

ГЕНЕРАТОР ГАЗА НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО ТИТАНА В СОСТАВЕ  
ОТПАЯННЫХ КАМЕР ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА© 2021 г. Д. И. Юрков<sup>а</sup>, В. А. Лавренин<sup>б</sup>, Б. Д. Лемешко<sup>а</sup>,  
Ю. В. Михайлов<sup>а</sup>, И. А. Прокуратов<sup>а</sup>, А. К. Дулатов<sup>а,\*</sup><sup>а</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова  
Россия, 127055, Москва, ул. Сущевская, 22*<sup>б</sup> *1425 Военное представительство Министерства обороны РФ, Россия, Москва**\*e-mail: akdulatov@vniia.ru*

Поступила в редакцию 01.06.2021 г.

После доработки 30.06.2021 г.

Принята к публикации 02.07.2021 г.

Рассмотрено использование поглотителя газа на основе пористого титана в качестве генератора газа в составе герметичного электровакуумного прибора – камеры плазменного фокуса. Последние используются в качестве импульсных источников нейтронов наносекундной длительности в составе нейтронных генераторов. Для генерации нейтронов внутренний объем камер заполняется дейтерием либо дейтерий-третиевой смесью. Рассмотрены физические основы использования генератора газа, обеспечивающего работу камер плазменного фокуса при наполнении дейтерием либо дейтерий-третиевой смесью в диапазоне давлений 1–30 Торр при объеме камер от 10 до 1000 см<sup>3</sup>. Генератор газа позволяет осуществлять до нескольких тысяч рабочих циклов выделения и поглощения газа в объеме камеры при времени выделения газа порядка нескольких минут. Безопасность использования герметичных камер плазменного фокуса с дейтерий-третиевым наполнением обеспечивается тем, что радиоактивный тритий находится в титане в связанном состоянии и выделяется в объеме камеры при нагревании насыщенного рабочим газом пористого титана лишь на время работы в генераторе нейтронов.

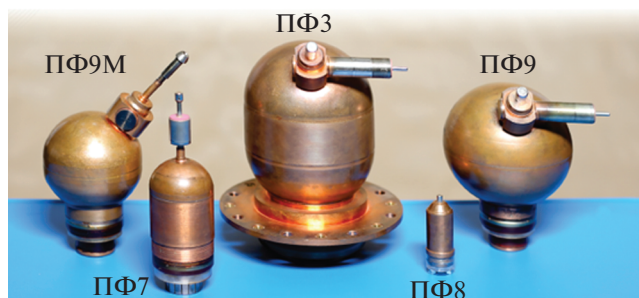
DOI: 10.31857/S0032816221060124

## ВВЕДЕНИЕ

Камеры плазменного фокуса (п.ф.) являются газонаполненными плазменными приборами, разработанными для генерации импульсного нейтронного и рентгеновского излучений с длительностью импульсов порядка нескольких десятков наносекунд. Камеры п.ф. используются в качестве нагрузки генераторов импульсных токов: при протекании через электроды камер разрядного тока в сотни килоампер внутри камер формируется с последующим сжатием на оси газовая токоплазменная оболочка. Сжатие оболочки приводит к формированию нецилиндрического Z-пинча [1] – импульсного источника ионизирующих излучений. На практике наиболее распространено применение камер п.ф. в составе генераторов нейтронного излучения [2], для чего внутренний объем камер заполняется дейтерием (D) или дейтерий-третиевой смесью (D-T) для генерации нейтронов с энергиями 2.5 и 14 МэВ соответственно.

Камеры п.ф. с наполнением дейтерием нашли широкое распространение в качестве лабораторных импульсных источников нейтронов с энерги-

ей 2.5 МэВ для исследования процессов термоядерного синтеза, материаловедения, радиографии, контроля работы регистраторов импульсного излучения и др. Преимуществом работы с дейтерием является его доступность и относительная простота эксплуатации. Для заполнения внутреннего объема камер п.ф. дейтерием в конструкции камер предусмотрен вакуумный вентиль, подключаемый к вакуумной системе для откачки объема и наполнения рабочим газом. Однако ядерная реакция  $D(d, n)^3\text{He}$  [3] обеспечивает относительно малый выход нейтронного излучения. Для получения больших выходов нейтронов используется реакция дейтерия с тритием, сопровождающаяся генерацией нейтронов с энергией 14 МэВ. Сеченные реакции  $D(t, n)^4\text{He}$  больше почти на два порядка по сравнению с сечением  $D + D$ , соответственно пропорционально увеличивается выход нейтронов. У опытных образцов импульсных нейтронных генераторов выход нейтронов с энергией 14 МэВ лежит в диапазоне  $10^{10} - 10^{12}$  нейтронов/импульс [4]. Причем генератор 14-мегаэлектронвольтных нейтронов с выходом  $10^{10}$  нейтронов/импульс на основе камеры п.ф. является компакт-



**Рис. 1.** Внешний вид камер п.ф.: ПФ7 ( $10^8$ – $10^{10}$  нейтронов/импульс), ПФ3 ( $10^{10}$ – $10^{12}$  нейтронов/импульс), ПФ9 ( $10^9$ – $10^{11}$  нейтронов/импульс) – отпаянной конструкции с г.г.; ПФ8 ( $10^5$ – $10^7$  нейтронов/импульс) – отпаянной конструкции без г.г.; ПФ9М ( $5 \cdot 10^8$ – $5 \cdot 10^{10}$  нейтронов/импульс) – с вакуумным вентилем.

ным, практически настольным, источником, в то время как аналогичный генератор с камерой п.ф., заполненной дейтерием, будет размером с небольшое испытательное помещение.

Основной проблемой при работе с D-T-смесью является радиоактивность трития [5], поскольку это приводит к повышенным требованиям по безопасности камеры п.ф. как радиоактивного источника. Вариант заполнения внутреннего объема камер через вакуумный вентиль является неприемлемым ввиду возможности утечек радиоактивного трития. Для работы с D-T-смесью рассмотрен вариант использования генератора газа (г.г.) на основе пористого титана или сплава в качестве поглотителя водорода, способного поглощать изотопы водорода и выделять их обратно при нагревании. Генератор газа необходимо герметично встраивать в конструкцию камеры п.ф. В этом случае в штатном режиме работы D-T-смесь будет находиться только во внутреннем объеме камеры.

Конструктивно камера п.ф. является соосной двухэлектродной разрядной системой, в которой, как правило, используются электроды из бескислородной меди, разделенные керамическим изолятором. При протекании тока через электроды камеры п.ф. рабочий газ во внутреннем объеме ионизируется в токоплазменной оболочке. Оболочка, в свою очередь, движется практически вдоль всей поверхности электродов, ионизируя газ с последующим сжатием его в плотный высокотемпературный пинч на оси камеры. Поскольку значение разрядного тока составляет сотни килоампер, то срабатывание камеры п.ф. сопровождается эрозией электродов и выделением примесей. Поэтому важным требованием к герметичной конструкции камер является отсутствие примесей во внутреннем объеме камеры.

В данной работе показаны возможность применения и особенность работы встроенного г.г. в составе различных камер п.ф., приведены практические примеры реализации камер п.ф. со встроенным г.г. Внешний вид герметичных камер п.ф. производства ВНИИА приведен на рис. 1.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРА ГАЗА

На основании специфики работы нейтронных генераторов с камерами п.ф. можно сформулировать основные требования, предъявляемые к г.г.:

- взаимодействие рабочего вещества г.г. с изотопами водорода для поглощения и выделения рабочего газа (использование сплава-накопителя водорода);

- реверсивность, т.е. возможность работы  $\geq 1000$  циклов без изменения поглощающей и выделяющей способности структуры;

- возможность задавать и поддерживать давление выделившегося газа в камере п.ф. в пределах 1–30 Торр;

- малое время (порядка нескольких минут) выделения и поглощения газа г.г. для обеспечения простоты, удобства и безопасности работы;

- помимо выделения газа, рабочий элемент г.г. должен выполнять функции поглотителя различных примесей типа  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CN$  и пр., т.е. выполнять роль геттера;

- компактность для возможности размещения г.г. в составе камеры п.ф.

Рассмотрим основные физические процессы, протекающие в металлических сплавах-накопителях изотопов водорода. В первом приближении взаимодействие водорода с материалом сплава-накопителя включает в себя следующие шесть последовательных стадий [6]: массоперенос водорода в газовой фазе, физическая адсорбция водорода на поверхности металла (она зависит в основном от температуры и давления газа), хемосорбция водорода на поверхности (происходит на активных центрах поверхности и завершается диссоциацией молекулы водорода на атомы), переход атомов водорода из поверхностного слоя в приповерхностный слой, диффузия атомов водорода в объем металла (интерметаллида) с образованием в нем твердого раствора атомарного водорода ( $\alpha$ -фаза) и упорядочиванием твердого раствора после его пересыщения водородом и переход в гидрид ( $\beta$ -фаза).

Поскольку камеры п.ф. для генерации нейтронов с энергией 14 МэВ заполняются радиоактивной D-T-смесью, то для безопасности необходимо минимизировать остаточную активность D-T-смеси в объеме камер п.ф. в нерабочем состоянии. Для этого сплав-накопитель изотопов водорода должен обеспечивать низкое равновесное давление

(на уровне  $10^{-2}$ – $10^{-4}$  Торр) в камере п.ф. при комнатной температуре, т.е. рабочий элемент г.г. должен поглощать практически всю D-T-смесь. К числу наиболее известных поглотителей изотопов водорода относятся пористый титан и сплавы: циаль (84% циркония + 16% алюминиевого сплава), тройная смесь “С” (30% циркония, 10% алюминиевого сплава, 60% титана), аналогичная тройная смесь “Э”. Сорбционные характеристики пористого титана, тройных смесей “С” и “Э” мало отличаются друг от друга, хотя следует отметить большую активность смесей по сравнению с пористым титаном в области температур 100–400°C. Температурные зависимости сорбции водорода и окиси углерода различными активными составами известны [7]. Лучшими сорбционными характеристиками обладает состав циаль, однако он имеет высокую температуру активировки (около 1000°C).

Наибольшее распространение получили газопоглотители на основе пористого титана благодаря их высокой активности по отношению к водороду, сравнительно невысокой температуре активировки (около 800°C), механической прочности и необратимости поглощения газов, за исключением водорода и его изотопов. Поглощение остаточных газов хорошо развитой поверхностью пористого титана начинается при 20°C, причем в диапазоне температур 20–300°C поглощение водорода значительно превышает поглощение других газов. Выше 300°C начинается обратное выделение водорода, а активное поглощение окиси и двуокиси углерода и азота происходит в области температур  $\geq 400^\circ\text{C}$ . Инертные газы титаном не поглощаются [7].

Обратимость поглощения водорода позволяет эффективно использовать пористый титан в качестве генератора водорода в различных приборах, например тиратронах [8]. Кроме того, титановые газопоглотители имеют различные варианты конструкции в зависимости от условий их применения в приборах. Для камер п.ф. в качестве г.г. использован газопоглотитель на основе мелкодисперсного титана. Рабочий элемент газопоглотителя представляет собой тонкостенный цилиндр диаметром  $\sim 3.5$  мм и массой 66 мг, выполненный из спрессованного мелкодисперсного порошка титана. Площадь активной поверхности составляет  $0.8$  см<sup>2</sup>, а уровень пористости – не менее 35%. Внутри цилиндра находится нить накала (нагреватель) из сплава Re (20%) и W (80%), температурный коэффициент сопротивления  $\alpha = 1.16 \cdot 10^{-3}$  1/градус. Диаметр проволоки нити накала газогенератора составляет несколько десятков микрометров, исходное сопротивление – 8–10 Ом. Нить покрыта слоем алунда. Газогенератор с внутренним подогревателем выполнен в едином корпусе (см. рис. 1).

Пористый титан, используемый для газопоглотителя, производят методом восстановления из двуокиси титана карбидом кальция при температуре 1280°C. При характерном размере дисперсности титана  $\sim 5$  мкм поглощающая поверхность титана составляет  $\sim 200$  см<sup>2</sup>, что примерно равно геометрической внутренней поверхности камеры п.ф. нейтронных генераторов средней мощности. Надо отметить, что при размере частиц восстановленного титана  $\sim 5$  мкм насыщается практически весь объем титана.

Перед насыщением генератора газа D-T-смесью проводят процедуру обезгаживания г.г. в несколько этапов с последовательным повышением температуры поглотителя. При этом температура титана достигает  $\sim 700^\circ\text{C}$ . Прогрев обеспечивается подачей на нить накала нагревателя г.г. напряжения. После обезгаживания проводится активировка, при которой температура титана достигает  $\sim 900^\circ\text{C}$ . Данные операции проводят в вакууме, и по времени они занимают не более одного часа. После активировки газопоглотитель приобретает способность поглощать газы, находящиеся в объеме камеры, и поддерживать в камере вакуум на уровне  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  Торр.

Необходимо отметить, что процесс поглощения водорода очень чувствителен не только к изменению температуры, но и к формированию поверхностных пленок. Водород растворяется в металле с диссоциацией на атомы без образования пленки гидрида. Пленка гидрида не образуется потому, что атомы водорода, вследствие своих малых размеров, тотчас же диффундируют в глубь кристаллической решетки. Было показано, что гидрид титана устойчив в вакууме до температуры 300°C, при более высокой температуре из титана может быть полностью удален водород в высоком вакууме.

Титан не поглощает инертные газы, но зато необратимо связывает тяжелые газы типа O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, углеводороды [7], что обеспечивает откачку из объема камеры примесей, выделяющихся из внутренней поверхности камеры и изолятора при хранении и работе камер п.ф. Это значительно увеличивает ресурс работы камер п.ф. Кроме того, поскольку газопоглотитель содержит радиоактивный тритий в связанном состоянии, то при хранении камер отсутствует бомбардировка внутренней поверхности камер электронами распада трития со средней энергией  $\sim 6$  кэВ, что значительно снижает газовыделение, а следовательно, положительно сказывается на сохранении характеристик камер п.ф. при их длительном хранении.

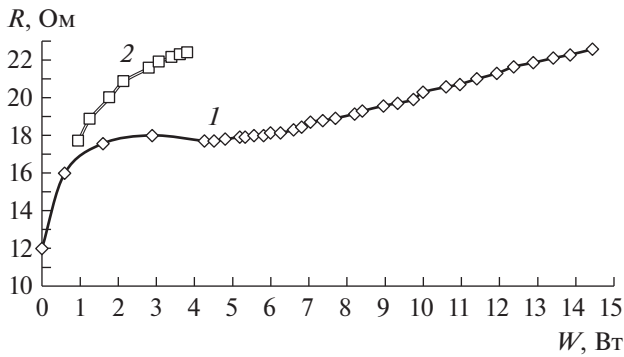


Рис. 2. Зависимости сопротивления нагревателя газо-поглотителя  $R_n$  от подводимой к нагревателю мощности  $W_n$  в составе камеры п.ф. (1) и в вакууме (2).

### РАБОТА ГЕНЕРАТОРА ГАЗА В КАМЕРАХ П.Ф. ОБЪЕМОМ $\sim 100 \text{ см}^3$

Для камеры ПФ7 (см. рис. 1) при газопоглотителе, насыщенном Д-Т-смесью активностью 10 Ки, были сняты вольт-амперные характеристики нагревателя г.г. Для сравнения такие же характеристики для той же камеры были сняты при ненасыщенном газопоглотителе в вакууме ( $2 \cdot 10^{-4}$  Торр). На рис. 2 приведены графики зависимостей сопротивления нагревателя  $R_n$  от мощности  $W_n$ , подводимой к нагревателю, для газопоглотителя в вакууме и газопоглотителя в составе камеры ПФ7. При одной и той же подводимой к нагревателю мощности  $W_n$  значения сопротивления нагревателя  $R_n$  при работе в составе камеры значительно ниже, чем в вакууме. Максимальная разница  $\Delta R_n$  достигает 4 Ом при подводимой мощности  $\approx 3.9$  Вт. При этом давление газа в камере п.ф. составляет порядка 10 Торр.

Сопротивление нагревателя  $R_n$  определяется его температурой  $T_n$ , которая зависит от подводимой к нагревателю мощности  $W_n$ , причем механизмы отвода тепла от нагревателя для ненасыщенного газопоглотителя (т.е. работа нагревателя в вакууме) и насыщенного (работа нагревателя в газовой среде) существенно различаются. При работе ненасыщенного газопоглотителя в вакууме температуру нагревателя можно определить из уравнения теплового баланса между подводимой  $W_n$  и отводимой  $W_1$  мощностью:

$$W_n = I_n U_n = I_n (I_n R(T_n)) = \sigma T_n^4 S_n = W_1, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана для абсолютного черного тела;  $S_n$  – площадь излучаемой поверхности нагревателя;  $T_n$  – температура нагревателя в вакууме.

Из уравнения (1) можно определить температуру нагревателя в вакууме:

$$T_n = [I_n^2 R(T_n) / (\sigma S_n)]^{0.25}. \quad (2)$$

Для камеры п.ф. при использовании насыщенного газопоглотителя уравнение баланса будет содержать дополнительный член  $W_2$ , учитывающий отдачу тепла нагревателем выделившемуся газу, и при достижении равновесия иметь вид  $W_n = W_1 + W_2$ :

$$I_n^2 R(T_{n,\text{газ}}) = \sigma T_{n,\text{газ}}^4 S_n + W_2(T_{n,\text{газ}}, p), \quad (3)$$

где  $T_{n,\text{газ}}$  – температура нити нагревателя после выделения газа;  $p$  – давление газа.

Тогда  $T_{n,\text{газ}}$  можно определить из (3) как

$$T_{n,\text{газ}} = \{[I_n^2 R(T_{n,\text{газ}}) - W_2(T_{n,\text{газ}}, p)] / (\sigma S_n)\}^{0.25}. \quad (4)$$

Очевидно, что при одной и той же подводимой мощности  $W_n$  температура нагревателя  $T_{n,\text{газ}}$ , а следовательно, и температура рабочего элемента в камере с насыщенным газопоглотителем, определяемая из уравнения (4), ниже температуры нагревателя  $T_n$  в вакууме (ненасыщенный газопоглотитель), определяемой из уравнения (2).

В общем случае температура нагревателя может быть вычислена на основе экспериментальных данных для камер п.ф., зная  $R_{\text{эксп}}$  и учитывая известную зависимость сопротивления от температуры:

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)], \quad (5)$$

где  $R$  – сопротивление нагревателя;  $T$  – температура нагревателя;  $R_0$  – сопротивление нагревателя при  $20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;  $T_0$  – температура  $20^\circ\text{C}$ .

Откуда

$$T_{\text{эксп}} = T_0 + \frac{R_{\text{эксп}} - R_0}{\alpha R_0}. \quad (6)$$

Ниже приведены значения вычисленной по формуле (6) температуры  $T_{\text{эксп}}$  нагревателя газопоглотителя, используемого в камерах п.ф., при разных экспериментальных значениях сопротивления нагревателя  $R_{\text{эксп}}$ :

$R_{\text{эксп}}$ , Ом	8.4	10	12	14	16	18	20	21	22
$T_{\text{эксп}}$ , $^\circ\text{C}$	20	184	389	595	800	1000	1210	1313	1416

Чтобы газопоглотитель работал в нормальном режиме в составе камеры п.ф., необходимо: во-первых, не превышать предельную температуру ( $900^\circ\text{C}$ ) для рабочего элемента из пористого титана (активация в вакууме при напряжении  $U_n = 8$  В, при этом сопротивление активации  $R_a = 22$  Ом), а во-вторых, при длительной работе не превышать температуру титана и нагревателя, которая задается номинальным режимом работы газопоглотителя –  $730\text{--}740^\circ\text{C}$ . Температура нити нагревателя в режиме активации составляет  $T_n = 1370^\circ\text{C}$ , в номинальном режиме –  $1250^\circ\text{C}$ .

Рассмотрим показательный график зависимости давления  $p$  газа в камере от сопротивления нагревателя  $R_{\text{экс}}$  (рис. 3). Согласно рис. 3, вплоть до давлений газа 40 Торр сопротивление  $R_{\text{экс}}$  остается меньше 21 Ом, что обусловлено интенсивным охлаждением нагревателя газом в камере. При рабочем давлении в камере п.ф. 10–20 Торр сопротивление нагревателя составляет 17.6–18 Ом, что на 3–3.4 Ом ниже сопротивления нагревателя в режиме активации. Температура титана вплоть до давлений 30–40 Торр не превышает  $720^\circ\text{C}$ , что меньше температуры титана в номинальном режиме работы, составляющей  $\sim 750^\circ\text{C}$ . Можно сделать вывод, что режим работы газопоглотителя в камере типа ПФ7 даже более мягкий, чем в номинальном режиме, т.е. является допустимым режимом работы.

Из вышесказанного следует, что именно температура нагревателя определяет как температуру титана и процесс выделения газа, так и сопротивление нагревателя.

#### РАБОТА ГЕНЕРАТОРА ГАЗА В КАМЕРАХ П.Ф. ОБЪЕМОМ ДО $1000\text{ см}^3$

Для нейтронных генераторов с выходом  $10^{11}$  и  $10^{12}$  нейтронов/импульс используются камеры типа ПФ9 и ПФ3 объемами  $700\text{--}1000\text{ см}^3$  (см. рис. 1), в которых также используются г.г. Однако для обеспечения требуемого давления D-T-смеси в этих камерах используются сборки из нескольких параллельно подключенных газопоглотителей, объединенных в одной конструкции г.г. В случае использования одного газопоглотителя (насыщенного до атомного отношения 0.5) предельное давление с учетом полного выделения газа в камере типа ПФ9 объемом  $700\text{ см}^3$  составит порядка 8.5 Торр. С учетом реального выделения газа на уровне 80% предельное давление в камере п.ф. составит 7 Торр. Такого давления недостаточно для нормальной работы камеры, поскольку характерный рабочий диапазон давлений составляет 12–20 Торр.

Увеличение количества титана в г.г. (для повышения давления газа в камере п.ф.) возможно либо путем увеличения массы одного рабочего элемента г.г., либо параллельным включением нескольких газопоглотителей. При поглощении одним из газопоглотителей большого количества газа (вследствие флуктуаций) коэффициент насыщения титана этого газопоглотителя увеличивается. Данному образцу газопоглотителя будет соответствовать кривая с большим равновесным давлением, что сопровождается выделением газа (его насыщение при этом уменьшается), который поглотят другие газопоглотители. При уменьшении насыщения одного из газопоглотителей относительно других возрастет интенсивность по-

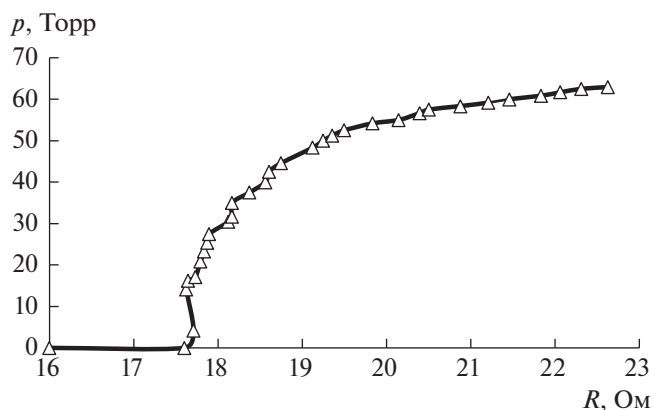


Рис. 3. Зависимость давления  $p$  D-T-смеси в камере п.ф. типа ПФ7 от сопротивления нагревателя  $R$ .

глощения им газа, что приведет к увеличению его коэффициента насыщения. Таким образом, можно сделать вывод, что в системе существует отрицательная обратная связь. Это позволяет утверждать, что система из нескольких газопоглотителей стремится к равновесному значению коэффициента насыщения.

В камере ПФ9 объемом  $700\text{ см}^3$  используются три газопоглотителя в одном корпусе с общей массой титана 198 мг. Для обеспечения работы камеры ПФ3 с внутренним объемом до  $1000\text{ см}^3$  используются пять газопоглотителей с общей массой титана 330 мг. Некоторый запас по массе титана позволит получать давления более 20 Торр или смягчить режим работы г.г., снизив температуру титана.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в статье физические основы работы г.г. на основе пористого титана показали возможность его использования в составе отпаянных камер плазменного фокуса при его насыщении D-T-смесью. Для камер п.ф. среднего объема использование одного газопоглотителя в составе г.г. позволяет обеспечить давление во внутреннем объеме камер на уровне 10–20 Торр. Показана связь температуры нагревателя с его сопротивлением, предельное значение сопротивления для используемого газопоглотителя в составе камер п.ф. составляет 22 Ом. Для обеспечения давления до 50 Торр в камерах п.ф. объемом до  $1000\text{ см}^3$  возможно использование нескольких (до пяти) параллельно включенных газопоглотителей в одном корпусе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Т. IX-3. Радиационная плазмодинамика / Под ред. В.А. Грибкова. М.: Янус-К, 2007.
2. *Dulatov A.K., Lemeshko B.D., Mikhailov Yu.V., Prokuratorov I.A., Selifanov A.N., Andreev D.A., Golikov A.V., Yurkov D.I.* // Journal of Physics: Conference Series. 2015. № 653. P. 1.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012019>
3. *Кирьянов Г.И.* Генераторы быстрых нейтронов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Нейтронные генераторы для научных исследований. ФГУП “ВНИИА им. Н.Л. Духова”. URL: <http://vniia.ru/production/neitronnie-generatory/nauchnie-issledovaniya/>
5. [https://www.uwyo.edu/safety/\\_files/docs/procedures/nuclearsafetydatasheets/3hpdf.pdf](https://www.uwyo.edu/safety/_files/docs/procedures/nuclearsafetydatasheets/3hpdf.pdf)
6. *Коган Я.Д.* Константы взаимодействия металлов с газами / Под ред. Я.Д. Когана, Б.А. Колачева, Ю.В. Левинского. М.: Металлургия, 1987.
7. Газопоглотители. Каталог. М.: ЦНИИ “Электроника”, 1975.
8. *Bochkov V.D., Bochkov D.V., Salynov I.A., Nikolaev V.N., Krestianinov A.S., Sokovnin S.Yu., Balezin M.E., Ponzovsky A.P.* // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2018. V. 15. № 7. P. 894.  
<https://doi.org/10.1134/S154747711807018X>