

# Невыгорающие радиаторы камер деления

А. Б. ДМИТРИЕВ, А. С. ГРЕРОВ, Е. К. МАЛЫШЕВ

УДК 621.039.564

Для контроля и регулирования ядерных реакторов необходимы ионизационные камеры, которые могут длительное время работать в больших потоках тепло-

вых нейтронов ( $\Phi \approx 10^{13}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек) без изменения чувствительности. Применение обычных (В<sup>10</sup> и U<sup>235</sup>) радиаторов в таких камерах нецелесообразно из-за

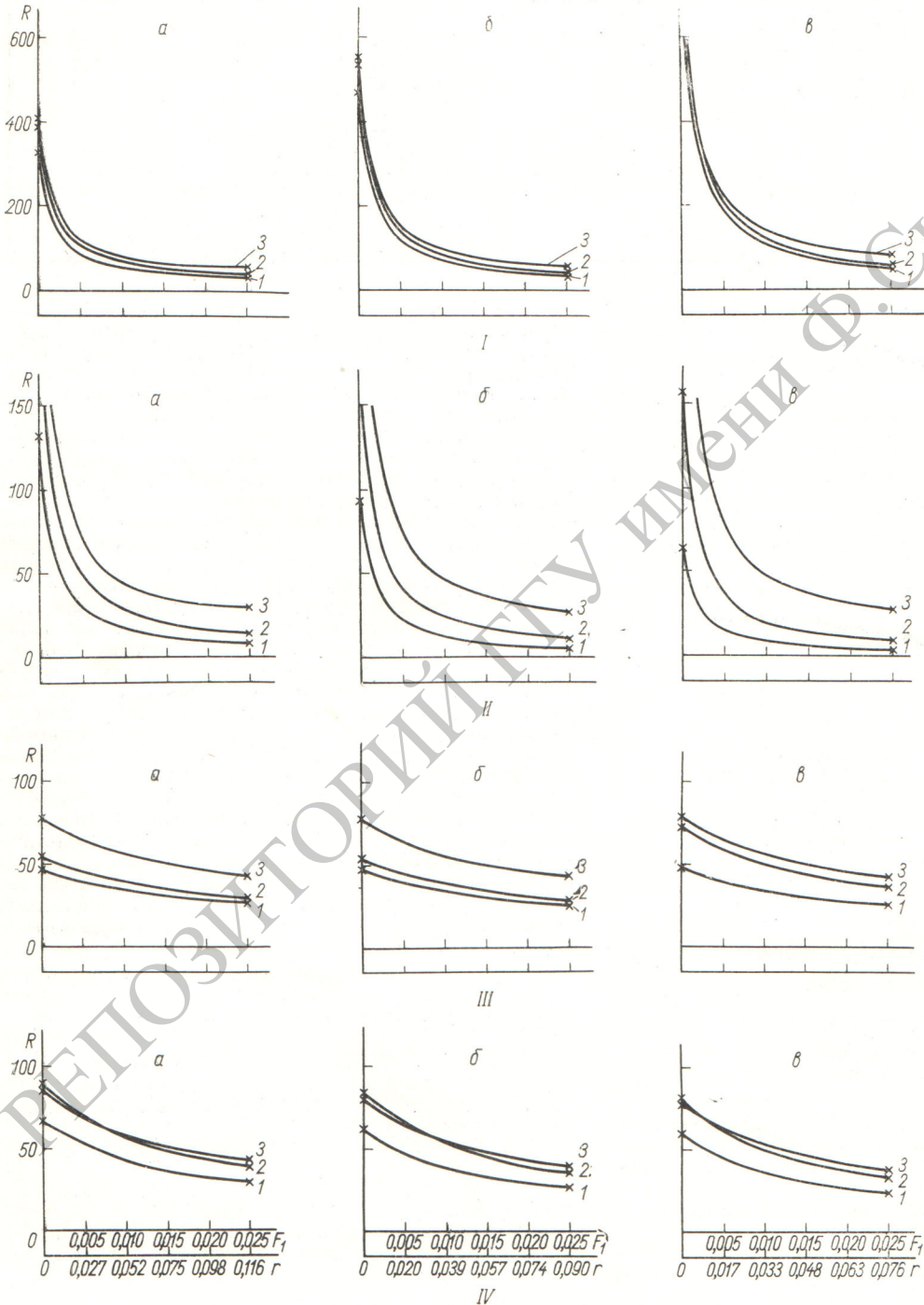
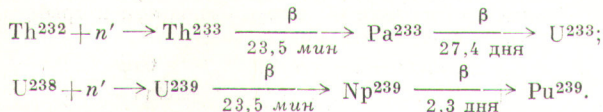


Рис. 1. Отношение  $R$  в функции  $F$ , или  $\tau$  при различных температурах и интегральных потоках для смесей:  
 I — U<sup>238</sup> — Pu<sup>239</sup>,  
 II — U<sup>238</sup> — U<sup>235</sup>, III — Th<sup>232</sup> — U<sup>233</sup>, IV — Th<sup>232</sup> — U<sup>235</sup>,  
 а —  $T=20,44^\circ\text{C}$ ;  
 б —  $T=250^\circ\text{C}$ ; в —  $T=500^\circ\text{C}$ ;  
 1 —  $10^{20}$  нейтр/см<sup>2</sup>;  
 2 —  $10^{21}$  нейтр/см<sup>2</sup>;  
 3 —  $10^{22}$  нейтр/см<sup>2</sup>.

быстрого их «выгорания». Если задаться допустимым 10%-ным выгоранием за год, то для  $\Phi = 5 \cdot 10^{13}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек необходимо, чтобы сечение поглощения нейтронов  $\sigma_a \leq 6 \cdot 10^{-23}$  см<sup>2</sup>.

Радиаторами для стабильных камер деления могут служить смеси двух изотопов, первый из которых имеет достаточно высокое сечение деления  $\sigma_f$  на тепловых нейтронах, а второй (неделяющийся) при взаимодействии с ними переходит в делящийся. В работе [1] было предложено применять смесь U<sup>235</sup> и U<sup>238</sup>, в которой выгорание U<sup>235</sup> компенсируется Pu<sup>239</sup>, образующимся из U<sup>238</sup>. Кроме этих смесей могут использоваться U<sup>238</sup> — Pu<sup>239</sup>, U<sup>233</sup> — Th<sup>232</sup>, U<sup>235</sup> — Th<sup>232</sup>, в которых Th<sup>232</sup> и U<sup>238</sup> переходят в U<sup>233</sup> и Pu<sup>239</sup> соответственно по цепочкам



При надлежащем выборе отношения начальных количеств делящегося ( $N_1^0$ ) и неделяющегося ( $N_2^0$ ) изотопов  $R = N_2^0/N_1^0$ , скорость деления  $\frac{dN_f}{dt}$  будет оставаться постоянной в течение определенного времени.

Возьмем отношение  $R$  таким, чтобы скорость деления к моменту времени  $\tau$  уменьшилась по сравнению с начальной не более, чем на 2%. Тогда

$$R = \frac{N_2^0}{N_1^0} = \frac{\sigma_{f1}}{\sigma_{f3}} \left( \frac{\sigma_{a3}}{\sigma_{a2}} - 1 \right) \frac{0,98 - e^{-\sigma_{a1}\Phi\tau}}{e^{-\sigma_{a2}\Phi\tau} - e^{-\sigma_{a3}\Phi\tau}}. \quad (1)$$

Здесь индексы 1 и 3 относятся к делящимся изотопам, индекс 2 — к неделящимся;  $R$  является функцией температуры и нейтронного спектра, так как от этих параметров зависят значения всех величин  $\sigma$ , входящих в уравнение (1).

Значение сечений  $\sigma$  для хорошо замедленного реакторного спектра можно вычислить по формуле

$$\sigma = \sigma_0 [g(T) + rS(T)], \quad (2)$$

приведенной в работе [2], или по формуле

$$\sigma = \sigma_0 P(F_1, T), \quad (3)$$

взятой из работы [3]. Здесь  $g(T)$ ,  $S(T)$  и  $P(F_1, T)$  — функции, табулированные в тех же работах. Между индексами  $F_1$  и  $r$  существует нелинейная связь [3]. В настоящей работе сечения рассчитывались по формуле (3).

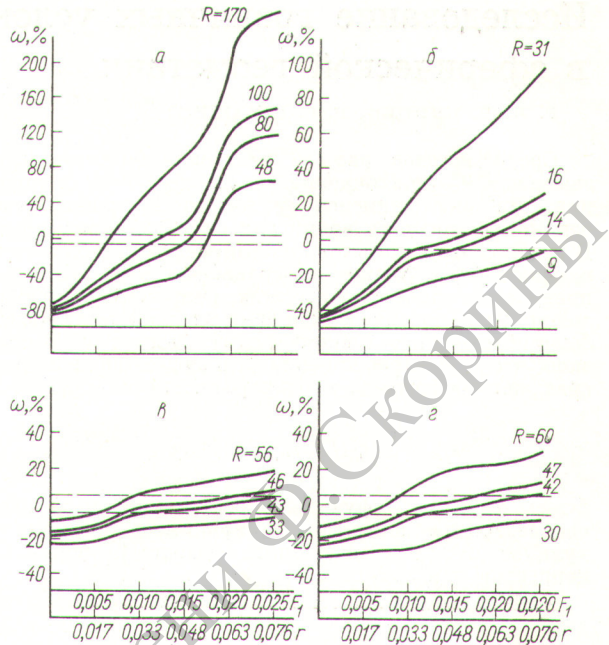
Отношения  $R$  определены для четырех смесей (U<sup>238</sup> — U<sup>235</sup>, U<sup>238</sup> — Pu<sup>239</sup>, Th<sup>232</sup> — U<sup>233</sup>, Th<sup>232</sup> — U<sup>235</sup>), при трех значениях температур (20,44; 250 и 500°С) и трех интегральных потоках ( $10^{22}$ ,  $10^{21}$ ,  $10^{22}$  нейтр/см<sup>2</sup>).

Зависимость  $R$  от  $F_1$  или  $r$  приведена на рис. 1.

Большая чувствительность отношения  $R$  к нейтронному спектру затрудняет создание универсальной камеры, пригодной для большинства реакторов.

Было рассчитано отклонение  $\omega$  (%) скорости деления от первоначального значения через год после нахождения радиатора в потоке  $3,2 \cdot 10^{13}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек для температуры 500°С при различных значениях  $R$ . Результаты расчета приведены на рис. 2. Из графиков видно, что наиболее подходящими смесями для универсальной камеры являются смеси U<sup>233</sup> — Th<sup>232</sup> и U<sup>235</sup> — Th<sup>232</sup>. Из практических соображений смесь U<sup>235</sup> — Th<sup>232</sup> предпочтительнее, так как в нее входят легко доступные и достаточно стабильные изотопы.

В цепочке преобразования Th<sup>232</sup> в U<sup>233</sup> образуется Pa<sup>233</sup>, период полураспада которого 27,4 дня и сечение



Р и с. 2. Отклонение скорости деления от начальной для всех четырех смесей при потоке  $3,2 \cdot 10^{13}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек и температура 500°С через год (пунктирными линиями выделена область  $\pm 5\%$ ):

а — U<sup>238</sup> — Pu<sup>239</sup>; б — U<sup>238</sup> — U<sup>235</sup>; в — Th<sup>232</sup> — U<sup>233</sup>; г — Th<sup>232</sup> — U<sup>235</sup>.

активации 68 барн. Этот изотоп может перейти в U<sup>234</sup>, неделяющийся на тепловых нейтронах. Поэтому начальная с некоторой плотностью потока необходима учитывать выгорание Pa<sup>233</sup>. Для  $\Phi = 5 \cdot 10^{13}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек выгорание Pa<sup>233</sup> за год составляет 10%. Таким образом, применение смесей с Th<sup>232</sup> возможно только для  $\Phi < 10^{14}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек.

Приведенные расчеты справедливы для бесконечно разбавленных смесей, когда можно пренебречь экранировкой внутренних слоев радиатора наружными для всего спектра нейтронов.

Толщина радиатора, при которой поглощается менее 10% нейтронов в любом интервале энергий  $\Delta E$ , определяется сечением первого резонанса  $\sigma_p$ . У рассмотренных смесей наибольшее значение  $\sigma_p$  (7000 барн) имеет U<sup>238</sup> при  $E_p = 6,6$  эв. Даже в этом случае расчеты оказываются справедливыми при плотности радиатора 5 мг/см<sup>2</sup>, что значительно больше, чем можно допустить для камер деления ( $\sim 2$  мг/см<sup>2</sup>), исходя из величин пробегов осколков.

Поступило в Редакцию 24/XI 1966 г.

### ЛИТЕРАТУРА

1. W. Loosemore et al. Neutron Dosimetry, 1, 89 (1963).
2. C. Westcott. Effective Cross Section Values for Wellmoderated Thermal Reactor Spectra. AECL, 1960, p. 1101.
3. R. Nisile. Neutron Dosimetry, 1, 111 (1963).