

Область Лепетуха, область Октябрьской Революции

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

Г.В. Компаниец, В.И. Носов,
Д.Н. Поляков

ИАЭ-4119/4

МЕТОД РАСЧЕТА
ОБРАЗОВАНИЯ ТРИТИЯ И ГЕЛИЯ
В НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛАХ
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Москва 1985

**Ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции
Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова**

**Г.В. Компаниец, В.И. Носов,
Д.Н. Поляков**

**МЕТОД РАСЧЕТА
ОБРАЗОВАНИЯ ТРИТИЯ И ГЕЛИЯ
В НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛАХ
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ**

**Москва
1985**

УДК 621.039.612

Ключевые слова: нейтрон, бор, бериллий, тритий, гелий.

Рассмотрен вопрос образования трития и гелия при взаимодействии нейтронов с ядрами бора и бериллия.

Записаны необходимые балансные дифференциальные уравнения, приведены их точные решения и получены приближенные расчетные соотношения, позволяющие с приемлемой степенью точности оценить величины концентраций образующихся ядер трития и гелия.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в процессе работы ядерного реактора могут образовываться изотопы — тритий и гелий [1 — 4]. Tritий представляет собой низкоэнергетический бета-излучатель ($E_{\text{max}} = 18$ кэВ, $E_{\text{ср}} = 5,7$ кэВ) с периодом полураспада $T_{1/2} = 12,34$ года [4 — 6]. Этот радионуклид является биологически активным, долгоживущим изотопом и в процессе диффузии может проникнуть в окружающее пространство, если не предпринять соответствующих мер по его задержанию. Свободный тритий способствует также охрупчиванию некоторых конструкционных оболочек [4]. Образование гелия в элементах конструкции реактора может привести к их распуханию.

В данной работе на основании опубликованных материалов рассмотрен вопрос образования изотопов трития и гелия при взаимодействии нейтронов с ядрами бора и бериллия. Приведены соответствующие ядерные цепочки, записаны необходимые балансные дифференциальные уравнения, получены их точные решения и приближенные расчетные соотношения, позволяющие при инженерных проработках найти приемлемой степенью точности величины концентраций образующихся ядер трития и гелия. В приложении даны микросечения тех изотопов, которые участвуют в реакциях образования трития и гелия.

1. ОБРАЗОВАНИЕ ТРИТИЯ В БОРЕ

Тритий образуется в боре в результате захвата нейтронов ядрами обоих изотопов бора. Вследствие высокого порога реакции ($E > 9$ МэВ) при взаимодействии нейтронов с изотопом ^{11}B можно пренебречь вкладом этой реакции в конечный результат [4].

Процесс образования трития при поглощении нейтронов изотопом ^{10}B наглядно (рис. 1) может быть представлен в виде следующих цепочек ядерных реакций:

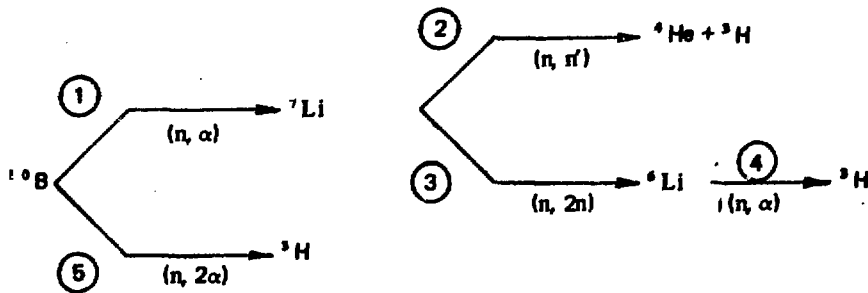


Рис. 1. Схема образования трития при захвате нейтронов ядрами изотопа ^{10}B

Не внося серьезной погрешности, можно не учитывать вклад реакции 3, поскольку она характеризуется высоким порогом взаимодействия ($E \geq 8$ МэВ) и относительно небольшим сечением поглощения ($\sigma \sim 0,1$ б) [4].

С учетом приведенных ядерных реакций взаимодействия можно записать следующие дифференциальные уравнения, определяющие убыль изотопа ^{10}B и образование трития (в групповом представлении).

Для реакций 1 и 5, которые характеризуют убыль изотопа ^{10}B , получаем

$$\frac{d^{10}\text{B}(t)}{dt} = -^{10}\text{B}(t) \sum_i (\sigma_{n,\alpha}^{(i)} + \sigma_{n,2\alpha}^{(i)}) \phi^{(i)} d'. \quad (1.1)$$

Для реакций 1 и 2, определяющих образование и убыль изотопа ^7Li , имеем

$$\frac{d^7\text{Li}(t)}{dt} = ^{10}\text{B}(t) \sum_i \sigma_{n,\alpha}^{(i)} \phi^{(i)} d' - \sum_i \sigma_{n,\text{Li}}^{(i)} \phi^{(i)} d' \cdot ^7\text{Li}(t). \quad (1.2)$$

Скорость увеличения концентрации трития с учетом реакций 2 и 5 дается уравнением

$$\frac{d^3\text{H}(t)}{dt} = ^7\text{Li}(t) \sum_i \sigma_{n,\text{Li}}^{(i)} \phi^{(i)} d' + ^{10}\text{B}(t) \sum_i \sigma_{n,2\alpha}^{(i)} \phi^{(i)} d' - \lambda \cdot ^3\text{H}(t). \quad (1.3)$$

Здесь ${}^7\text{Li}(t)$, ${}^{10}\text{B}(t)$, ${}^3\text{H}(t)$ — соответствующие концентрации изотопов бора, лития и трития, ядро/см³; $\sigma_{n,\alpha}^{(i)}$ — микроскопическое сечение поглощения нейтронов изотопом ${}^{10}\text{B}$ с образованием изотопа ${}^7\text{Li}$ (реакция 1), см²; $\sigma_{n,2\alpha}^{(i)}$ — микроскопическое сечение поглощения нейтронов изотопом ${}^{10}\text{B}$ с образованием ${}^3\text{H}$ (реакция 5); $\sigma_{Li}^{(i)}$ — микроскопическое сечение поглощения нейтронов изотопом ${}^7\text{Li}$ с последующим образованием изотопов ${}^3\text{H}$ и ${}^4\text{He}$ (реакция 2); $\phi^{(i)}$ — поток нейтронов, нейтр./(см².с); i — номер энергетической группы нейтронов; $\alpha' = t_{эф}/t_s$ — отношение эффективного времени работы на полной мощности к времени работы между началом запуска и остановкой реактора (коэффициент нагрузки); λ — постоянная распада трития ($\lambda = 1,79 \cdot 10^{-9}$ 1/с).

При получении уравнений (1.1) — (1.3) предполагалось, что реактор работает при постоянном уровне мощности в течение всей кампании t_s .

Дифференциальные уравнения (1.1) — (1.3) можно решить, используя метод интегрирующего множителя [7]:

$${}^{10}\text{B}(t) = {}^{10}\text{B}(0) \exp[-(D+E)t]; \quad (1.4)$$

$${}^7\text{Li}(t) = {}^{10}\text{B}(0) \frac{D}{A-D-E} \begin{bmatrix} e^{-(D+E)t} & -Ae^{-At} \end{bmatrix}; \quad (1.5)$$

$${}^3\text{H}(t) = \frac{{}^{10}\text{B}(0)}{A-D-E} \left\{ \frac{AD+E(A-D-E)}{\lambda-D-E} \begin{bmatrix} e^{-(D+E)t} & -1 \end{bmatrix} - \frac{AD}{\lambda-A} \begin{bmatrix} e^{-At} & -e^{-\lambda t} \end{bmatrix} \right\}. \quad (1.6)$$

Здесь $D = \sum \sigma_{n,\alpha}^{(i)} \phi^{(i)} \alpha'$; $E = \sum \sigma_{n,2\alpha}^{(i)} \phi^{(i)} \alpha'$; $A = \sum \sigma_{Li}^{(i)} \phi^{(i)} \alpha'$; $\text{B}(0)$ — концентрация изотопа ${}^{10}\text{B}$ в начальный момент времени ($t = 0$); $t < t_s$.

При получении решений (1.4) — (1.6) предполагалось, что начальные концентрации изотопов ${}^7\text{Li}$ и ${}^3\text{H}$ равны нулю. Указанные соотношения можно существенно упростить, если экспоненты представить в виде ряда и ограничиться линейными членами разложения в формулах (1.4), (1.5) и квадратичными в соотношении (1.6) для ${}^3\text{H}(t)$ [8]. Такой подход оправдан в тех случаях, когда выгорание

изотопов бора и лития мало (составляет несколько процентов), а образовавшийся тритий практически не распадается за время работы реактора t . После проведения соответствующих алгебраических преобразований получаем для изотопов ^{10}B и ^7Li

$$\frac{{}^{10}\text{B}(t)}{{}^{10}\text{B}(0)} = \left[1 - \sum_i (\sigma_{n,d}^{(i)} + \sigma_{n,2d}^{(i)}) \phi^{(i)} d' t \right] ; \quad (1.7)$$

$$\frac{{}^7\text{Li}(t)}{{}^{10}\text{B}(0)} = \sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \phi^{(i)} d' t \quad (1.8)$$

Для концентрации трития $^3\text{H}(t)$ имеем

$$\begin{aligned} \frac{{}^3\text{H}(t)}{{}^{10}\text{B}(0)} = & \left\{ \frac{1}{2} \sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \phi^{(i)} d' \cdot \sum_i \sigma_{7\text{Li}}^{(i)} \phi^{(i)} d' t^2 + \right. \\ & \left. + \sum_i \sigma_{n,2d}^{(i)} \phi^{(i)} d' t \cdot \left[1 - 0,5t \left(\lambda + \sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \phi^{(i)} d' + \sum_i \sigma_{n,2d}^{(i)} \phi^{(i)} d' \right) \right] \right\} \quad (1.9) \end{aligned}$$

В формуле (1.9) первое слагаемое определяет вклад реакций 1 и 2 в образование трития, а второе характеризует вклад прямой реакции 5.

Соотношение (1.9) для определения количества образовавшегося трития можно упростить, если не учитывать квадратичные члены разложения:

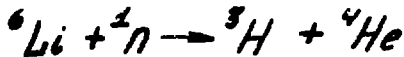
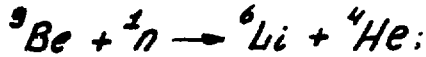
$$\frac{{}^3\text{H}(t)}{{}^{10}\text{B}(0)} \approx \sum_i \sigma_{n,2d}^{(i)} \phi^{(i)} d' t \quad (1.10)$$

Таким образом, получаем, что при небольших выгораниях изотопов ^{10}B и ^7Li образование трития обусловлено в основном реакцией прямого выхода ^3H при захвате нейтронов изотопом ^{10}B (реакция 5).

Следует отметить, что соотношения (1.7) – (1.9) могут быть получены непосредственно из решения исходных дифференциальных уравнений при сделанных выше предположениях.

2. ОБРАЗОВАНИЕ ТРИТИЯ В БЕРИЛЛИИ

Тритий образуется в бериллии при захвате нейтронов в результате следующих реакций взаимодействия [2, 3]:



(реакция 4 на рис. 1).

Дифференциальные уравнения, описывающие приведенную цепочку реакций, имеют следующий вид в случае работы реактора на постоянном уровне мощности (в групповом представлении):

$$\frac{d{}^9\text{Be}(t)}{dt} = -{}^9\text{Be}(t) \sum_i (\sigma_{n,d}^{(i)} + \sigma_c^{(i)}) \phi^{(i)} d'; \quad (2.1)$$

$$\frac{d{}^6\text{Li}(t)}{dt} = {}^9\text{Be}(t) \sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \phi^{(i)} d' - {}^6\text{Li}(t) \sum_i \sigma_{\text{Li}}^{(i)} \phi^{(i)} d'; \quad (2.2)$$

$$\frac{d{}^3\text{H}(t)}{dt} = {}^6\text{Li}(t) \sum_i \sigma_{\text{Li}}^{(i)} \phi^{(i)} d' - \lambda \cdot {}^3\text{H}(t). \quad (2.3)$$

Здесь ${}^9\text{Be}(t)$, ${}^6\text{Li}(t)$, ${}^3\text{H}(t)$ — соответствующие концентрации изотопов ${}^9\text{Be}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^3\text{H}$ в момент времени t ; $\sigma_{n,\alpha}^{(i)}$ — сечение поглощения нейтронов в ${}^9\text{Be}$ с образованием изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^4\text{He}$; $\sigma_c^{(i)}$ — сечение поглощения нейтронов в изотопе ${}^9\text{Be}$ (без учета предыдущей реакции); $\sigma_{\text{Li}}^{(i)}$ — сечение поглощения нейтронов в изотопе ${}^6\text{Li}$ с образованием трития и гелия (остальные обозначения приведены в предыдущем разделе).

Решение уравнений (2.1) — (2.3) имеет такой же вид, как в предыдущем случае. Для концентрации трития ${}^3\text{H}(t)$ получаем

$${}^3\text{H}(t) = \frac{{}^9\text{Be}(0) \left(\sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \phi^{(i)} d' \right) \left(\sum_i \sigma_{\text{Li}}^{(i)} \phi^{(i)} d' \right)}{\sum_i (\sigma_{\text{Li}}^{(i)} - \sigma_{n,d}^{(i)} - \sigma_c^{(i)}) \phi^{(i)} d'} \times$$

$$\times \left\{ \frac{\exp \left[- \sum_i (\sigma_{n,d}^{(i)} + \sigma_c^{(i)}) \phi^{(i)} d' t \right] - \exp[-\lambda t]}{\lambda - \sum_i (\sigma_{n,d}^{(i)} + \sigma_c^{(i)}) \phi^{(i)} d'} \right\}$$

$$\frac{\exp\left[-\sum_i \sigma_{Li}^{(i)} \phi^{(i)} \alpha' t\right] - \exp[-\lambda t]}{\lambda - \sum_i \sigma_{Li}^{(i)} \phi^{(i)} \alpha'}$$
, (2.4)

где ${}^9\text{Be}(0)$ — концентрация ${}^9\text{Be}$ в начальный момент времени. При получении соотношения (2.4) предполагалось, что начальные концентрации ${}^6\text{Li}$ и трития равны нулю. Поскольку концентрация бериллия изменяется мало во время кампании, соотношение (2.4) можно преобразовать к следующему виду (пренебрегается также распадом трития):

$$\frac{{}^3\text{H}(t)}{{}^9\text{Be}(0)} = \frac{\sum_i \sigma_{n,\alpha}^{(i)} \phi^{(i)} \alpha' t}{\sum_i \sigma_{Li}^{(i)} \phi^{(i)} \alpha' t} \times x \left[1 - \exp\left(-\sum_i \sigma_{Li}^{(i)} \phi^{(i)} \alpha' t\right)\right].$$
 (2.5)

Соотношение (2.5) можно упростить, если экспоненту e^{-x} в полученном решении представить в виде ряда и ограничиться затем квадратичным членом разложения, что, вообще говоря, является оправданным при малом выгорании изотопа ${}^6\text{Li}$. Так, например, при $x = \sum_i \sigma_{Li}^{(i)} \phi^{(i)} \alpha' t \approx 0,1$ относительная погрешность δ , внесенная в конечный результат, составляет несколько процентов, а при $x = 0,3$ не превышает $\sim 10\%$ ($\delta < x/3$). В итоге получаем следующее соотношение:

$$\frac{{}^3\text{H}(t)}{{}^9\text{Be}(0)} \approx \left(\sum_i \sigma_{n,\alpha}^{(i)} \phi^{(i)} \alpha' t\right) \left(\sum_i \sigma_{Li}^{(i)} \phi^{(i)} \alpha' t\right) \frac{t^2}{2}. \quad (2.6)$$

Таким образом, количество образовавшегося трития в бериллии характеризуется квадратичной зависимостью (в рамках сделанных выше предположений) от времени облучения и плотности потока нейтронов.

3. ОБРАЗОВАНИЕ ГЕЛИЯ В БЕРИЛЛИИ

Процесс образования гелия при поглощении нейтронов и γ -квантов изотопом ${}^9\text{Be}$ наглядно представлен ниже в виде следующих

цепочек ядерных взаимодействий [2, 3], имеющих практическое значение:

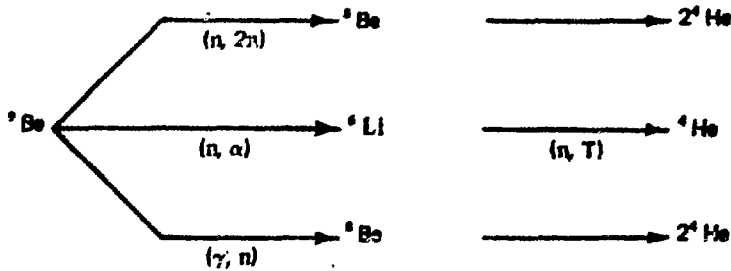


Рис. 2. Схема образования гелия при захвате ядрами ${}^9\text{Be}$ нейтронов и γ -квантов (ядра ${}^9\text{Be}$ распадаются почти мгновенно на два атома ${}^4\text{He}$)

Дифференциальные уравнения, описывающие приведенную цепочку реакций, можно представить в следующем виде при работе реактора на постоянном уровне мощности (в групповом приближении):

$$\frac{d{}^9\text{Be}(t)}{dt} = {}^9\text{Be}(0) \sum_i \sigma_{n,2n}^{(i)} \phi^{(i)} d'; \quad (3.1)$$

$$\frac{d{}^4\text{He}(t)}{dt} = {}^9\text{Be}(0) \sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \phi^{(i)} d'; \quad (3.2)$$

$$\frac{d{}^6\text{Li}(t)}{dt} = {}^9\text{Be}(0) \sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \phi^{(i)} d' - {}^6\text{Li}(t) \sum_i \sigma_{\beta,\text{Li}}^{(i)} \phi^{(i)} d'; \quad (3.3)$$

$$\frac{d{}^4\text{He}(t)}{dt} = {}^6\text{Li}(t) \sum_i \sigma_{\beta,\text{Li}}^{(i)} \phi^{(i)} d'; \quad (3.4)$$

$$\frac{d{}^8\text{Be}(t)}{dt} = {}^9\text{Be}(0) \sum_i \sigma_{\gamma,n}^{(i)} \phi^{(i)} d'. \quad (3.5)$$

Здесь ${}^3\text{Be}(t)$, ${}^4\text{He}(t)$, ${}^6\text{Li}(t)$ — концентрации соответствующих изотопов ${}^3\text{Be}$, ${}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}$ в момент времени t (в начальный момент концентрации указанных изотопов равны нулю); ${}^9\text{Be}(0)$ — концентрация изотопа ${}^9\text{Be}$ в начальный момент времени; $\sigma_{n,2n}^{(i)}$ — сечение поглощения нейтронов ${}^9\text{Be}$ с образованием изотопа ${}^8\text{Be}$ и рождением двух нейтронов [реакция $(n, 2n)$]; $\sigma_{n,\alpha}^{(i)}$ — сечение поглощения ${}^9\text{Be}$ с образованием изотопа ${}^6\text{Li}$ и гелия [реакция (n, α)]; $\sigma_{Li}^{(i)}$ — сечение поглощения изотопа ${}^6\text{Li}$ с образованием гелия и трития [реакция (n, T)]; i — номер группы нейтронов; $\sigma_{\gamma,n}^{(j)}$ — сечение поглощения γ -кванта ядром ${}^9\text{Be}$ с образованием изотопа ${}^8\text{Be}$ и рождением фотонейтрона [реакция (γ, n)]; $\phi_{\gamma}^{(j)}$ — поток γ -квантов энергии E_j (остальные обозначения даны в разд. 1).

При записи приведенной системы уравнений предполагалось, что концентрация изотопа бериллия ${}^9\text{Be}$ не изменяется с течением времени. Далее приводятся вклады отдельных реакций.

Вклад реакции $(n, 2n)$ в образование гелия можно получить из решения уравнения (3.1):

$$\frac{{}^4\text{He}(t)}{{}^9\text{Be}(0)} = 2 \sum_i \sigma_{n,2n}^{(i)} \phi^{(i)} d' t \quad (3.6)$$

Вклад первой составляющей реакции (n, α) в образование гелия можно найти из решения уравнения (3.2):

$$\frac{{}^4\text{He}(t)}{{}^9\text{Be}(0)} = \sum_i \sigma_{n,\alpha}^{(i)} \phi^{(i)} d' t \quad (3.7)$$

Для второй составляющей реакции (n, α) расчетное соотношение получаем из решения уравнений (3.3) и (3.4):

$$\frac{{}^4\text{He}(t)}{{}^9\text{Be}(0)} = \frac{\sum_i \sigma_{n,\alpha}^{(i)} \phi^{(i)} d' t - \frac{\sum_i \sigma_{n,\alpha}^{(i)} \phi^{(i)} d' t}{\sum_i \sigma_{Li}^{(i)} \phi^{(i)} d' t}}{(1 - \exp(-\sum_i \sigma_{Li}^{(i)} \phi^{(i)} d' t))} \quad (3.8)$$

Следует отметить, что правые части соотношений (3.8) и (2.5) одинаковы, поскольку образование гелия и трития в бериллии в этой цепочке реакций одинаково. Если затем в полученном решении (3.8) экспоненту представить в виде ряда и ограничиться квадратичным членом разложения, то получим (см. разд. 2)

$$\frac{{}^4\text{He}(t)}{{}^9\text{Be}(0)} \approx \frac{1}{2} \left(\sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \phi^{(i)} d' \right) \left(\sum_i \sigma_{\alpha, \text{Li}}^{(i)} \phi^{(i)} d' \right) t^2. \quad (3.9)$$

Полный вклад реакции (n, α) в образование гелия в бериллии получается при учете обеих составляющих, т.е. в итоге суммирования соотношений (3.7) и (3.9) [или (3.8)]:

$$\frac{{}^4\text{He}(t)}{{}^9\text{Be}(0)} \approx \sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \phi^{(i)} d' t + \left(\sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \phi^{(i)} d' \right) \times \left(\sum_i \sigma_{\alpha, \text{Li}}^{(i)} \phi^{(i)} d' \right) \frac{t^2}{2}. \quad (3.10)$$

Для (γ, n) реакции имеем

$$\frac{{}^4\text{He}(t)}{{}^9\text{Be}(0)} = 2 \sum_j \sigma_{\gamma, n}^{(j)} \phi_{\gamma}^{(j)} d' t. \quad (3.11)$$

Полное количество образовавшегося гелия в бериллии получается при учете всех типов ядерных реакций, т.е. в результате суммирования соотношений (3.6), (3.10) и (3.11):

$$\frac{{}^4\text{He}(t)}{{}^9\text{Be}(0)} \approx \left(2 \sum_i \sigma_{n,2n}^{(i)} \phi^{(i)} d' + 2 \sum_j \sigma_{\gamma, n}^{(j)} \phi_{\gamma}^{(j)} d' + \sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \phi^{(i)} d' \right) t + \left(\sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \phi^{(i)} d' \right) \left(\sum_i \sigma_{\alpha, \text{Li}}^{(i)} \phi^{(i)} d' \right) \frac{t^2}{2}. \quad (3.12)$$

Таким образом, в рамках сделанных выше предположений получена закономерность образования гелия в бериллии при ядерных взаимодействиях, которая характеризуется квадратичной функцией. Следует отметить, что квадратичный член в соотношении (3.12), как это было показано в разд. 2, характеризует процесс образования трития в бериллии.

4. ОБРАЗОВАНИЕ ГЕЛИЯ В БОРЕ

Гелий образуется в боре в результате захвата нейтронов ядрами изотопа ${}^{10}\text{B}$ (см. схему 1). Полное количество образовавшегося гелия определяется вкладом трех составляющих:

1 — реакция ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$;

2 — реакция $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$;

3 — реакция $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}(n, n'T)^4\text{He}$.

Вклад реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ в образование гелия можно найти из решения дифференциального уравнения

$$\frac{d^4\text{He}(t)}{dt} = {}^{10}\text{B}(0) \sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \Phi^{(i)} d^i, \quad (4.1)$$

где $^{10}\text{B}(0)$ — концентрация изотопа ^{10}B в начальный момент времени; $^4\text{He}(t)$ — концентрация гелия в момент времени t (остальные обозначения, как в разд. 1).

При записи уравнения (4.1) и в дальнейшем предполагается, что концентрация изотопа ^{10}B слабо изменяется с течением времени. Из решения уравнения (4.1) находим вклад первой составляющей в образование гелия:

$$\frac{{}^4\text{He}(t)}{{}^{10}\text{B}(0)} = \sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \Phi^{(i)} d^i t. \quad (4.2)$$

Уравнение для концентрации гелия, образующегося при реакции $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$, имеет такой же вид, как (4.1). Из его решения получаем вклад второй составляющей:

$$\frac{{}^4\text{He}(t)}{{}^{10}\text{B}(0)} = 2 \sum_i \sigma_{n,2d}^{(i)} \Phi^{(i)} d^i t. \quad (4.3)$$

Для определения вклада третьей составляющей запишем следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d^7\text{Li}(t)}{dt} &= {}^{10}\text{B}(0) \sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \Phi^{(i)} d^i - {}^7\text{Li}(t) \sum_i \sigma_{\text{Li}}^{(i)} \Phi^{(i)} d^i, \\ \frac{d^4\text{He}(t)}{dt} &= {}^7\text{Li}(t) \sum_i \sigma_{\text{Li}}^{(i)} \Phi^{(i)} d^i. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Решение системы (4.4) записывается в таком же виде, как соотношение (3.8) (в правой части вместо сечения $\sigma_{\text{Li}}^{(i)}$ записывается $\sigma_{\text{Li}}^{(i)}$). После разложения экспоненты в ряд получаем

$$\frac{{}^4\text{He}(t)}{{}^{10}\text{B}(0)} \approx \left(\sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \Phi^{(i)} d^i \right) \left(\sum_i \sigma_{\text{Li}}^{(i)} \Phi^{(i)} d^i \right) \frac{t^2}{2}. \quad (4.5)$$

Полное количество образовавшегося гелия в боре получается в результате суммирования соотношений (4.2), (4.3) и (4.5), т.е.

$$\frac{{}^4\text{He}(t)}{{}^{10}\text{B}(0)} = \left(\sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \Phi^{(i)} + 2 \sum_i \sigma_{n,2d}^{(i)} \Phi^{(i)} \right) t + \left(\sum_i \sigma_{n,d}^{(i)} \Phi^{(i)} \right) \left(\sum_i \sigma_{n,2d}^{(i)} \Phi^{(i)} \right) \frac{t^2}{2} \quad (4.6)$$

Как и в предыдущем случае, закономерность образования гелия в боре определяется квадратичной функцией от времени облучения и плотности потока нейтронов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен вопрос образования трития и гелия при взаимодействии нейтронов с ядрами изотопов ${}^9\text{Be}$ и ${}^{10}\text{B}$ во время работы в ядерном реакторе. Количество образующихся изотопов трития и гелия в каждом изучаемом случае зависит от спектра нейтронов в месте расположения исследуемого материала и времени облучения. Показано, что при малых выгораниях исходных изотопов закономерность образования гелия и трития в зависимости от времени облучения и плотности потока нейтронов имеет вид квадратичной функции.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В таблице даны групповые микросечения поглощения для изотопов, участвующих в реакциях образования трития и гелия при взаимодействии нейтронов с ядрами ${}^{10}\text{B}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^6\text{Li}$ и ${}^9\text{Be}$. В квадратных скобках указаны работы, из которых приводятся соответствующие сечения взаимодействия. Обозначения реакций взаимодействия приведены в тексте данной работы в соответствующих разделах. Микросечения в тепловой группе даны при энергии 0,025 эВ.

Поскольку величины концентраций образующихся изотопов трития и гелия определяются значениями принятых сечений реакций взаимодействия, необходима постоянная их корректировка по мере поступления новой информации.

Значения сечения пороговой реакции (γ, n) для изотопа ${}^9\text{Be}$ ($E > 1,65$ МэВ) даны в работах [9 – 11]. Ниже приводятся величин-

ны сечения $\sigma_{\gamma, n}$ для некоторых характерных энергий γ -квантов.

Энергия фотона, МэВ	$\sigma_{\gamma, n}$, мб
1,69	1,26
2,11	0,28
2,75	0,55
2,95	1,2
4,6	1,0

Микросечения изотопов ${}^6\text{B}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^6\text{Li}$ и ${}^9\text{Be}$

Интервал энергий	${}^6\text{B}$		${}^7\text{Li}$	${}^6\text{Li}$	${}^9\text{Be}$	
	$\sigma_{n, \alpha'}$ б	$\sigma_{n, 2\alpha'}$ мб	$\sigma_{\gamma, \text{Li}'}$ мб	$\sigma_{\gamma, \text{Li}'}$ б	$\sigma_{n, 2n'}$ мб	$\sigma_{n, \alpha'}$ мб
	[12, 13]	[14]	[15]	[12]	[14]	[2, 16]
6,5 – 10 МэВ	0,04	135	410	0,06	575	15
4,0 – 6,5 МэВ	0,12	105	215	0,09	530	50
2,5 – 4,0 МэВ	0,18	40	6	0,15	365	90
1,4 – 2,5 МэВ	0,31	17	—	0,23	—	40
0,8 – 1,4 МэВ	0,24	—	—	0,30	—	3
0,4 – 0,8 МэВ	0,56	—	—	0,65	—	—
0,2 – 0,4 МэВ	0,90	—	—	2,35	—	—
0,1 – 0,2 МэВ	1,59	—	—	1,04	—	—
50 – 100 кэВ	2,26	—	—	0,83	—	—
25 – 50 кэВ	3,24	—	—	0,97	—	—
10 – 25 кэВ	4,98	—	—	1,25	—	—
1,82 – 10 кэВ	9,53	—	—	2,36	—	—
407 – 1820 эВ	21,3	—	—	5,27	—	—
150 – 407 эВ	38,8	—	—	9,59	—	—
55,1 – 150 эВ	63,8	—	—	15,8	—	—
20,3 – 55,1 эВ	105	—	—	26,2	—	—
7,45 – 20,3 эВ	174	—	—	43,0	—	—
2,74 – 7,45 эВ	287	—	—	71,2	—	—
1,01 – 2,74 эВ	475	—	—	117	—	—
0,67 – 1,01 эВ	672	—	—	167	—	—
0,025 эВ	3837	—	—	945	—	—

Список литературы

1. Бедениг Д. Газоохлаждаемые высокотемпературные реакторы. — М.: Атомиздат, 1975.
2. Стен Д.Р. Физика промежуточных реакторов. — М.: Атомиздат, 1961.
3. Уайт Д., Бёрк Д. Бериллий. — М.: ИЛ, 1960.
4. Annucci F.D' et al. Tritium Analysis of irradiated burnable poison rods. — Nucl. techn., 1982, vol. 59, № 1, p. 9 — 13.
5. Аболмасов Ю.П. — Атомная энергия, 1976, т. 41, вып. 3, с. 215.
6. Бродер Д.П. и др. — Атомная энергия, 1979, т. 46, вып. 2, с. 120.
7. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. — М.: Наука, 1976.
8. Белл Д., Глэстон С. Теория ядерных реакторов. — М.: Атомиздат, 1974.
9. Jakobson M.J. Photodisintegration of ^9Be from threshold to 5 MeV. — Phys. Rev., 1961, vol. 123, № 1, p. 229.
10. Кипин Дж.Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. — М.: Атомиздат, 1967.
11. Vesely F., Bensch F. Photoneutron production cross-section of beryllium and deuterium at a number of gamma energies below 3 MeV. — J. Nucl. Energy, 1973, vol. 27, № 11, p. 828.
12. Захарова С.М., Сивак Б.Н., Тошинский Т.И. Ядерно-физические константы для расчета реакторов. — В кн.: Бюллетень информационного центра по ядерным данным. Выпуск III, приложение I. — М.: Атомиздат, 1967.
13. Davis E.A. et al. The disintegration of ^{10}B and ^{19}F by fast neutrons. — Nucl. Phys., 1961, vol. 27, № 1 — 4, p. 448.
14. Бычков В.М. и др. Сечения пороговых реакций, вызываемых нейтронами. — М.: Энергоиздат, 1982.
15. Hopkins J.C., Drake D.M. Elastic and inelastic scattering of fast neutrons from ^6Li and ^7Li . — Nucl. Phys., 1968, vol. A 107, p. 139.
16. Droulers J. et al. — J. Nucl. Mater., 1967, vol. 21, № 1, p. 337.

Редактор Л. А. Кузьмина
Технический редактор Н. А. Малькова
Корректор Г. Я. Кармалитова

Т-23031. 28.11.84. Формат 60x90/16. Уч.-изд. л. 0,7
Тираж 125. Индекс 3624. Заказ 73

Отпечатано в ИАЭ

10 коп.

Индекс 3624

Средств. ДАН-1161. 11, 1968