

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 533.9.082.7

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОК ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРОБНЫМИ ДЕЙТЕРИЕВЫМИ МИШЕНЯМИ НА РАЗБОРНОМ ВАКУУМНОМ СТЕНДЕ

© 2023 г. А. А. Исаев^а, *, К. И. Козловский^а, А. Е. Шиканов^а, О. В. Яковлев^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: isaev@lenta.ru

Поступила в редакцию 13.07.2022 г.

После доработки 13.07.2022 г.

Принята к публикации 18.07.2022 г.

Предложен метод восстановления нейтронного поля, создаваемого вакуумной ускорительной трубкой с метало-третиевой мишенью сложной конфигурации. Он использует данные нейтронных измерений на разборном вакуумном стенде с дейтериевой мишенью малого размера. Метод обеспечивает радиационную безопасность работ. Приводятся конкретные примеры его применения в процессе исследования ионных диодов, разрабатываемых в НИЯУ МИФИ.

Ключевые слова: ускорительная трубка, нейтронный выход, нейтронное поле, дейтериевая мишень, импульсный нейтронный генератор

DOI: 10.56304/S2079562922050189

ВВЕДЕНИЕ

В публикациях [1–5] представлены результаты последних работ проводимых в НИЯУ МИФИ по исследованию и созданию импульсного нейтронного генератора с лазерным источником дейтронов [6]. Они говорят о возможности создания эксплуатационных приборов такого типа, значительно превышающих по нейтронным характеристикам современные импульсные нейтронные генераторы за счет “магнитной изоляции” диодной системы ускорительной трубки [7], применения лазеров с энергией импульса излучения порядка Джоуля [1] и мощных генераторов импульсных напряжений (ГИН). В НИЯУ МИФИ разработаны ГИН [8], способные обеспечивать импульсную энергию потока дейтронов на мишень лазерного генератора нейтронов (ЛГН) на уровне свыше 10^2 Дж.

Прямое измерение нейтронных характеристик разрабатываемых ЛГН требует обеспечение условий радиационной безопасности. Это, при отсутствии помещений со средствами биологической защиты, создает серьезные трудности для исследователей. Поэтому для обеспечения необходимых требований радиационной безопасности генерацию нейтронов можно осуществлять на разборном вакуумном стенде, моделирующем ЛГН, в импульсном режиме с использованием пробных дейтериевых нейтронообразующих мишеней малого размера (площадь $\Delta S \sim 1 \text{ см}^2$) на реакции $D(d, n)^3\text{He}$, имеющей примерно на два порядка,

меньшее микросечение по сравнению с реакцией $T(d, n)^4\text{He}$. Это иллюстрируется кривыми на рис. 1, построенными по данным, представленными в монографии [9].

СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НЕЙТРОНОВ

Из известных средств измерений импульсных потоков быстрых нейтронов был выбран, как наиболее удобный, “всеволновый” метод Хансена и Мак-Киббена с предварительным замедлением нейтронов [10]. Для этого был изготовлен детектор, пригодный для использования в предполагаемых экспериментах с ЛГН. Он позволял фиксировать быстрые нейтроны, используя ядерную реакцию $^3\text{He}(n, p)\text{T}$, имеющую anomalously высокое сечение поглощения тепловых нейтронов. Процесс регистрации нейтронного потока с пробной мишени иллюстрируется на рис. 2.

Чувствительность системы детектирования составила 10^3 нейтронов попавших в объем, заполненный ^3He . Ее калибровка осуществлялась с помощью аттестованных ампульных полоний-бериллиевых источников, использующих ядерную реакцию $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$.

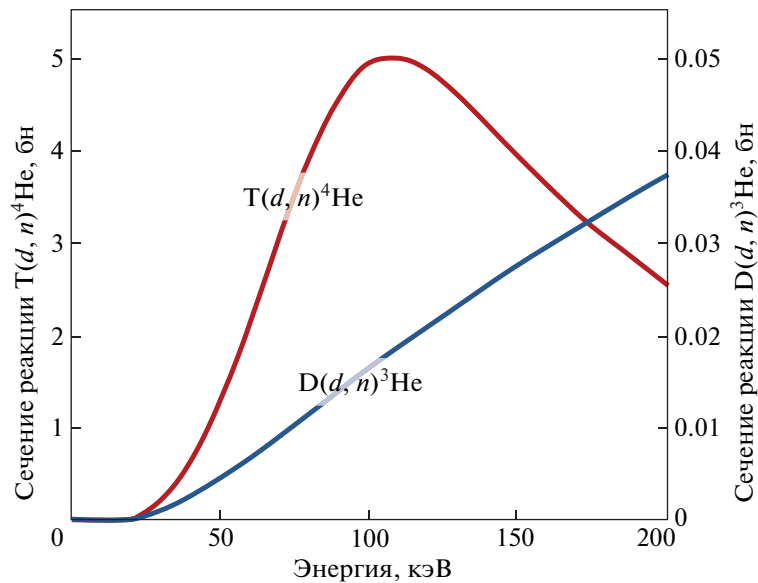


Рис. 1. Зависимость сечений реакций $T(d, n)^4\text{He}$ и $D(d, n)^3\text{He}$ от энергии дейтронов.

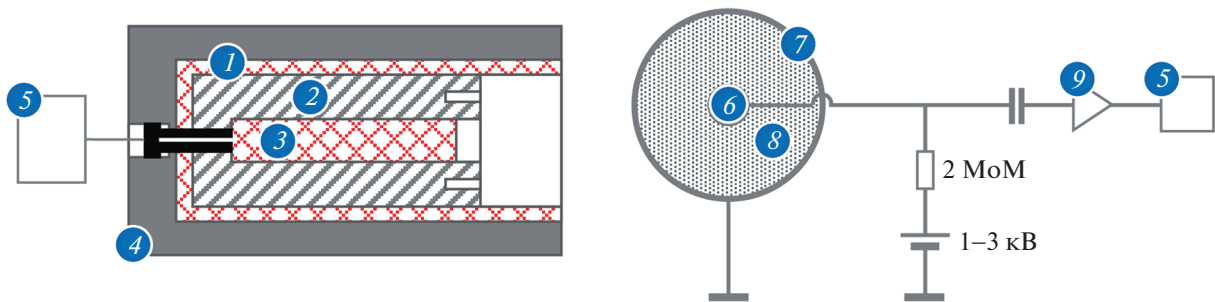


Рис. 2. Схематический разрез детектора нейтронов с предварительным замедлением и схема его включения, где 1 — поглотитель медленных нейтронов (B_4C), 2 — замедлитель из полиэтилена, 3 — счетчик тепловых нейтронов, 4 — парафиновый отражатель, 5 — осциллограф, 6 — анод, 7 — катод, 8 — газовая смесь, 9 — усилитель с входным сопротивлением.

ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ С ПРОБНОЙ МИШЕНЬЮ

Пробная мишень площадью $\Delta S \sim 10^{-4} \text{ м}^2$ из дейтерированного вещества располагалась на катоде действующего экспериментального макета ЛГН. В качестве примера на рис. 3 представлена одна из схем генерации нейтронов в ЛГН, описанная в работе [11], с контрагированием электронного потока, эмитируемого с катода, где рас-

полагалась мишень, магнитным полем спиральной линии.

Катод имел форму конуса с основанием радиуса $R = 0.035 \text{ м}$, высотой $H = 0.067 \text{ м}$ и углом наклона $\alpha = 2\text{arctg}(0.37)$.

В процессе эксперимента генерация нейтронов осуществлялась при расположении центра пробной мишени в пяти различных точках катодной поверхности, индексированных номером k , с радиус-вектором, определяемым выражением:

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{e}_r r_k + \mathbf{e}_z z_k,$$

где $\mathbf{e}_r$, $\mathbf{e}_z$ — орты цилиндрической системы координат,

$$r_k = R - H \text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{2k-1}{10}, \quad z_k = H \frac{2k-1}{10},$$

Таблица 1. Количество нейтронов, излучаемых пробной мишенью

k	1	2	3	4	5
$\Delta N(z_k), 10^5$	1.7	3.1	3.0	1.9	0.7

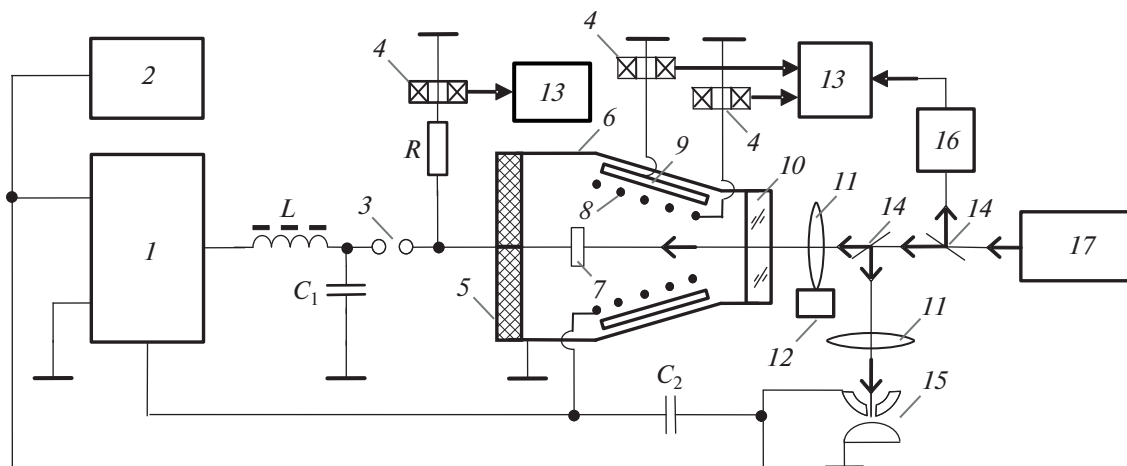


Рис. 3. Схема генерации нейтронов в ЛГН, где: 1 – ГИН; 2 – блок зарядки ГИН; 3 – разрядник-обостритель; 4 – пояса Роговского; 5 – изолятор; 6 – вакуумная камера; 7 – плазмообразующая мишень; 8 – спиральная линия; 9 – катодный электрод с расположенной на нем пробной нейтронообразующей мишенью; 10 – оптическое окно; 11 – фокусирующие линзы; 12 – сканирующее устройство; 13 – осциллограф; 14 – частично прозрачные зеркала; 15 – лазерный управляемый разрядник; 16 – коаксиальный фотозащитный элемент; 17 – лазер.

при этом ось z совпадает с осью симметрии электродной системы ЛГН.

Измеренное количество нейтронов, излучаемых пробной мишенью при k -м расположении $\Delta N(z_k)$ представлены в табл. 1.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙТРОНОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ КАТОДА

Полное число ускоренных дейтронов, бомбардировавших пробную мишень при ее k -м расположении, определяется из следующего соотношения:

$$\Delta N(z_k) \approx \Delta N_d(z_k) \int_0^{\tau} dt g(t) B_{(d,d)}(t),$$

где τ – длительность импульса ускоряющего напряжения, t – время, $g(t)$ – нормированная на единицу форма импульса тока в цепи катодного электрода, полученная по результатам временного анализа сигнала с пояса Роговского,

$$B_{(d,d)}(t) = N_A \frac{s_D \rho_{\Pi}}{A_{\Pi} + s_D} \int_0^{eU(t)} dT_d \frac{\sigma_{(d,d)}(T_d)}{F_{\Pi}(T_d)},$$

– зависимость нейтронного выхода ядерной реакции $D(d, n)^3\text{He}$ [10] от времени, применительно к рассматриваемому макету ЛГН, N_A – число Авогадро, ρ_{Π} – плотность пробной мишени, A_{Π} – атомная масса вещества, составляющего мишень и удерживающего в ней дейтерий, s_D – среднее число атомов дейтерия, приходящихся в пробной мишени на один атом сопутствующего вещества (коэффициент стехиометрии пробной мишени), $U(t)$ – зависимость ускоряющего напряжения от времени, $\sigma_{dd}(T_d)$, $F_n(T_d)$ – зависимости микросечения реак-

ции $D(d, n)^3\text{He}$ и потерь энергии дейтроном в пробной мишени на единицу длины от энергии.

Формула (1) позволяет установить плотность распределения дейтронов по всей бомбардируемой ими поверхности катода в виде ступенчатой зависимости:

$$q_d(z_k) = \Delta N(z_k) \left[\Delta S \int_0^{\tau} dt g(t) B_{(d,d)}(t) \right]^{-1}.$$

Была проведена ее сплайновая интерполяция на базе данных проведенных нейтронных измерений. В результате была получена непрерывная

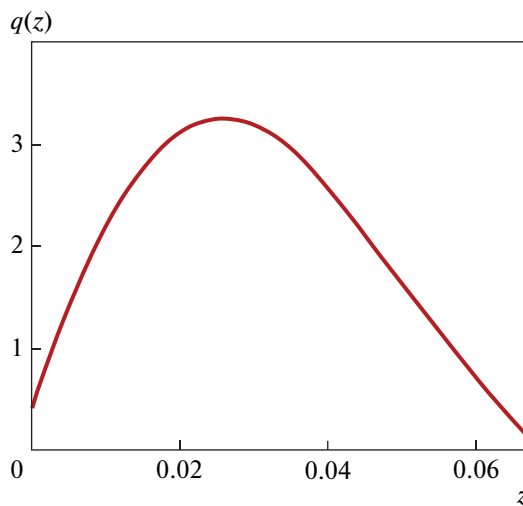


Рис. 4. Распределение дейтронного потока по поверхности катода (произв. ед.).

функция распределения дейтронного потока по поверхности катода, представленная на рис. 4.

АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА РЕАЛЬНОЙ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТРУБКИ

Для прогнозирования нейтронного потока в полный телесный угол реального эксплуатационного ЛГН, рассмотрим соответствующую зависимость нейтронного выхода ядерной реакции $T(d, n)^4\text{He}$ [10] от времени:

$$B_{(d,t)}(t) = N_A \frac{s_T \rho_T}{A_T + s_T} \int_0^{eU(t)} dT_T \frac{\sigma_{(d,t)}(T_d)}{F_T(T_d)},$$

где ρ_T — плотность реальной тритиевой мишени, A_T — атомная масса вещества удерживающего в ней тритий, s_T — коэффициент стехиометрии тритиевой мишени, $\sigma_{(d,t)}(T_d)$, $F_T(T_d)$ — зависимости микросечения реакции $T(d, n)^4\text{He}$ и потерь энергии дейтроном в тритиевой мишени на единицу длины от энергии.

Используя эту зависимость, получаем выражение, задающее алгоритм прогнозирования нейтронного потока, на случай реального эксплуатационного ЛГН с тритиевой мишенью, нанесенной на всю внутреннюю поверхность катодного электрода и работающего в импульсно-периодическом режиме с частотой генерации нейтронных вспышек f :

$$\Phi \approx f \frac{2\pi}{\sin\alpha} \int_0^L dz q(z) (R - z \operatorname{tg}\alpha) \int_0^{\tau} dt g(t) B_{(d,t)}(t).$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная формула позволяет сделать прогноз нейтронного потока для рассмотренного в работе [11] проекта ускорительной трубки с импульсной магнитной изоляцией, предполагаемого к возможной разработке. Согласно этому прогнозу указан-

ное изделие после его технологического освоения позволит осуществлять генерацию потока нейтронов в полный телесный угол на уровне $2 \cdot 10^{11}$ н/с при частоте срабатываний ЛГН $f = 10$ Гц.

По данной методике осуществлялась также успешная интерпретация результатов экспериментов, проводимых в НИЯУ МИФИ с ионными диодами другой конфигурации [1–4, 7], которые также могут быть реализованы в эксплуатационных ЛГН [1].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ и гранта РФФ № 22-29-00508.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Ананьин О.Б. и др.* // Атомная энергия. 2013. Т. 115 (2). С. 115.
2. *Didenko A.N. et al.* // Plasma Phys. Rep. 2014. V. 40 (11). P. 910.
3. *Шиканов А.Е., Вовченко Е.Д., Козловский К.И.* // Атомная энергия. 2015. Т. 119 (4). С. 210.
4. *Shikanov A.E. et al.* // Tech. Phys. Lett. 2015. V. 41 (5). P. 511.
5. *Shikanov A.E.* // Plasma Phys. Rep. 2021. V. 47 (4). P. 377.
6. *Беспалов Д.Ф. и др.* Импульсный генератор нейтронов. Авторское свидетельство № 457406. 1980.
7. *Айнурова Н.К. и др.* Импульсная нейтронная трубка. Авторское свидетельство № 1632249. 1996.
8. *Vovchenko E.D. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2017. V. 60 (3). P. 362.
9. *Власов Н.А.* Нейтроны: научное издание. 1971. Москва: Наука.
10. *Кертис Л.* Введение в нейтронную физику. 1965. Москва: Атомиздат.
11. *Плешакова Р.П. и др.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2020. Т. 11 (2). С. 77 [*Pleshakova R.P. et al.* // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83. P. 1467].

Prediction of the Neutron Yield in Accelerator Tubes from the Data of Measurements with Test Deuterium Targets on Disassembling Vacuum Bench

A. A. Isaev¹, *, K. I. Kozlovskij¹, A. E. Shikanov¹, and O. V. Yakovlev¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: isaev@lenta.ru

Received July 13, 2022; revised July 13, 2022; accepted July 18, 2022

Abstract—A method is proposed for restoring the neutron field created by a vacuum accelerating tube with a metal-tritium target of complex configuration. The method uses data from neutron measurements on a disassembling vacuum bench with a small deuterium target. The method ensures radiation safety of work. Specific examples of its application in the process of studying ion diodes developed at the National Research Nuclear University MEPhI are given.

Keywords: accelerator tube, neutron output, neutron field, deuterium target, pulsed neutron generator