

Куйкабаева А.А., Бекманн И.Н.,  
Тажикаева И.Л., Сулейменов А.Ж.

**Выделение трития  
из сферической гранулы  
за счёт отдачи**

Проведен анализ выделения трития из сферической гранулы, были сделаны расчеты пробегов атомов отдачи трития в титанате лития и в атмосфере гелия. В модели выделения генерируемых в ядерной реакции атомов отдачи удалось рассчитать долю атомов трития, покидающих сферу (гранулу) за счет эффекта отдачи. Также удалось построить концентрационный профиль, с учетом обеднения поверхности сферы тритием, необходимый для точного расчета кинетики выделения трития из сферического образца.

**Ключевые слова:** термоядерный реактор, выделение трития, бланкет, сферическая гранула, эффект отдачи.

---

Kuikabaeva A., Beckman I.,  
Tazhibaeva I., Suleimenov A.

**Extraction of tritium from spherical  
granules at the expense of kickback**

The analysis of selection of tritium is conducted from a spherical granule, were figured on runs of return tritium atoms in titanate of lithium and in the atmosphere of helium. In the model of selection the atoms of return generated in a nuclear reaction it was succeeded to expect the stake of atoms of tritium abandoning a sphere (granule) due to the effect of return. It was also succeeded to build a concentration profile, taking into account impoverishment of surface of sphere by tritium, necessary for the exact calculation of kinetics of selection of tritium from a spherical standard.

**Key words:** thermonuclear reactor, excretion of tritium, blanket, spherical granule, recoil effect.

---

Куйкабаева А.А., Бекман И.Н.,  
Тәжібаева И.Л., Сүлейменов А.Ж.

**Қайтарым себебінен тритийдің  
сфералық грануладан бөлінуі**

Сфералық грануладан тритий бөлінуінің анализі жүргізіліп, литий титанаты мен гелий атмосферасындағы тритий қайтарым атомдарының қашықтықтары есептелді. Қайтарым атомдарының ядролық реакцияларында сферадан шыққан тритий атомдарының мөлшері анықталды. Сфералық грануладан бөлінген тритийдің кинетикасын анықтауға қажет болатын, концентрациялық профиль құрылды.

**Түйін сөздер:** термоядролық реактор, тритийдің бөлінуі, бланкет, сфералық гранула, қайтарым эффектісі.

## ВЫДЕЛЕНИЕ ТРИТИЯ ИЗ СФЕРИЧЕСКОЙ ГРАНУЛЫ ЗА СЧЁТ ОТДАЧИ

### Введение

В  ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$  – реакции выделяющаяся энергия распределяется между атомами гелия и трития. При этом энергия отдачи трития после ядерной реакции около 3 МэВ. Эффект отдачи приводит, в частности, к тому, что атомы трития, генерируемые в приповерхностном слое, толщиной равной пробегу атомов отдачи, будут выделяться из гранулы, причём этот поток не зависит ни от температуры, ни от типа кристаллической структуры материала.

### Пробеги отдачи трития

Расчеты пробегов атомов отдачи трития в титанате лития и в атмосфере гелия проводили по программе STRIM-TRIM при следующих значениях параметров: масса трития 3.008 а.е., энергия ионов – 3 МэВ, плотность мишени из  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$   $2.8700 \text{ г/см}^3 = 9.4454 \cdot 10^{22} \text{ атом/см}^3$ . Состав мишени представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав титаната лития

Элемент	Атомный номер	Атом%	Масс%
Li	3	33,33	12,64
Ti	22	16,67	43,64
O	8	50,00	43,72

Для энергии 3 МэВ пробег атомов отдачи трития в титанате лития составил 84 микрона (0,0084 см), при этом электронная составляющая удельной потери энергии  $dE/dx=0,786 \text{ МэВ}/(\text{мг}/\text{см}^2)$ , ядерная составляющая удельной потери энергии  $dE/dx=1,424 \cdot 10^{-4} \text{ МэВ}/(\text{мг}/\text{см}^2)$ , продольное рассеяние узкого пучка 3,4 мкм, боковое рассеяние 3 мкм. Поскольку радиус использованных в работе гранул был равен 1 мм, то эффект отдачи не затрагивал центральную область гранулы, однако приповерхностный слой гранулы должен быть сильно обеднён тритием, что должно сказаться на интенсивности газовыделения, осуществляемого за счёт диффузии.

Расчёты пробегов атомов отдачи трития в газообразном гелии проводили для плотности мишени:  $1,8000 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3 = 2,7079 \cdot 10^{19} \text{ атом/см}^3$ . Результаты счета: электронная составляющая удельной потери энергии  $dE/dx=0,2807 \text{ МэВ/(мг/см}^2)$ , ядерная составляющая удельной потери энергии  $dE/dx=1,880 \cdot 10^{-4} \text{ МэВ/(мг/см}^2)$ , пробег 363,64 мм (36 см), продольное рассеяние узкого пучка 14,06 мм, боковое рассеяние 4,78 мм.

**Поток атомов отдачи трития из сферической гранулы**

Рассмотрим особенности эффекта отдачи в сферической грануле [1].

Введём обозначения:  $C_{Li}$  и  $C_T$  концентрации лития и трития, соответственно [атом·см<sup>-3</sup>],  $\lambda$  - постоянная распада трития [с<sup>-1</sup>],  $r_0$  - радиус зерна сферической формы [см] и  $R_t$  - пробег отдачи трития в исследуемом материале [см]. Литий равномерно распределён по объёму зерна. Тритий образуется сразу во всём объёме зерна по реакции  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$  (Это не совсем точно, т.к. тепловые нейтроны должны продиффундировать в объём зерна и равномерно его насытить, что требует времени).  $\Phi$  - скорость генерации нейтронов в объёме материала [нейтр·см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup>].  $\sigma$  - эффективное сечение реакции взаимодействия нейтронов с литием [см<sup>2</sup>],  $S$  - площадь поверхности [см<sup>2</sup>] (площадь геометрической поверхности сферы  $S=4\pi r_0^2$ ),  $\eta$  - вероятность протекания ядерной реакции по конкретному каналу (в основном определяется долей изотопа  ${}^6\text{Li}$  в смеси изотопов лития) [2].

Распределение концентрации трития по толщине сферы определяется решением дифференциального уравнения:

$$\text{Поскольку } \begin{cases} (r+\xi)^2 + h^2 = r_0^2 \\ \xi^2 + h^2 = R_t^2 \end{cases}, \text{ то } \xi = \frac{r_0^2 - R_t^2 - r^2}{2r}. \quad (3)$$

Таким образом, в приповерхностном слое зерна (слой 1),  $r_0 - R_t \leq r \leq r_0$ :

$$q(r) = \frac{2R_t r - (r_0^2 - R_t^2) + r^2}{4R_t r} \quad (4a)$$

$$\frac{\partial C_T(t)}{\partial t} = \Lambda C_{Li}(t)[1 - q(r)] - \lambda C_T(t) \quad (1)$$

где  $q(r)$  - вероятность вылета, из зерна за счет эффекта отдачи атома трития, образовавшегося в точке с координатой  $r$ , а  $\Lambda = \Phi \sigma L S \eta N$ ;  $\Lambda$  - постоянная скорости образования трития.

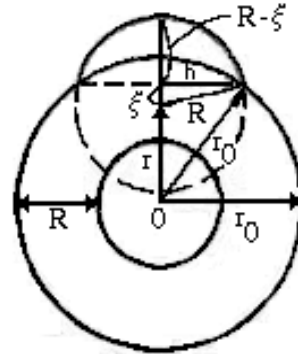


Рисунок 1 – Модель сферического зерна

Из геометрических соображений очевидно (рис. 1), что  $q(r)$  равна отношению площади поверхности сферического сегмента высотой  $R_t - \Delta$ , расположенного вне сферического зерна, к общей поверхности сферы радиуса  $r_0$ :

$$q(r) = \frac{2\pi(R_t - \xi)R_t}{4\pi R_t^2} = \frac{R_t - \xi}{2R_t}, \quad (2)$$

$R_t$  - пробег атомов отдачи трития в  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ;  $r$  - координата точки рождения трития в сферической грануле; ( $\xi$  и  $h$  - см. рисунок 1).

в объеме зерна (слой №2)  $0 \leq r \leq r_0 - R_t$ :

$$q(r)=0.. \quad (4б)$$

Решение уравнения (1) описывает изменение во времени концентрации трития:

$$C_T(t) = \frac{\Lambda}{\lambda - \Lambda} C_{Li}^0 [1 - q(r)] (e^{-\Lambda t} - e^{-\lambda t}) + C_T^0 e^{-\lambda t}, \quad (5)$$

где  $C_{Li}^0$  – начальная концентрация трития.

При достаточно больших временах член  $\exp(-\lambda t)$  делается пренебрежимо малым по сравнению с  $\exp(-\Lambda t)$ , и если в начальный момент трития в образце не было, то выражение (5) можно упростить:

$$C_T(t) = \frac{\Lambda}{\lambda - \Lambda} [1 - q(r)] C_{Li}^0 e^{-\Lambda t} \quad (6a)$$

и так как  $C_{Li}^0 e^{-\Lambda t} = C_{Li}$  и  $\lambda \gg \Lambda$ , то

$$C_T(r, \infty) = \frac{\Lambda C_{Li}}{\lambda} [1 - q(r)] \quad (6b)$$

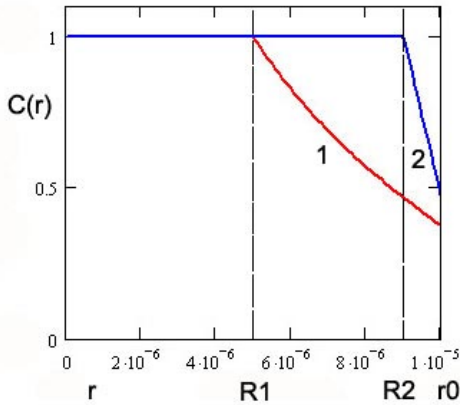


Рисунок 2 – Распределение концентрации трития по радиусу сферической гранулы

Концентрация трития (при равновесии) – равна  $\Lambda/\lambda$  - отношению скорости образования к скорости распада трития [3].

Влияние величины пробега отдачи трития на форму концентрационного профиля трития, образовавшегося из лития в грануле сферической формы. (Модельный пример, рассчитанный при значениях параметров  $R_t = 5 \cdot 10^{-6}$  (1) и  $1 \cdot 10^{-6}$  (2) см).

В стационарном состоянии, распределение концентрации трития по радиусу сферы (рисунок 3) в тонком приповерхностном слое толщиной  $R_t$ , обедненным тритием за счёт эффекта отдачи:

$$C_T(r) = \frac{\Lambda C_{Li}}{\lambda} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{r_0^2 - R_t^2}{4R_t r} - \frac{1}{4} \frac{r}{R_t} \right\}; \quad r_0 - R_t \leq r \leq r_0. \quad (7a)$$

Концентрационный профиль трития в центральной зоне сферы

$$C_T(r) = \frac{\Lambda C_{Li}}{\lambda}; \quad 0 \leq r \leq r_0 - R_t. \quad (7b)$$

Общее число атомов трития, генерируемых в сфере радиуса  $r_0$  в единицу времени

$$G = \frac{4}{3} \pi r_0^3 C_{Li} \Lambda. \quad (8)$$

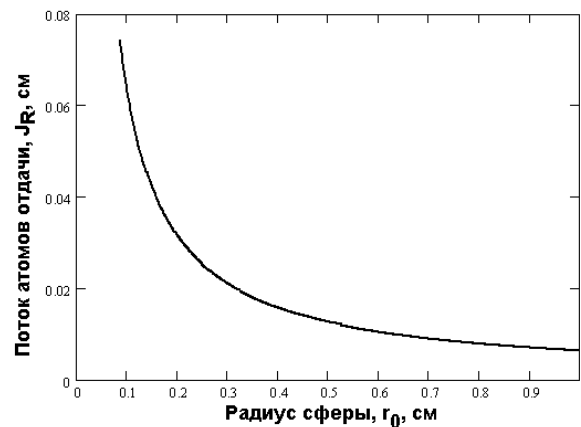


Рисунок 3 – Зависимость нормированного потока атомов отдачи трития из сферы от размера гранулы

Общее число атомов трития, выделяющихся из зерна в единицу времени за счет эффекта отдачи (поток) в стационарном состоянии (при наличии равновесия между скоростью генерации трития и скоростью его выделения за счёт отдачи):

$$J_R = C_{Li} \Lambda 4\pi \int_{r_0 - R_t}^{r_0} q(r) r^2 dr. \quad (9)$$

Взяв интеграл, получим выражение для стационарного потока атомов отдачи трития из сферы:

$$J_R = \pi \Lambda C_{Li} \left( r_0^2 R_t - \frac{1}{12} R_t^3 \right). \quad (10)$$

Нормированный на скорость образования, поток атомов отдачи трития:

$$J_R^* = \frac{J_R}{G} = \frac{3}{4} \frac{R_t}{r_0} - \frac{1}{16} \left( \frac{R_t}{r_0} \right)^3. \quad (11)$$

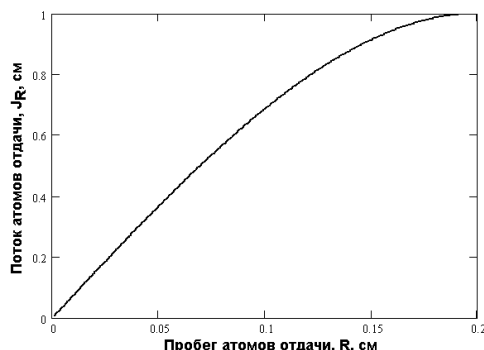
Функция  $J_R^*$  изменяется от 0 до 1.

Зависимость нормированного на мощность источника потока атомов отдачи трития из сферы от размера гранулы (при постоянном пробеге отдачи трития  $R=0,0084$  см) представлена на рисунке 3, а от пробега атомов отдачи (при постоянном радиусе гранулы  $r_0=0,1$  см) – на рисунке 4.

Если пробег трития мал  $R_t \ll r_0$  (для  $J_R^* < 35\%$ ), то:

$$J_R^* = \frac{3}{4} \frac{R_t}{r_0}. \quad (11a)$$

При  $r \leq 0.5R_t$ ,  $J_R^* = 1$ .



**Рисунок 4** – Зависимость нормированного потока атомов отдачи трития из сферы от пробега атомов отдачи в материале гранулы

Таким образом, уже в рамках простейшей модели выделения генерируемых в ядерной реакции атомов отдачи удалось:

1. Рассчитать долю атомов трития, покидающих сферу (гранулу) за счет эффекта отдачи;

2. Построить концентрационный профиль с учетом обеднения поверхности сферы тритием необходимый для точного расчета кинетики выделения трития из сферического образца.

Важно подчеркнуть, что тритий может покинуть одиночную сферу без какого-либо термического стимулирования (т.е. без нагрева образца).

Проведённые расчёты показали, что в наших условиях (пробег атомов отдачи трития в титанате лития 0,0084 см, радиус сферы 0,1 см) не зависящая от температуры степень выделения трития из пэббла за счёт энергии отдачи составляет 6,3%. Поскольку некоторые атомы отдачи, вырвавшиеся из одной сферы, оказываются внедрёнными в смежные гранулы, где вынуждены уже мигрировать по обычным законам диффузии, то эффективная степень выделения трития из слоя пэбблов за счёт эффекта отдачи снижается до 4%. Поток атомов отдачи трития из бридера за счёт отдачи при термоциклировании материала можно рассматривать как фоновое газовыделение и с учётом ошибок данного эксперимента им в первом приближении можно пренебречь.

#### Учёт одновременной потери трития за счёт энергии отдачи и за счёт ухода трития в НТО

Учтём теперь потерю трития при его переходе в НТО [1].

Тритий теряется не только за счёт эффекта отдачи. Он способен вступать в радиационно-химическую реакцию с кислородом, содержащимся в молекуле соли, с кислородом воды, или обмениваться с протием, входящим в состав иона ОН или в обычную воду (Вода и гидроксиды всегда присутствуют в солях). Введём константу скорости химических процессов, удаляющих тритий в НТО,  $k_x$  [ $c^{-1}$ ].

Тогда дифференциальные уравнения, описывающее изменение во времени концентрационного профиля трития в объёме сферы, с учётом ухода трития за счёт эффекта отдачи и за счёт образования НТО, можно записать в виде:

$$\frac{dC_T(r,t)}{dt} = \Lambda C_{Li}(r,t) - \Lambda q(r)C_{Li}(r,t) - \lambda C_T(r,t) - k_x C_T(r,t) \quad (12a)$$

или

$$\frac{dC_T(r,t)}{dt} = \Lambda(1-q(r))C_{Li}(r,t) - (k_x + \lambda)C_T(r,t), \quad (12б)$$

или

$$\frac{dC_T(r,t)}{dt} = \Lambda_1 C_{Li}(r,t) - \Lambda_2 C_T(r,t), \quad (12в)$$

где  $\Lambda_1 = \Lambda(1-q(r))$ ,  $\Lambda_2 = k_x + \lambda$ .

Решения подобных дифференциальных уравнений в частных производных мы в дальнейшем будем использовать для описания кинетики дегаза-

ции сферы при наличии источника (непрерывная генерация трития) и стока (радиоактивный распада, захват дефектами, химическая реакция трития кислородом, изотопный обмен).

### References

- 1 Bekman I., Tazhibayeva I., Kuykabayeva A., Buntseva I. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov vygoraniya, generatsii i vydeleniya tritiya v usloviyakh reaktornogo oblucheniya // Vestnik KazNU. Seriya fizika – 2008. - №1 (25). – С. 109-117.
- 2 Tazhibayeva I.L., Kul'sartov T.V., Kenzhin Ye.A., Maksimkin O.P., Doronina T.A., Sil'nyagina N.S., Turubarova L.G., Tsay K.V., Zheltov D.A., Kashirskiy V.V., Chikhray Ye.V., Shestakov V.P., Kuykabayeva A.A., Kavamura KH., Tsuchiya K. Struktura, sostav i svoystva obluchennoy v reaktore VVR-K litiyevoy keramiki Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> +5% mol. TiO<sub>2</sub> dlya tverdotel'nogo keramicheskogo blanketa termoyadernogo reaktora // VANT, S. Termoyadernyy sintez. – 2008. – Vyp.1. – S. 3-12.
- 3 Federici G., Raffray A., Billone M., Wu C., Cho S., Abdou M. An assessment of models for tritium release from ceramic breeders for blanket analysis applications // J. Nucl. Mater. – 1994. - Vol. 212-215. – P. 1003-1009.