

С. К. КУНАКОВ, Н. Б. КЕНЖЕБАЕВ

(Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан)

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ТРИТИЯ В БЕРИЛЛИЕВОМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Аннотация. В настоящей работе представлен программный код на основе которого проанализирована кинетика накопления изотопа He^4 и трития Be^9 образце в зависимости от времени. Программа написана на языке C++ и для расчетов был применен метод Монте-Карло. С помощью этой программы была рассчитана концентрация гелия и трития в бериллиевых образцах в зависимости от спектра нейтронного потока в различных экспериментальных реакторах, таких как JMTR, JOYO, IPEN/MB. Проанализированы процессы накопления гелия и трития для каждого энергетического спектра нейтронов этих реакторов.

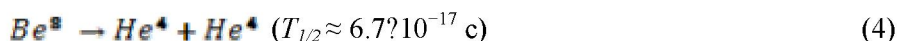
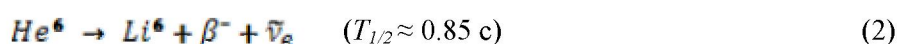
Ключевые слова: нейтронный поток, нейтронный отражатель, нейтронный спектр, метод Монте Карло

Тірек сөздер: нейтрондық ағын, нейтрондық шағылдырғыш, нейтрондық спектр, Монте Карло әдісі.

Keywords: neutron flux, neutron reflector, neutron spectrum, Monte Carlo method.

Введение. Из-за большого сечения рассеяния и низкого сечения поглощения бериллиевый материал широко применяется в реакторах в качестве нейтронного отражателя. Интенсивное облучение нейтронным потоком бериллия приводит к потере ими рабочих характеристик и вероятности разрушения. Основными продуктами реакций идущей при взаимодействии быстрых нейтронов с бериллиевым материалом является гелий и тритий. Известно, что образующийся в результате ядерных реакций тритий и гелий существенно снижает работоспособность узлов и конструкций активных зон ядерных реакторов. В частности, такие явления, как охрупчивание, газовое распухание, согласно большинству гипотез, связаны с образованием, накоплением и поведением трития и гелия в материалах под облучением.

Теоритическая часть. Известно, что взаимодействия Be^9 с нейтронами в тепловой области идут реакции только упругого рассеяния и радиационного захвата. Образование гелия и трития в этой области не наблюдается. Взаимодействие с энергиями нейтронов более высоких энергий, выше 1МэВ, происходит другие неупругие процессы. Ниже приведены основные реакции, приводящее к образованию гелия и трития:



Можно увидеть, что основными продуктами этих реакций являются гелий и тритий. Реакции (1) и (3) имеют порог 0,71 и 2,7 МэВ соответственно. Из этих вышеперечисленных реакции можно увидеть, что тритий образуется из вторичного продукта, то есть из ядер Li^6 . А Li^6 очень интенсивно вступает в реакцию в области тепловых нейтронов. Сечение (5) реакций порядка 5000 барн в тепловой области, и он стремительно падает с увеличением энергий. Из этого можно сделать вывод, что для образования трития нужно, чтобы в бериллиевом материале при нейтронном облучении образовался Li^6 , а для этого необходимо, чтобы в нейтронном потоке были и тепловые, и быстрые нейтроны.

Накопление трития и гелия в бериллиевом материале напрямую зависит от спектра нейтронного потока. Нейтронный спектр – это основная характеристика реактора и спектр бывает разным в зависимости от реактора. Чтобы понять кинетику образования гелия и трития, поставлена задача смоделировать накопления гелия и трития при разных нейтронных спектрах.

С этой целью была разработана и отлажена программа, которая помогает считать концентрацию гелия и трития в зависимости от времени. В качестве нейтронного спектра были взяты три спектра экспериментальных реакторов, таких как JMTR, JOYO и IPEN/MB-01. JMTR и JOYO – японский реактор, а IPEN/MB-01 – это бразильский реактор.

Алгоритм программы. Для моделирования ядерных процессов был применен метод Монте-Карло. Программа была записана на языке C++. Особенность этой программы заключается в том, что она может считать изменение концентраций элементов со временем при любом энергетическом спектре нейтронов.

Все сечения этих реакций были взяты из Библиотеки Оцененных Ядерных Данных, ENDF/B и JENDL.

Реакций нейтронов с бериллиевым материалом, которые учитываются в программе, это реакции:

1. упругого рассеяния;
2. неупругого рассеяния;
3. радиационный захват;
4. $n + Be^9 \rightarrow Li^6 + He^4$;
5. $n + Be^9 \rightarrow 2n + He^4 + He^4$;
6. $n + Li^6 \rightarrow H^2 + He^4$.

Бериллиевой металл облучается со всех сторон. Геометрия объекта показана на рисунке 1.

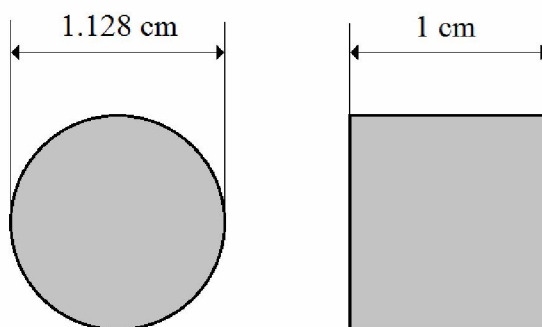


Рисунок 1 – Параметры геометрий Be^9 материала, использованного в моделировании накоплений трития и гелия.

Начальная координата нейтронов выбирается случайным образом на одной из поверхности цилиндра либо сбоку, либо спереди, либо сзади. Начальная энергия нейтрона тоже выбирается случайно из энергетического спектра реактора и считается, что в начальный момент направление нейтрона перпендикулярно к поверхности. Далее по этой формуле:

$$l = \frac{1}{\Sigma_t} \ln \gamma \quad (6)$$

вычисляется длина свободного пробега. Здесь γ – случайное число в интервале $[0,1)$, Σ_t – полное макроскопическое сечение. Затем случайно выбирается тип столкновения с ядром в зависимости от сечения взаимодействия. Если произошло рассеяние, то энергия и угол после рассеяния нейтрона рассчитывается по этой формуле:

$$E' = E \frac{A^2 + 2A\mu_{c.m.} + 1}{(A + 1)^2} \quad (7)$$

$$\mu_{lab} = \frac{1 + A\mu_{c.m.}}{\sqrt{A^2 + 2A\mu_{c.m.} + 1}} \quad (8)$$

E' – кинетическая энергия нейтрона после рассеяния; E – энергия нейтрона до столкновения; A – отношение массы ядра к массе нейтрона; $\mu_{c.m.}$ – косинус угла рассеяния в системе центра инерций; μ_{lab} – косинус угла рассеяния в лабораторной системе.

Значения косинуса угла рассеяния в системе центра инерций $\mu_{c.m.}$ были взяты из библиотеки JENDL-4.0. История нейтрона продолжается до тех пор, пока не произойдет поглощение или энергия нейтрона не становится меньше 10^{-4} эВ. Если произошла реакция с выходом гелия или трития то программа зафиксирует его число. Далее разыгрывается новая история нейтрона с начальным временем. В каждой 100 сек времени начинается новая поколение нейтронов. В каждом цикле в программе разыгрывается 5000 нейтронов. Программа каждые 100 сек считает концентрацию He^4 , H^3 и Li^6 по этой формуле:

$$\Delta n = \frac{N_{\square} f}{N_{tot} V} \Delta t \quad (9)$$

Здесь Δn – изменение концентраций элемента за время Δt , f – поток нейтронов, V – объем цилиндра, N_{tot} – полное число нейтронов, разыгрываемое за время Δt , N число элементов, образовавшегося в материале при разыгрывании N_{tot} нейтронов за время Δt .

Результаты моделирования. С помощью разработанной программы была рассчитана концентрация гелия и трития в Be^9 материале зависимости от времени для трех спектров реакторов JMTR, JOYO и IPEN/MB. На рисунке 3 изображены графики зависимости концентраций трития и гелия от времени для трех нейтронных спектров.

На рисунке 2 приведены спектры трех реакторов. Как мы видим, все они имеют разные спектры.

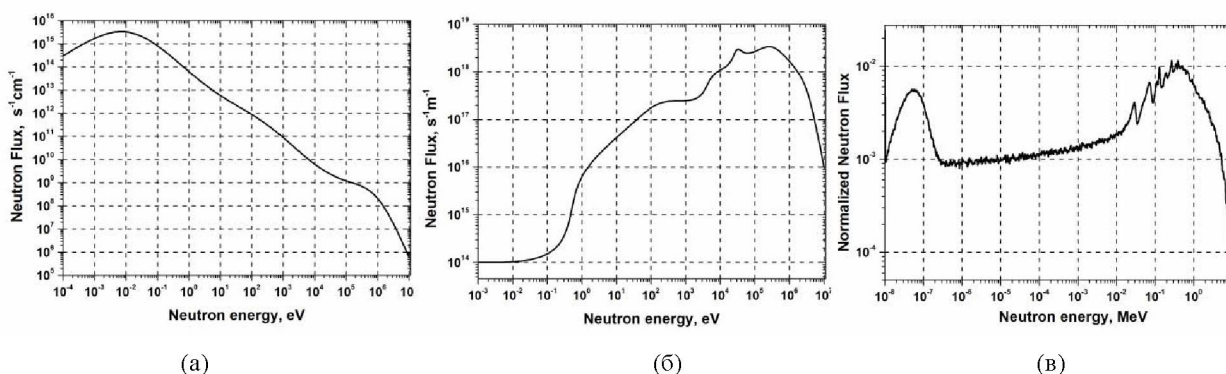


Рисунок 2 – Нейтронный спектры реакторов IPEN/MB-01 (а), JOYO (б) и JMTR (в).

Спектр реактора JMTR была рассчитана с помощью программы MCNP5 и в этом спектре присутствуют и тепловые, и быстрые нейтроны. На рисунке 3 показана концентрация накопления трития (а) и гелия (б) в бериллиевом материале в зависимости от времени с нейтронными спектрами реакторов JMTR, IPEN/MB и JOYO.

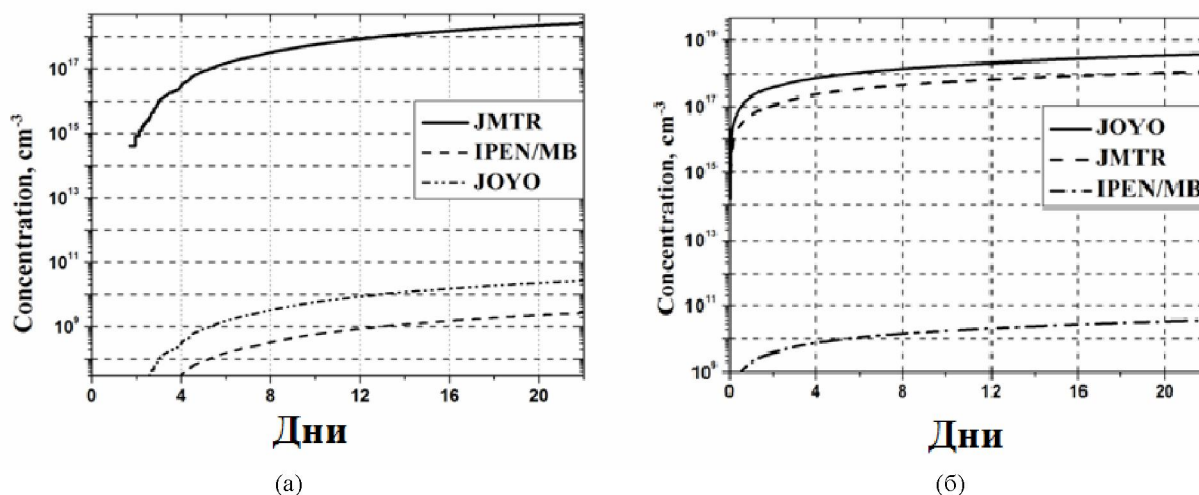


Рисунок 3 – Концентрация накопления трития (а) и гелия (б) в бериллиевом материале в зависимости от времени

Результаты показывают, что накопление трития в Be^9 материале при облучении нейтронами спектра реактора JMTR гораздо больше, чем накопление при остальных двух реакторах.

Заключение. Необходимо отметить, что интенсивное накопление трития бериллиевого отражателя при длительных режимах облучения возможно только при условии одновременного воздействия на образец тепловой и высокоэнергетической части нейтронного спектра ядерно-энергетической установки. Этот факт подтверждается нашими расчетами для экспериментального реактора JMTR и тестовых реакторов JOYO и IPEN/MB, см. рисунок 3.

Среда моделирования в данном случае имеет определяющее значение и исследования различных конструкционных материалов ядерно-энергетических объектов приобретает ясный смысл при определении сформировавшегося в данной операционной зоне реактора энергетического спектра нейтронов. Интенсивность накопления He^4 , напротив, определяется только высокоэнергетической частью нейтронного спектра, что видно из рисунка-3.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Fernando Prat Goncalves Martins, Rogerio Jerez. Measurements of the neutron spectrum energy in the IPEN/MB-01 reactor core // Brazilian Journal of Physics. – 2009. – № 39. – С. 41.
- 2 Forrest B. Brown. Fundamentals of Monte Carlo Particle Transport. – Los Alamos National Laboratory, 2004. – 5 с.
- 3 Sears V.F. Neutron scattering length and cross sections // Canada Neutron News. – 1992. – № 3. – P. 26-29.
- 4 Франк-Каменицкий А.Д. Моделирование траекторий нейтронов при расчете реакторов методом Монте-Карло. – 1978. – 25 с.

REFERENCES

- 1 Fernando Prat Goncalves Martins, Rogerio Jerez. Measurements of the neutron spectrum energy in the IPEN/MB-01 reactor core. Brazilian Journal of Physics. 2009. № 39. С. 41.
- 2 Forrest B. Brown. Fundamentals of Monte Carlo Particle Transport. Los Alamos National Laboratory, 2004. 5 с.
- 3 Sears V.F. Neutron scattering length and cross sections. Canada Neutron News. 1992. № 3. P. 26-29.
- 4 Frank-Kamenetskiy A.D. Modelirovaniye trayektoriy neytronov pri raschete reaktorov metodom Monte-Karlo, 1978. 25 s.

Резюме

С. К. Қунақов, Н. Б. Кенжебаев

(Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан)

ТРИТИЙДІҢ БЕРИЛЛИЙ МЕТАЛЫН НЕЙТРОНДАРМЕН ӨРЕКЕТТЕСТІРГЕНДЕ ТҮЗІЛУІН ҮЛГІЛЕУ

Тритийдің бериллий металында нейтрондармен ұзақ мерзімге әрекеттестірудің нәтижесінде қарқынды түзілуі тек реактордың нейтрондық спектрының төмен энергиялы және жоғарғы энергиялы нейтрондармен бірдей уақытта әсер етуімен пайда болады. Мұндай нәтиже JMTR, JOYO және IPEN/MB реакторларын үлгілеу нәтижесінде алынды.

Тритийдің түзілуін үлгілеу ядролық-энергетикалық құрылғылардың белсенді зонасындағы нейтрондық спектрды анықтап алу өте маңызды рөл атқарады. He^4 ядросының бериллий металында түзілуінің басты себепкері ол – нейтрондық спектрдің жоғары энергиялы аймағының болуымен байланысты.

Тірек сөздер: нейтрондық ағын, нейтрондық шағылдырғыш, нейтрондық спектр, Монте Карло әдісі.

Summary

S. Kunakov, N. Kenzhebayev

(Al-Farabi kazakh national university, Almaty, Kazakhstan)

THE MODELLING ACCUMULATION OF TRITIUM IN BERYLLIUM SLAB UNDER NEUTRON IRRADIATION

It should be noted that the intense accumulation of tritium in the beryllium reflector at long exposure modes is possible only under conditions of simultaneous exposure to heat the sample and the high-energy neutron spectrum of the nuclear power plant. This fact is confirmed by our calculations for the experimental reactors JMTR, JOYO and IPEN/MB.

Simulation environment in this case is critical and research various structural materials of nuclear power facilities becomes clear meaning when determining formed in the operating zone of the reactor neutron energy spectrum. The intensity of accumulation of He^4 is determined only by the high-contrast part of the neutron spectrum.

Keywords: neutron flux, neutron reflector, neutron spectrum, Monte Carlo method.