

Тепловой режим мишени интенсивного нейтронного генератора

Ю.М. Адо, А.Г. Уфимцев

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино Россия

Возможность создания источника интенсивных нейтронных потоков на основе циклического накопителя дейтронов с внутренней нейтронообразующей мишенью [1 ÷ 4] во многом определяется возможностями этой мишени выдерживать значительные тепловые, механические и радиационные нагрузки под действием пучка высокоэнергетичных заряженных частиц. В частности, взаимодействие накопленного дейтронного пучка с расположенной на магнитной дорожке накопителя нейтронообразующей мишенью сопровождается тепловыделением, величина которого пропорциональна току накопленных частиц и плотности мишени $\sim I_0 \cdot \rho$. Это же произведение определяет и выход нейтронов. Поэтому увеличение интенсивности нейтронного потока ограничивается возможностями отвода тепла с мишени.

Характерные значения тепловых мощностей, выделяемых в нейтронообразующей мишени, составляют ≥ 1 МВт. Так, например, для описанного в [3] нейтронного генератора с выходом нейтронов $N = 8 \cdot 10^{17}$ нейтрон/с (при энергии дейтронов 100 МэВ, токе инжекции 100 мА и накопленном токе дейтронов 14 А) в бериллиевой мишени толщиной 0.8 мм будет выделяться тепловая мощность 22 МВт. При таких тепловыделениях мишенное вещество (независимо от своего исходного агрегатного состояния) испарится даже при однократном прохождении пучка, если не принимать специальных мер по охлаждению мишени.

При использовании бериллия в качестве мишенного вещества бериллиевая фольга может быть расположена на ободке диска, вращающегося с частотой

$$f = \frac{v}{2\pi R}, \quad (1)$$

где v — скорость прохождения через пучок данного участка мишени; R — радиус диска. Скорость v определяется допустимым временем нахождения данного участка мишени (т.е. “пятна” с диаметром d) под пучком: $v = d/t$. В свою очередь, время t определяется допустимым повышением температуры фольги на величину ΔT и мощностью P отвода выделившегося тепла за время одного оборота диска:

$$t = \frac{\Delta E_{менл}}{P} = \frac{cm \Delta T}{P}, \quad (2)$$

где $c = 3 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{с} / (\text{кг} \cdot \text{C}^0)$ — удельная теплоемкость бериллия [5]; m — масса облучаемого участка фольги толщиной δ . Таким образом, частота вращения диска (колеса), на котором закреплена фольга, равна

$$f = \frac{2P}{\pi^2 R d \delta \rho c \Delta T}. \quad (3)$$

Так, например, для отвода тепловой мощности $P = 10$ МВт при толщине мишени $\delta = 0.3$ мм, допустимом нагреве $\Delta T = 600^0$, радиусе диска $R = 2$ м и диаметре пучка на мишени $d = 5$ см необходимая частота вращения диска составит $f \approx 16$ оборот/сек.

При оценке частоты вращения диска мы не конкретизировали механизм (способ), которым обеспечивается отвод тепловой мощности P . Один из способов отвода тепла может быть реализован с помощью хладагента (например, воды), вводимого в полость мишенного диска (см. рис. 1а). Подводимая вода снимает при этом тепло с боковой поверхности диска, превращаясь в пар в полости диска. Образовавшийся водяной пар может быть отведен через расширенную приосевую область диска.

Мощность теплового потока, отводимого от нагретого участка мишени через торцевую поверхность фольги к боковой поверхности диска и далее, к воде, равна

$$P = \lambda \frac{s}{l} (T_0 - T_1), \quad (4)$$

где $\lambda = 80 \text{ Bm}/(C^0 \cdot \text{м})$ — коэффициент теплопроводности бериллия [5]; $s = 2\pi R\delta$ — площадь торцевой поверхности фольги; l — расстояние от нагретого участка до “холодильника” (для оценок можно положить $l = d/2$); T_0 — температура участка фольги, проходимого пучком; T_1 — температура этого же участка после охлаждения (и завершения оборота диска). Тепловой поток указанной мощности за время $t_{ox.a}$ должен снимать выделившуюся в мишени тепловую энергию $\Delta E_{мен.а}$, исходя из этого можно оценить время охлаждения $t_{ox.a}$:

$$t_{ox.a} \approx m \frac{c}{\lambda} \frac{1}{s} = \rho \frac{c}{\lambda} \frac{d^3}{8R}. \quad (5)$$

При указанных выше значениях время охлаждения описанным выше способом ($\sim 10^{-2}$ с) оказывается значительно меньше, чем период вращения мишенного диска ($\sim 10^{-1}$ с), что и подтверждает принципиальную осуществимость водяного охлаждения бериллиевой фольги.

Расход воды оценим следующим образом. Теплота парообразования в единицу времени (мощность парообразования) равна $P_{нар} = r \rho V/t$, где $r = 2.25 \cdot 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{с}/\text{кг}$ — удельная теплота парообразования воды. Указанная мощность $P_{нар}$ соответствует тепловой мощности P , выделяемой в мишени; отсюда расход воды $PВ$ на охлаждение фольги будет равен:

$$PВ = \frac{P}{r \cdot \rho}. \quad (6)$$

Для отвода рассматриваемых мощностей расход воды $PВ$ составит несколько литров в секунду.

Охлаждение бериллиевой фольги можно также осуществлять контактным способом. Возможный вариант мишени с контактным способом теплосъема схематически изображен на рис. 1б. Щетки (например, алюминиевые, покрытые графитом для облегчения скольжения) плотно прижимаются к бериллиевой фольге по всему периметру диска, за исключением небольшого участка вблизи места прохождения пучка дейтронов. Для оценки времени охлаждения воспользуемся изложенными выше соображениями, тогда

$$t_{ox.a} \approx m \frac{c}{\lambda} \frac{\sigma}{2S} = \rho \frac{c}{\lambda} \frac{\sigma^2 d}{8R}, \quad (7)$$

где $S \approx 2\pi R d$ — полная площадь контактирующих поверхностей. При $\sigma = 0.3 \text{ мм}$, $d = 5 \text{ см}$ получаем $t_{ox.a} \approx 10^{-5}$ с.

Наконец, возможным способом охлаждения нейтронообразующей мишени может оказаться охлаждение фольги за счет излучения.

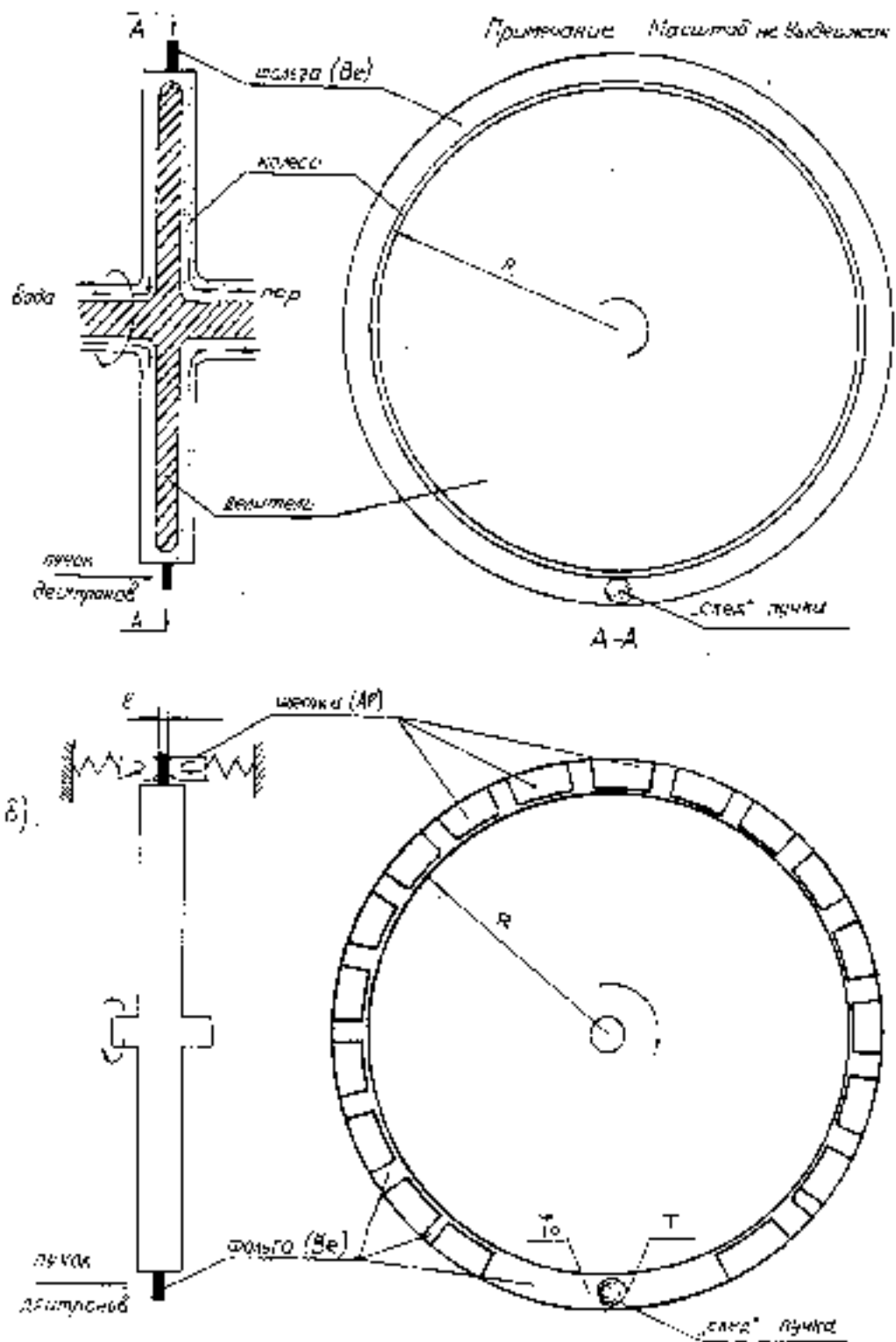


Рис. 1:

Список литературы

- [1] Ю.М.Адо, В.В.Артисюк, С.Л.Дорохович и др. — Основные параметры установки с кольцевым накопителем дейтронов на энергию до 100 МэВ”. В сб.: Расчетные и экспериментальные исследования ядерных и энергетических установок. — Обнинск, ИАТЭ, 1990.
- [2] Ю.М.Адо, Ю.А.Коровин, А.Г.Уфимцев. — Электроядерная установка на основе накопителя дейтронов. Труды 12-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, с. 147-153. — Москва, 1990; препринт ИФВЭ 92-145, Протвино, 1992.
- [3] Ю.М.Адо, А.Г.Уфимцев, В.В.Артисюк и др. Высокоэффективная генерация нейтронов в дейтронном накопителе для трансмутации радионуклидов. Атомная энергия, 1992, т. 73, вып. 4, с. 289-293.
- [4] А.Г.Уфимцев. Накопитель дейтронов для источника нейтронных потоков. (Доклад на данном совещании.)
- [5] Д.Дарвин, Д.Баддери. — Бериллий. М.: 1962.