

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 621.382.6(06)

ОЦЕНКА ТЕРМОУСТОЙЧИВОСТИ МИШЕНЕЙ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

© 2023 г. Е. Д. Вовченко^а, К. И. Козловский^а,
Р. П. Плешакова^{а, *}, А. Е. Шиканов^а, О. В. Яковлев^а

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

*E-mail: pl.regina@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.07.2022 г.

После доработки 01.08.2022 г.

Принята к публикации 10.08.2022 г.

Рассмотрены вопросы деградации мишеней генераторов нейтронов, содержащих изотопы водорода в окклюдированном состоянии при их импульсно- периодическом нагреве ускоренными дейтронами. Проанализирован возможный характер деградации мишени во времени в процессе работы нейтронного генератора.

Ключевые слова: Нейтронный генератор, мишень, коэффициент стехиометрии, теплоемкость, десорбция трития, температура, ток ионов

DOI: 10.56304/S2079562922050530

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–3] представлены результаты исследований, проводимых в НИЯУ “МИФИ” по импульсным нейтронным генераторам (ИНГ) с лазерным источником дейтронов. Они говорят о возможности создания эксплуатационных приборов значительно превышающих по нейтронному выходу современные ИНГ за счет “магнитной изоляции” диодной системы ускорительной трубки (УТ), применения лазеров с энергией импульса излучения ~1 Дж [1] и мощных генераторов импульсных напряжений (ГИН), обеспечивающих импульсную энергию потока дейтронов на мишень такого генератора нейтронов на уровне, превышающем 10^2 Дж. Мишень нейтронного генератора представляла собой насыщенную тритием тонкую металлическую пленку из металла растворяющего водород (Ti, Er), нанесенную на более толстую металлическую подложку.

Указанные мероприятия по повышению нейтронного выхода могут приводить к деградации мишени в результате термодесорбции трития при ее нагреве ускоренным дейтронным потоком.

МОДЕЛЬ НАГРЕВА МИШЕНИ

Компьютерный анализ нагрева мишени ИНГ проводился с использованием математической модели, базирующейся на приближенном дифференциальном уравнении термодинамического баланса:

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{fW}{C} - \lambda \frac{S_1}{C} (T - T_0) - \sigma \frac{S_2}{C} (T^4 - T_0^4),$$

где T и T_0 – температуры мишени и окружающей среды, t – время, f – рабочая частота ГИН, C – теплоемкость подложки мишени, λ – коэффициент теплосъема с единицы площади торца подложки, S_1 и S_2 – площади торца подложки и боковой поверхности мишени, σ – константа Стефана–Больцмана, W – импульсная энергия потока ускоренных ионов на мишень ИНГ. Величина W определяется из формулы

$$W = \int_0^{\tau} dt U(t) I(t),$$

где $U(t)$ – напряжение на диодном зазоре, $I(t)$ – ток ускоренных ионов, τ – длительность импульса ионного тока.

Данная модель нагрева предполагает, что отбор тепла с подложки осуществляется за счет теплопроводности через область, граничащую с мишенью, а также путем теплового излучения с поверхности мишени.

В численном эксперименте исследовался нагрев мишени ИНГ, нанесенной на медную подложку. Геометрия диодной системы ИНГ соответствовала работам [1–3]. В расчетах импульсная энергия потока ускоренных ионов задавалась на уровне $W = 100$ Дж, определяемом параметрами ГИН, который в настоящее время разработан и реализован в НИЯУ МИФИ. Коэффициент

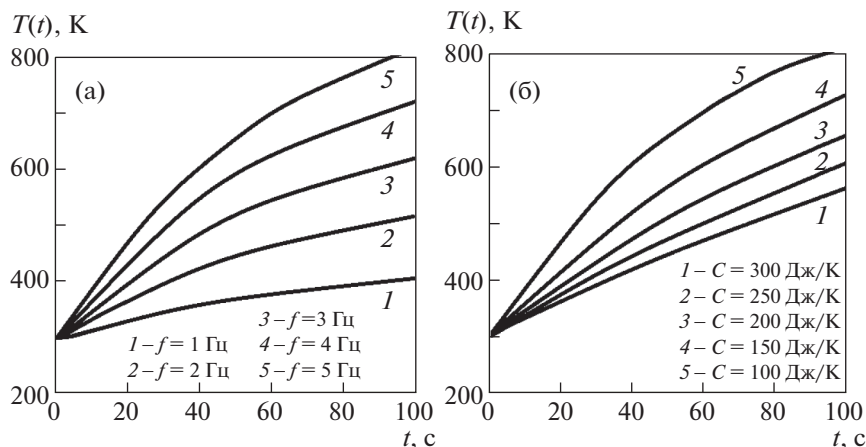


Рис. 1. Расчетные зависимости температуры от времени для мишени с медной подложкой при энергии $W = 100$ Дж. (а) Влияние частоты f при постоянной теплоемкости $C = 150$ Дж/К. (б) Влияние теплоемкости C при постоянной частоте $f = 4$ Гц.

теплосъема с единицы площади торца подложки в расчетах фиксировался на уровне $\lambda \approx 10^4$ Вт/м². Результаты этих расчетов для предполагаемой работы ИНГ в импульсно-периодическом режиме с частотой $f = 1, 2, 3, 4, 5$ Гц и варьировании теплоемкости подложки ($C = 100\text{--}300$ Дж/К) представлены на рис. 1.

Как видно из первого графика (рис. 1а), при частоте $f > 5$ Гц температура мишени после 100 с работы ИНГ в рассматриваемом случае достигает предельной величины, равной ≈ 750 К, в результате чего начинается эффективно десорбировать тритий из титановых мишеней [4]. Для эрбиевых мишеней в этом случае после 100 с работы ИНГ десорбция начинается при больших тепловых нагрузках и соответствует условию $f > 8$ Гц.

ДЕСОРБЦИЯ ТРИТИЯ

Поток трития из мишени в рабочий объем ИНГ можно оценить, по следующей формуле, получаемой после соответствующего усреднения по распределению Больцмана:

$$Q_T(T) = n_T S_2 \sqrt{\frac{kT}{2\pi M_T}} \times \left[\Pi(T_{кр} - T) \exp\left(-\frac{w}{kT}\right) + \Pi(T - T_{кр}) \right],$$

где M_T — масса тритона, k — постоянная Больцмана, $T_{кр}$ — критическая температура перехода тритона в мишени из состояния окклюзии в свободное состояние, $\Pi(x)$ — функция Хевисайда, n_T — концентрация трития в мишени, $w \approx 10kT_{кр}$ — эффективная энергия связи трития в металле-носителе, учитывающая взаимодействие с решеткой и тонким барьерным слоем окисла на поверхности мишени, оцениваемая приближенно из закона соответствен-

ных состояний в теории фазовых переходов [5]. Концентрация трития определяется формулой

$$n_T \approx N_A s_T \frac{\rho_{Zr}}{M},$$

где N_A — число Авогадро, s_T — коэффициент стехиометрии мишени по тритию, ρ , M — плотность и молярная масса металла-носителя мишени соответственно.

В монографии [4] отмечается, что, при использовании в качестве металла-носителя мишени эрбия, критическая температура может быть увеличена примерно до 850 К. Такие мишени оказываются более устойчивыми, с точки зрения удержания трития, однако из экономических и технологических соображений практически не используются в нейтронных генераторах.

На рис. 2 приведены расчетные временные зависимости потока тритонов $Q_T[T(t)]$ с поверхности мишеней двух типов в рабочий объем ИНГ.

ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СТЕХИОМЕТРИИ

Следуя этой зависимости, можно оценить изменение во времени коэффициента стехиометрии мишени посредством следующего приближенного дифференциального уравнения:

$$\frac{ds_T}{dt} \approx -\frac{s_T}{\delta} \sqrt{\frac{kT(t)}{2\pi M_T}}$$

с начальным условием $s_T(t_0) = 1.5$, где t_0 является решением уравнения $T(t_0) = T_{кр}$; $\delta \approx 10$ мкм — толщина напыленного слоя металла-носителя мишени. Из этих оценок следует, что после достижения критической температуры мишень очень

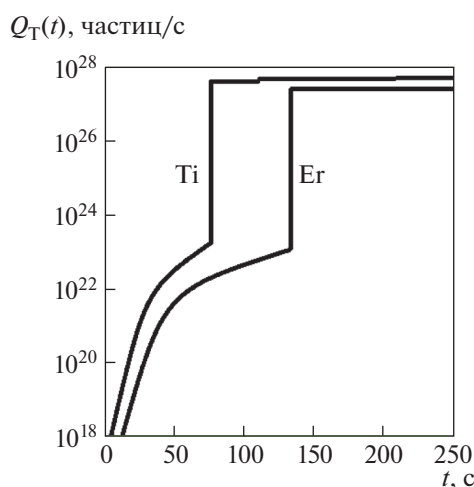


Рис. 2. Временная зависимость потока тритонов $Q_T(t)$ с поверхности титано– тритиевой и эрбий– тритиевой мишеней с коэффициентом стехиометрии $s_T = 1.5$ в вакуумный рабочий объем ИГН.

быстро обезгаживается, а нейтронный выход должен спадать до нуля, в соответствии с формулой

$$B(t) \approx A \{n_T(0) S_1 \delta - \int_0^t Q_T[T(t)] dt\},$$

где A – константа пропорциональности, определяемая током ускоренных к мишени ИГН дейтронов и ускоряющим напряжением [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для минимизации рассмотренного явления деградации мишени ИГН согласно сделанным расчетам следует увеличивать теплоемкость подложки за счет ее массы и удельной теплоемкости, теплопроводность и площадь торца, а также поверхность мишени. Кроме того, необходимо обеспечить эффективную систему охлаждения подложки со стороны ее торца.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана программой "Приоритет-2023" Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Anan'in O.B. et al. // At. Energy. 2013. V. 115 (2). P. 137.
2. Shikanov A.E., Vovchenko E.D., Kozlovskiy K.I. // At. Energy, 2016. V. 119 (4). P. 258.
3. Shikanov A.E. // Plasma Phys. Rep. 2021. V. 47 (4). P. 350.
4. Ключников А.А. и др. Принципы построения и применения металлотритиевых структур. 1992. Киев: Наукова думка.
5. Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. 1965. Москва: Наука.
6. Богданович Б.Ю., Шиканов А.Е. // ПТЭ. 2014. № 1. С. 22–26.

Evaluation of Thermal Stability of Targets of Pulsed Neutron Generators

E. D. Vovchenko¹, K. I. Kozlovskiy¹, R. P. Pleshakova¹ *, A. E. Shikanov¹, And O. V. Yakovlev¹

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

*e-mail: pl.regina@yandex.ru

Received July 22, 2022; revised August 1, 2022; accepted August 10, 2022

Abstract—The issues of degradation of neutron generator targets containing hydrogen isotopes in the occluded state during their pulsed-periodic heating by accelerated deuterons are considered. The possible nature of degradation of the target in time during the operation of the neutron generator is analyzed.

Keywords: neutron generator, target, stoichiometry coefficient, heat capacity, tritium desorption, temperature, ion current