ показали, что уменьшение нейтронного выхода от содержания $N_{\text{He}^3\%}$ в камере ПФ имеет линейный характер. При $N_{\text{He}^3\%} = 6 \div 7\%$ средний выход нейтронов снижается на порядок. Практика показывает, что срок сохраняемости D-T-камер ПФ, даже без включений, будет составлять не более двух-трех лет вследствие значительного накопления He^3 в камере.

Второй тип камер ПФ, используемых во ВНИИА в составе импульсных нейтронных генераторов, – это камеры ПФ со встроенным генератором газа (ГГ) на основе пористого титана [14]. Они также являются отпаянными, вакуумными приборами, но рабочий газ в них содержится в отдельном блоке ГГ в связанном состоянии на поверхности и в объеме пористого титана. При этом блок ГГ герметично приваривается к внешнему электроду камеры и фактически никак не влияет на развитие разряда в камере при срабатывании. Перед работой с ГГ производится его насыщение изотопами водорода D и T путем проведения процедуры активировки [15]. После активировки рабочего тела ГГ пористый титан приобретает способность связывать изотопы водорода. Кроме того, при комнатной температуре ГГ поглощает помимо водорода и другие газы, находящиеся в камере, и поддерживает, тем самым, в объеме высокий вакуум. Перед включениями камеры ПФ ГГ подогревают до нужной температуры подачей тока накала, и рабочий газ выделяется во внутренний объем камеры на время работы. В камерах ВНИИА ГГ позволяет работать с D-T-наполнением при давлении до 50 Торр. В процессе работы давление рабочего газа может регулироваться путем изменения тока накала ГГ. После работы с камерой ГГ остывает и поглощает рабочий газ и примеси, которые остаются в ГГ на про-

тяжении всего времени хранения камер ПФ.

Исследования показали, что при небольшом содержании трития, He^3 , образующийся при его распаде, остается в связанном состоянии в пористом титане и не выделяется в объем камеры ПФ при нагревании до рабочих температур [16]. В камерах с ГГ тритий находится в связанном состоянии, к тому же титан необратимо захватывает все тяжелые примесные газы (кроме инертных), выделяющиеся со стенок камер ПФ вследствие абляции. Обратное выделение тяжелых газов из ГГ происходит при более высоких температурах, чем изотопов водорода. Поэтому в рабочих режимах поглощенные ГГ примеси не выделяются обратно, а остаются в связанном состоянии в пористом титане [17]. Также, поскольку радиоактивный тритий выделяется в объем камеры ПФ только на время её работы в составе генератора (десятки минут), а остальную часть времени (годы) при хранении тритий находится в связанном состоянии в ГГ, то β -электроны, образующиеся при распаде трития, не воздействуют на поверхность электродов камеры и изолятора. Эти обстоятельства способствуют увеличению срока сохраняемости отпаянных камер ПФ с ГГ.

В работе [13] приведен расчет относительного изменения выхода нейтронов отпаянных камер ПФ с ГГ, исходя из динамики изменения концентрации дейтерия и трития в объеме камеры ПФ. Результаты расчета показывают, что для отпаянной камеры ПФ без ГГ средний выход нейтронов снижается на порядок в течение двух лет, тогда как для отпаянных камер с ГГ средний выход нейтронов остается на уровне 60 % от номинального после 9 лет хранения. В той же работе экспериментально показано увеличение сохраняемости небольших камер ПФ, конкретно, на примере камеры ПФ7, работающей в составе генератора с запасаемой энергией < 2 кДж. Для нескольких образцов отпаянных камер

типа ПФ7, наполненных D-T-смесью без ГГ, средний выход снизился на 35–70 % за полгода. Для отпаянной камеры ПФ7 с ГГ средний выход нейтронов сохранился на прежнем уровне через 3,5 года хранения.

Экспериментальные результаты изучения сохраняемости камер ПФ

В этом разделе эмпирически рассматривается вопрос сохраняемости камер ПФ, рассчитанных на достаточно большую вкладываемую энергию (7 кДж и более) и, соответственно, обеспечивающих уровень выхода нейтронного излучения на несколько порядков больше по сравнению с образцами камер ПФ, работающих при меньших вкладываемых энергиях ~ 1 кДж. Конструктивной особенностью таких отпаянных камер является использование нескольких параллельно подключенных титановых поглотителей в одном блоке ГГ для обеспечения требуемого давления рабочего газа в объеме камеры. Экспериментальное изучение проведено на сферической камере типа ПФ9 (рис. 1) с диаметром внешнего электрода 120 мм. Внутренний объем такой камеры около 700 см^3 , а характерный рабочий диапазон давлений $12 \div 20$ Торр. Одного стандартного титанового поглотителя недостаточно для обеспечения необходимого уровня давления газа в объеме камеры. Требуемое давление

газа в камере может быть обеспечено путём увеличения массы рабочего элемента ГГ, но данный подход связан с технологическими сложностями и не позволяет использовать стандартный, апробированный узел ГГ с одним поглотителем. Поэтому параллельное подключение газопоглотителей в одном блоке ГГ рассматривается как более приемлемый вариант.

Экспериментальное изучение сохраняемости камер ПФ проведено на макетных образцах генератора нейтронов ИНГ-104. Генератор состоит из конденсаторно-коммутаторной сборки (четыре высоковольтных конденсатора типа КПИМ-42-9 и четыре коммутатора ТДИ1-50к/45СН), сплошных медных токоподводящих шин, соединяющих конденсаторно-коммутаторную сборку с нагрузкой, камеры ПФ9 как источника импульсного нейтронного излучения, а также блоков высоковольтного питания и управления генератором. Суммарная емкость конденсаторов составляет 36 мкФ, что обеспечивает запасаемую энергию до 9,5 кДж при зарядном напряжении 23 кВ. При этом амплитуда разрядного тока через камеру ПФ составляет ~ 600 кА. В составе данного генератора камера ПФ9 сразу после производства обеспечивает средний выход нейтронов с энергией 2,5 МэВ на уровне $(0,8 \div 1,2) \times 10^9$ нейтр./имп. и средний выход нейтронов с энергией 14 МэВ на уровне $(0,8 \div 1,2) \times 10^{11}$ нейтр./имп.

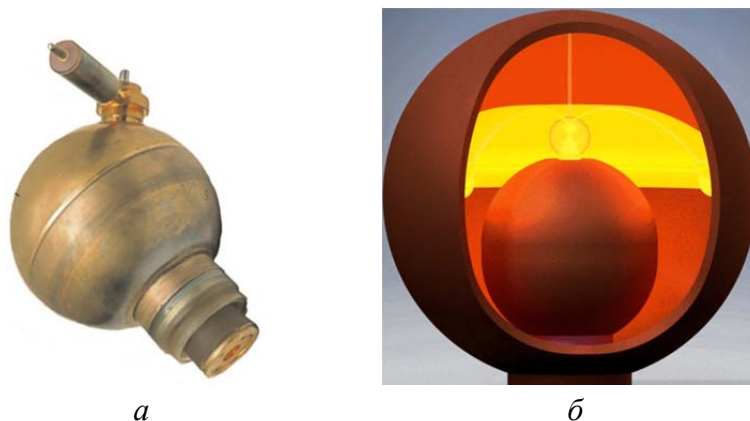


Рис. 1. Сферическая камера типа ПФ9: а – внешний камеры ПФ9 с блоком ГГ; б – расположение электродов и модельное изображение сжатия токоплазменной оболочки в пинч в камере ПФ9.

Работа по изучению сохраняемости проведена на двух образцах камер ПФ9: камера ПФ9 № 0162 (D-T), выпущенная в январе 2008 г., и камера ПФ9 № 0194 (D), выпущенная в январе 2009 г. Средний выход нейтронов через две недели после насыщения блока ГГ этих камер составил $\langle Y_0 \rangle = (0,8 \pm 0,1) \times 10^{11}$ нейтр./имп. для камеры ПФ9 № 0162 и $\langle Y_0 \rangle = (0,8 \pm 0,2) \times 10^9$ нейтр./имп. для камеры ПФ9 № 0194. После чего обе камеры были оставлены на длительное хранение. Для камеры ПФ9 № 0194 с дейтериевым насыщением ГГ повторные серии срабатываний проведены спустя 8,5 лет и 12 лет после насыщения ГГ. Полученная зависимость выхода

нейтронов Y при каждом срабатывании от времени испытаний t_{shot} относительно момента насыщения ГГ приведена на рис. 2. Испытания камеры после насыщения и спустя длительное хранение проводились при одинаковом значении зарядного напряжения генератора (18 кВ) и одинаковом значении тока накала блока ГГ (1,56 А). Ток накала ГГ определяет уровень нагрева ГГ и, соответственно, уровень давления рабочего газа в камере ПФ. Спустя 8,5 лет хранения средний выход нейтронов камеры ПФ9 № 0194 составил $(0,6 \pm 0,2) \times 10^9$ нейтр./имп., а спустя 12 лет средний выход составил $(0,4 \pm 0,1) \times 10^9$ нейтр./имп.

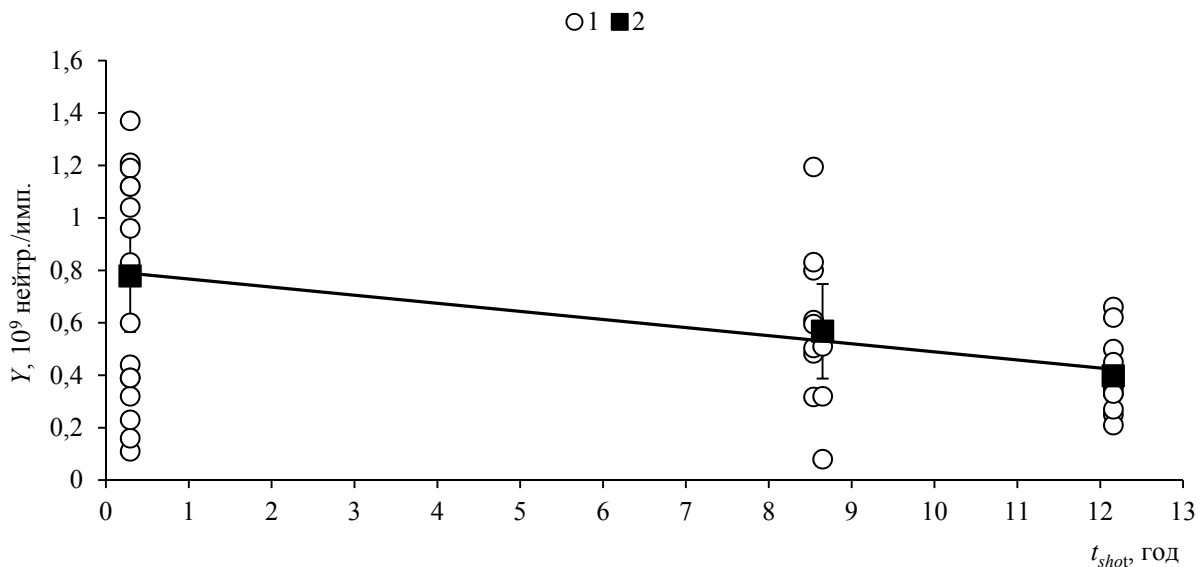


Рис. 2. Зависимость выхода нейтронов Y от времени испытаний t_{shot} относительно момента насыщения ГГ для камеры ПФ9 № 0194 (D), где 1 – выход нейтронов в отдельных последовательных срабатываниях камеры, 2 – средний выход нейтронов за серию срабатываний.

Результаты, полученные для камеры с дейтериевым наполнением, в целом положительны. Показано, что работоспособность камеры сохраняется спустя более чем 12 лет хранения, а средний выход снижается примерно в два раза. При этом рабочий режим камеры не изменился (18 кВ, 1,56 А).

Для камеры ПФ, заполненной D-T-смесью, ситуация ухудшается из-за распа-

да трития и накопления He^3 . Однако в предыдущем разделе показано, что для камер с ГГ эффект накопления He^3 не должен оказывать существенного влияния из-за его удержания внутри пористого титана в ГГ. Результаты проверки данных предположений на примере камеры ПФ9 № 0162 в составе макетных образцов генератора ИНГ-104 приведены на рис. 3. Проверка работоспособности камер через

5,5 лет показала, что по нескольким отдельным срабатываниям выход нейтронов сохранился на прежнем уровне, а через 7,8 лет и 9,5 лет средний выход нейтронов снизился на 12 % и 44 % соответственно.

Через 13 лет средний выход нейтронов камеры ПФ9 № 0162 составил $(0,5 \pm 0,1) \times 10^{11}$ нейтр./имп., всего на 38 % меньше среднего выхода сразу после насыщения блока ГГ камеры ПФ.

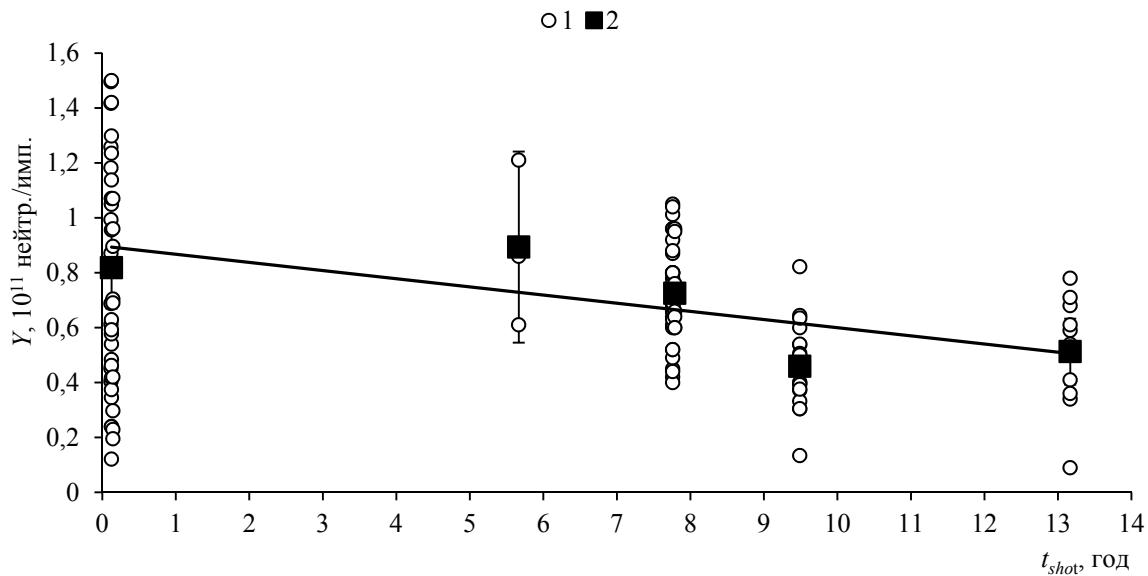


Рис. 3. Зависимость выхода нейтронов Y от времени испытаний t_{shot} относительно момента насыщения ГГ для камеры ПФ9 № 0162 (D-T), где 1 – выход нейтронов в отдельных последовательных срабатываниях камеры, 2 – средний выход нейтронов за серию срабатываний.

При этом все испытания на камере ПФ9 № 0162 (D-T) проведены при одинаковом значении зарядного напряжения (20 кВ) для сохранения значений амплитуды разрядного тока, но при разных значениях тока накала. Это связано с распадом трития. Поскольку со временем трития становится меньше, то для обеспечения исходного уровня давления в камере ПФ необходимо увеличивать температуру нагрева пористого титана в ГГ для большего выделения D-T-смеси. После насыщения рабочий ток нагревателя I_n составлял 1,48 А, через 9,5 лет увеличился до 1,65 А, а через 13 лет до 1,90 А. Одинаковость режима работы камеры обеспечивалась поддержанием равного значения «времени особенности», определяемого по кривой разрядного тока (время движения токоплазменной оболочки от момента образования до сжатия в пинч и генерации нейтронного излучения).

Измерения ионизационного тока камер ПФ

Динамика изменения тока накала ГГ в течение хранения D-T-камер ПФ достаточно важна для определения оптимальных режимов работы камер после периодов длительного хранения. Для количественной оценки рабочего тока накала (и давления газа в камере) проводится измерение ионизационного тока. При выделении трития в объеме камеры ПФ идет ионизация газа, обусловленная β -распадом трития, в результате чего образуются электроны и ионы. Если к электродам камеры подключить источник напряжения, то за счет организации направленного движения электронов и ионов возникает электрический ток (вариант ионизационной камеры), измеряя который, можно делать заключения о давлении газа в объеме камеры. Проводя аналогию с ионизационной камерой, зави-

симось ионизационного тока камеры ПФ от разности потенциалов между ее электродами имеет две характерные области (рис. 4).

В области I электрическое поле между электродами недостаточно, чтобы все электроны и ионы собирались на электродах, существенную роль при этом играют эффекты рекомбинации и диффузии. В области II электрическое поле достаточно, чтобы реализовать режим полного собирания заряда, это область плато (ток постоянен). Протяженность плато на вольт-амперной характеристике существенным образом зависит от конструкции камеры, состава газа, давления, температуры. Нижняя граница плато зависит от того, насколько велико значение процессов диффузии и рекомбинации. Верхняя граница плато определяется пороговой величиной напряжения, при которой в камере зажигается самостоятельный газовый разряд. Подавая на электроды камеры ПФ напряжение, соответствующее области II, и измеряя ионизационный ток, можно определять давление газа в камере. Таким образом, снимая зависимости ионизационного тока в камере ПФ от тока накала ГГ в разные моменты хранения камер ПФ,

можно проводить оценку содержания трития в камерах ПФ и корректировать оптимальный режим работы по значению тока накала.

В работе проведены измерения зависимостей ионизационного тока I_{ion} камеры ПФ9 № 0162 (D-T) от тока накала I_n ГГ камеры в различное время после хранения камер ПФ (рис. 5). Зависимости снимались при напряжении на электродах камеры 60 ± 10 В.

На рис. 5 горизонтальной пунктирной линией показано оптимальное значение ионизационного тока, определенное экспериментально после насыщения ГГ камеры ПФ9 № 0162. Эксперименты по изучению сохраняемости камеры № 0162 (рис. 3) проводились при одном значении $I_{\text{ion}} \approx 800$ нА для обеспечения одинаковых условий работы камеры. По рис. 3 видно, что спустя 13 лет средний выход нейтронов камеры № 0162 снизился примерно на 30 %. В случае выделения He^3 в объем камеры, снижение среднего выхода было бы значительно выше [13], поэтому можно сделать вывод о том, что титановый поглотитель в блоке ГГ эффективно удерживает He^3 .

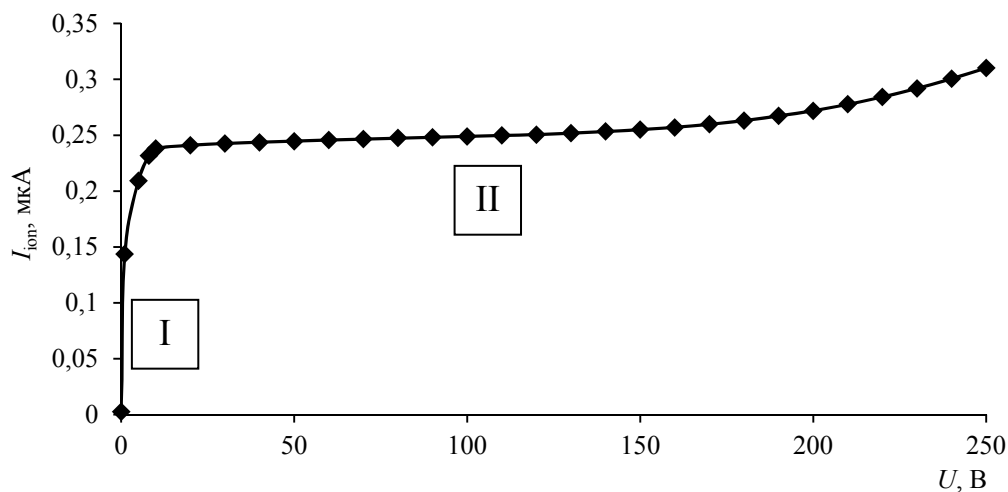


Рис. 4. Зависимость ионизационного тока в камере типа ПФ9 от разности потенциалов между ее электродами при токе $I_n = 1,25$ А.

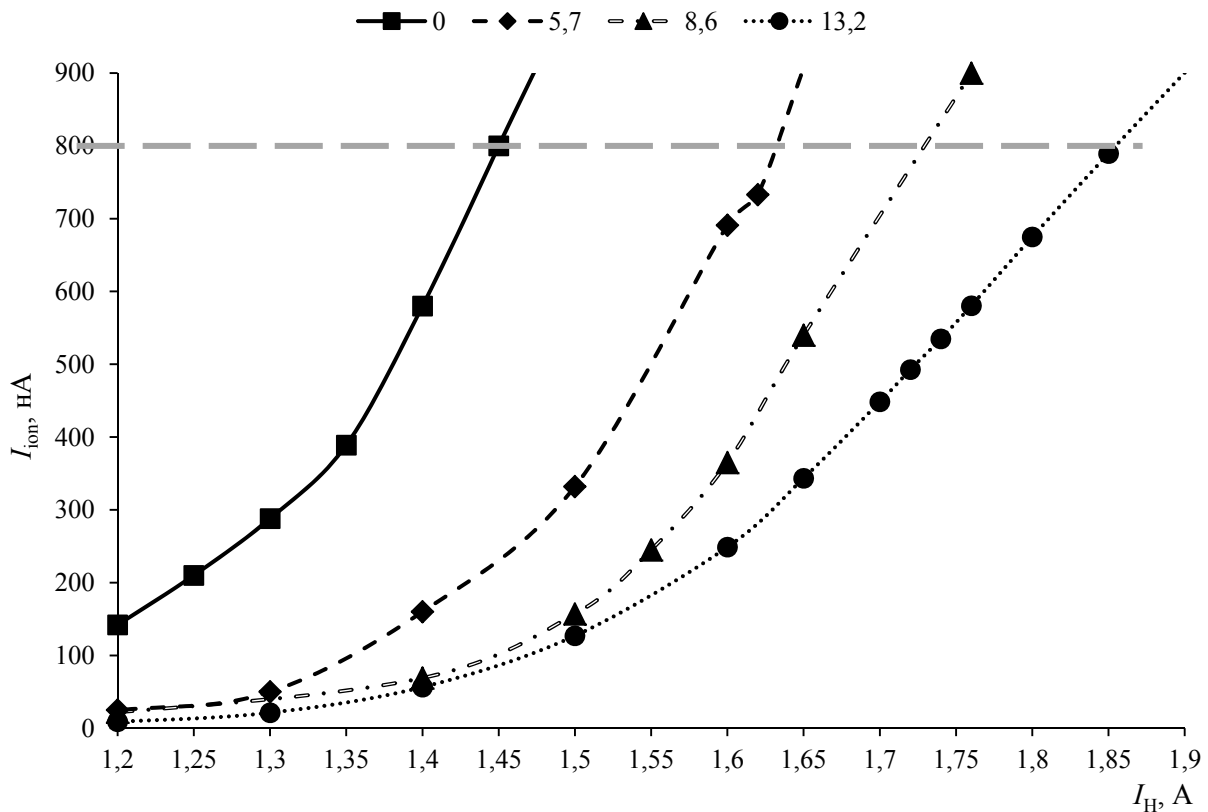


Рис. 5. Зависимость ионизационного тока I_{ion} камеры ПФ9 № 0162 (D-T) от тока нагрева I_H ГГ камеры сразу после насыщения ГГ (0) и через 5,7, 8,6 и 13,2 лет после насыщения ГГ, напряжение на электродах камеры 100 В.

Также стоит отметить, что поскольку ГГ насыщен D-T смесью, то при нагревании происходит выделение как трития, так и дейтерия. Через длительное время хранения значительная часть трития распадается, в то время как количество дейтерия остается неизменным. Сравнение эффективностей выделения дейтерия и трития является отдельным вопросом, требующим тщательного изучения. Поскольку насыщение ГГ смесью D-T (при изготовлении камеры) происходит в соотношении $p_D/p_T = 50/50\%$, можно считать, что концентрации атомов дейтерия n_D и трития n_T равны ($n_D = n_T$). С течением времени хранения из-за распада трития это соотношение будет меняться. Через 12 лет отношение выделившихся дейтерия и трития составит примерно $n_D/n_T = 75/25\%$. Этот факт должен приводить к снижению выхода нейтронов после длительного хранения D-T-камер. Выход нейтронов Y в рамках

пучково-мишенного механизма генерации пропорционален $(n - n_T) \times n_T \times \sigma_{DT}$, где σ_{DT} – сечение D-T-реакции, n – суммарная концентрация D-T-смеси. Функция выхода Y симметрична относительно концентрации трития n_T в смеси, максимум выхода достигается при $n_D = n_T = n/2$. Нетрудно оценить относительное изменение выхода нейтронов Y при различном относительном содержании трития в D-T-смеси (различное отношение n_D/n_T) (табл. 2). Из табл. 2 видно, что изменение выхода нейтронов Y с течением времени T_λ (с точностью до года) вследствие распада трития не является критичным. Фактически через 12 лет после распада половины трития в ГГ теоретически выход нейтронов должен составлять 0,75 от начального значения. В эксперименте же средний выход камеры ПФ9 № 162 через 13 лет после насыщения ГГ составил 0,63 от начального среднего значения.

Таблица 2

Относительное изменение выхода нейтронов Y при различном относительном содержании трития

N_T/N_D , %	50	45	40	30	25	15
T_λ , лет	0	2	4	9	12	21
Y , отн. ед.	1,0	0,99	0,96	0,84	0,75	0,50

Фактически показано, что для камеры ПФ с ГГ, насыщенным смесью D-T, ни накопление He^3 , ни уменьшение концентрации трития не являются критическими факторами для ограничения сохраняемости камер ПФ. На практике получается, что сохраняемость D-T-камер ограничивается предельно допустимыми значениями тока накала, который можно подавать на блок ГГ. Для используемого типа ГГ в камерах ПФ9 предельный ток составляет ~ 2 А. Превышение предельного тока приводит к сгоранию нити накала в ГГ и выходу ГГ из строя. Экспериментально показано, что через 12 лет для камеры ПФ9 значение тока накала достаточно близко к предельному (2 А). Поэтому можно сделать эмпирическое заключение, что фактический срок сохраняемости D-T-камер ПФ9 с ГГ составляет порядка 12 лет.

Заключение

Рассмотренные процессы, сопровождающие хранение камер ПФ, показали, что распад трития T^3 и накопление гелия He^3 в объеме отпаянных камер ПФ без ГГ приводят к резкому снижению выхода нейтронов через несколько лет после изготовления камер ПФ. Для увеличения сохраняемости камер используется ГГ на основе пористого титана. Рассмотрение особенностей работы камер ПФ с ГГ, насыщенными D- и D-T-смесью, экспериментально показало, что сохраняемость камер ПФ для генерации как 2,5 МэВ-ных нейтронов, так и 14 МэВ-ных нейтронов составляет не менее 12 лет. Для камеры ПФ, у которой ГГ насыщен D, средний выход нейтронов спустя 12 лет хранения

составил 50 % от номинального – $(0,8 \pm 0,2) \times 10^9$ нейтр./имп. Для камеры ПФ, у которой ГГ насыщен D-T-смесью, средний выход нейтронов спустя 13 лет хранения составил 63 % от номинального – $(0,8 \pm 0,1) \times 10^{11}$ нейтр./имп.

Состояние камер с D-T-насыщением ГГ в течение хранения может отслеживаться путем измерения зависимости ионизационного тока (вследствие β -распада трития) от тока накала ГГ. Для камеры ПФ через 13 лет хранения рабочее значение тока накала ГГ возросло с 1,48 А до 1,90 А. Фактически предельно допустимые значения тока накала ГГ (до перегорания нити накала) являются основным фактором, ограничивающим сохраняемость камер ПФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Макеев Н. Г., Румянцев В. Г., Черемухин Г. Н.* Физика и техника импульсных источников ионизирующих излучений для исследования быстропротекающих процессов. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1996.
2. *Roshan M. V., Darian M. M.* // Journal of Fusion Energy. 2003. Vol. 22. P. 79.
3. *Lemeshko B. D., Mikerov V. I., Yurkov D. I., Samosyuk V. N., P.P. Sidorov, Bogolubov Ye. P., Koltunov M. V.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2009. Vol. 605. № 1–2. P. 62.
4. *Springham S. V., Lee S., Moo S. P.* // Braz. J. Phys. 2002. Vol. 32. № 1. P. 172.
5. *Александров В. В., Грабовский Е. В., Грицук А. Н., Волобуев И. В., Казаков Е. Д., Калинин Ю. Г., Королев В. Д., Лаухин Я. И., Меодвицков С. Ф., Митрофанов К. Н., Олейник Г. М., Пименов В. Г., Смирнова Е. А., Устроев Г. И., Фролов И. Н.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 8. С. 673.

6. Klir D., Kravarik J., Kubes P., Rezac K., Anan'ev S. S., Bakshaev Yu. L., Blinov P. I., Chernenko A. S., Kazakov E. D., Korolev V. D., Meshcherov B. R., Ustroev G. I., Juha L., Krasa J., Velyhan A. // *Physics of Plasmas*. 2008. Vol. 15. № 032701. P. 1.
7. Елин И. П., Жидков Н. В., Суслов Н. А., Тацаев Г. В. // *Приборы и техника эксперимента*. 2020. № 2. С. 9.
8. Dulatov A. K., Lemeshko B. D., Mikhailov Yu. V., Prokuratov I. A., Selifanov A. N., Andreev D. A., Golikov A. V., Yurkov D. I. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. № 653. P. 1.
9. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Т. IX-3. Радиационная плазменная динамика. Янус К, 2007.
10. Scholz M. Plasma-focus and controlled nuclear fusion. – Krakow: Institute of Nuclear Physics PAN, 2014.
11. Bures B. L., Krishnan M., James C. // *IEEE transactions on plasma science*. 2012. Vol. 40. № 4. P. 1082.
12. https://www.uwyo.edu/safety/_files/docs/procedures/nuclearsafetydatasheets/3hpdf.pdf
13. Lemeshko B. D., Dulatov A. K., Mikhailov Yu. V., Prokuratov I. A., Selifanov A. N., Fatiev T. S., Andreev V. G. // *Matter and Radiation at Extremes*. 2017. Vol. 2. № 6. P. 301.
14. Лемешко Б. Д., Юрков Д. И., Дулатов А. К., Андреев Д. А. / Сборник докладов международной научно-технической конференции «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе» ВНИИА. 2013. С. 24–30.
15. Jousten K. Handbook of Vacuum Technology. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2008.
16. Родин А. М., Суреняц В. В. // *ЖФХ*. 1971. Т. 45. № 5. С. 1094.
17. Коган Я. Д., Колачев Б. А., Левинский Ю. В. Константы взаимодействия металлов с газами. – М.: Металлургия, 1987.

PACS: 52.58.Lq

Shelf life of plasma focus chambers with deuterium-tritium filling

D. I. Yurkov¹, V. A. Lavrenin², B. D. Lemeshko¹, Yu. V. Mikhailov¹, I. A. Prokuratov¹, and A. K. Dulatov¹

¹ Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics
22 Sushchevskaya st., Moscow, 127055, Russia
Moscow, 127055, Russia
E-mail: akdulatov@vniia.ru

² MO MD RF
22 Sushchevskaya st., Moscow, 127055, Russia

Received May 24, 2021

The paper presents the results of an experimental study of the shelf life of sealed plasma focus chambers with deuterium-tritium and deuterium fillings. Shelf life is defined as maintaining the level of neutron yield during operation of PF chambers as part of pulsed neutron generators after long storage intervals. The release of impurities from the inner surfaces of the PF chamber and the accumulation of helium He³ due to the decay of tritium in the volume of the sealed-off PF chambers leads to a significant decrease in the neutron radiation yield several years after the chamber is filled with the working mixture. The paper shows that the shelf life of the chambers is significantly increased when using a gas generator, in which hydrogen isotopes are contained in a bound state, and are released into the inner volume of the

chamber only for the duration of operation as part of neutron generators. It has been shown experimentally that spherical chambers of the PF9 type provide a level of neutron radiation yield Y , close to the initial value in the manufacture of chambers, after more than 10 years of storage.

Keywords: plasma focus chamber, plasma focus, pulse neutron emission, deuterium-tritium, tritium.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-4-347-358

REFERENCES

1. N. G. Makeev, V. G. Rumiantsev, and G. N. Che-remukhin *Physics and technology of pulsed sources of ionizing radiation for the study of fast processes*. (Sarov, VNIIEF, 1996) [in Russian].
2. M. V. Roshan and M. M. Darian, *Journal of Fusion Energy* **22**, 79 (2003).
3. B. D. Lemeshko, V. I. Mikerov, D. I. Yurkov, V. N. Samosyuk, P. P. Sidorov, Ye. P. Bogolubov, and M. V. Koltunov, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, No. 605 (1–2), 62–64 (2009).
4. S. V. Springham, S. Lee, and S. P. Moo, *Braz. J. Phys.* **32** (1), 172 (2002).
5. V. V. Aleksandrov, E. V. Grabovski, A. N. Gri-tsuk, Y. I. Laukhin, S. F. Medovshchikov, K. N. Mit-rofanov, G. M. Oleinik, I. N. Frolov, I. V. Volobuev, E. D. Kazakov, Y. G. Kalinin, V. D. Korolev, E. A. Smir-nova, G. I. Ustroev, and V. G. Pimenov, *Plasma physics Reports* **43** (8), 824 (2017).
6. D. Klir, J. Kravarik, P. Kubes, K. Rezac, S. S. Anan'ev, Yu. L. Bakshaev, P. I. Blinov, A. S. Cher-nenko, E. D. Kazakov, V. D. Korolev, B. R. Meshche-rov, G. I. Ustroev, L. Juha, J. Krasa, and A. Velyhan, *Physics of Plasmas*, **15** (032701), 1 (2008).
7. I. P. Yelin, N. V. Zhidkov, N. A. Suslov, and G. V. Tachaev, *Instruments and Experimental Tech-niques*, No. 2, 9 (2020).
8. A. K. Dulatov, B. D. Lemeshko, Yu. V. Mi-khailov, I. A. Prokuratov, A. N. Selifanov, D. A. An-dreev, A. V. Golikov, and D. I. Yurkov, *Journal of Physics: Conference Series*, No. 653, 1 (2015).
9. *Encyclopedia of Low Temperature Plasma. Ser. B. No. IX-3. Radiation Plasma Dynamics*. (M, Yanus-K, 2007) [in Russian].
10. M. Scholz, *Plasma-focus and controlled nuclear fusion*. (Krakow, Institute of Nuclear Physics PAN, 2014).
11. B. L. Bures, M. Krishnan, and C. James, *IEEE transactions on plasma science* **40** (4), 1082 (2012).
12. https://www.uwyo.edu/safety/_files/docs/procedures/nuclearsafetydatasheets/3hpdf.pdf
13. B. D. Lemeshko, A. K. Dulatov, Yu. V. Mi-khailov, I. A. Prokuratov, A. N. Selifanov, T. S. Fat-iev, and V. G. Andreev, *Matter and Radiation at Ex-tremes* **2** (6), 301 (2017).
14. B. D. Lemeshko, D. I. Yurkov, A. K. Dula-tov, and D. A. Andreev, in *Collection of reports of the international scientific and technical conference "Portable neutron generators and technologies based on them*, P. 24–30 (2013).
15. K. Jousten, *Handbook of Vacuum Technology*. (Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH&Co KGaA, 2008).
16. A. M. Rodin and V. V. Surenyants, *Physical Chemistry Journal* **45** (5), 1094 (1971) [in Russian].
17. I. D. Kogan, B. A. Kolachev, and Yu. V. Le-vinski, *Constants of interaction of metals with gases*. (Moscow, Metallurgiya, 1987) [in Russian].