

УДК: 621.039.61:58.34.03

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ LiD-КОНВЕРТОРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

Кимолаев Ж.Б., Алейников Ю.В., Попов Ю.А., Прозорова И.В.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе представлены результаты оценки эффективности литий-дейтериевого конвертора тепловых нейтронов в быстрые в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М (г.Курчатов). Оцененное значение коэффициента конверсии составило порядка 10^{-4} . Найденное значение имеет порядок полученных ранее значений этой величины [2-6]. Отличием от ранее проведенных экспериментов является применение литий-дейтериевого конвертора с естественным обогащением.

Выполнение работы проводится экспериментально-расчетным методом. На первом этапе проведены экспериментальные исследования по определению поля конверторных нейтронов при помощи активационного метода. На втором этапе проводятся работы по определению численного значения коэффициента конверсии методом Монте-Карло.

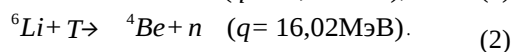
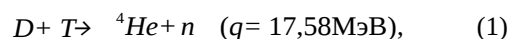
На данном этапе работы по определению числового значения коэффициента конверсии незакончено, но оценка эффективности конвертора показывает, что экспериментальное устройство с литий-дейтериевым конвертором в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М является доступным источником быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ.

ВВЕДЕНИЕ

Быстрые нейтроны (с энергией выше 10 МэВ) используются при экспериментальных исследованиях во многих направлениях фундаментальной и прикладной физики. К ним относятся изучение переноса нейтронов, измерение нейтронных сечений, определение состава и свойств радиационной защиты, активационных анализ и др. Потребность в быстрых нейтронах удовлетворяется в основном с помощью нейтронных генераторов, представляющих собой ускорители ионов дейтерия, направляемых на тритиевую мишень. В ядерных реакторах, служащих основным инструментом для проведения экспериментальных исследований, доля нейтронов реакторного спектра с энергией более 14 МэВ не превышает 0,01 %. Поэтому возникает потребность в увеличении доли нейтронов с энергией более 14 МэВ в экспериментальных каналах реакторов.

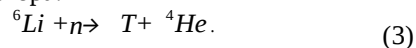
В данной работе рассмотрен один из принципов формирования источника быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ – при помощи двухступенчатой конверсии в специальных конверторах. Впервые на возможность конвертирования нейтронов при помощи конверторов из гидрида и дейтерида (LiD) лития было указано в работе [1], а затем более подробно она была изучена в работах [2-6]. Обзор работ по этому направлению приведен в работе [7].

Быстрые нейтроны образуются в результате экзотермических реакций синтеза ядер дейтерия D и лития ${}^6\text{Li}$ с быстрыми ядрами трития T:



Получение конверторных нейтронов происходит по реакциям (1), (2). Источником быстрых ядер три-

тия служит (n, α)-реакция на ядрах лития ${}^6\text{Li}$ материала LiD-конвертора:



При этом, энергия вылетающих ядер трития равна $\sim 2,74$ МэВ – достаточна для преодоления кулоновского барьера взаимодействия с ядрами дейтерия и лития. Сечение реакции (3) на тепловых нейтронах $\sigma^{th} = 950 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ [8].

Возможности применения LiD-конвертора определяются его эффективностью, которая согласно работы [7] характеризуется отношением скорости генерации $R_{ген}$ быстрых нейтронов в конверторе к скорости поглощения R_a тепловых нейтронов:

$$K^{LiD} = R_{ген} / R_a. \quad (4)$$

Максимальное значение коэффициента конверсии достигнуто в работе [6], где представлены результаты измерения эффективности литий-дейтериевого конвертера с обогащением по литию ${}^6\text{Li}$ в экспериментальном канале реактора ИВВ-2М. В этой работе значение коэффициента конверсии $K = 3,47 \cdot 10^{-4}$, что в 1,7 раза превышает ранее измеренное значение этой величины работы [2] и примерно на 20% выше максимальной расчетной оценки K для ${}^6\text{LiD}$ -конвертера, исследуемого в работах [3, 4].

В связи с этим, в ИАЭ были проведены эксперименты с твердотельным LiD-конвертором в экспериментальном физическом канале (ФКЭ) реактора ИВГ.1М (г. Курчатов). Реактор ИВГ.1М – исследовательский водо-водяной гетерогенный корпусной ядерный реактор на тепловых нейтронах с легководным замедлителем и теплоносителем и бериллиевым отражателем нейтронов [например, 9].

**ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ**

АИ быстрых нейтронов были установлены снаружи ампульного устройства. В качестве АИ использованы индикаторы в виде фольги из элементов с естественным изотопным составом: из циркония и никеля (эксперименты №1, №2 и №3) и циркония (№4). АИ размещались в двух кассетах: измерительной – К1 и фоновой – К2. Фоновая кассета К2 была установлена с целью определения потока реакторных нейтронов. Кассета К1 была размещена на уровне центра активной зоны реактора. Фоновая кассета была размещена на расстоянии 100 мм выше центральной части кассеты К1 (рисунок 1).

Перед облучением в реакторе индикаторы взвешивались, определялась их толщина. Основные физические характеристики индикаторов, установленных в кассетах К1 и К2 приведены в таблице 2.

Измерения активностей продуктов реакции (5) – (7) проводились с использованием спектрометрического комплекса «Canberra InSpector» с полупроводниковым детектором из особо чистого германия. Условия гамма-спектрометрических измерений выбирались в зависимости от активности индикаторов

и фоновых условий. Измерения активности АИ проводились в низкофоновой защите после выдержки 20 – 50 часов с момента окончания облучения. Время экспозиции выбиралось в зависимости от заданной статистической погрешности при определении площади пика полного поглощения, и составило от 26000 до 30600 с. Расстояние от АИ до крышки полупроводникового детектора составило для всех измерений 50 мм. Перед измерением активности АИ была выполнена калибровка спектрометра по энергии гамма-квантов диапазоне от 5 кэВ до 2 МэВ и определена эффективность регистрации гамма-квантов с энергией $E = 909,2$ кэВ.

В ходе выполнения физических исследований по определению поля конвертерных нейтронов получены экспериментальные значения удельной активности в АИ A , приведенные к моменту окончания облучения и нормированные на единицу массы индикатора, соответствующие им значения скорости реакции Q и плотности потока нейтронов $\Phi(E_{эфф})$ с энергией $E > E_{эфф}$. Результаты исследований, приведенные к одинаковым условиям облучения, представлены в таблице 3.

Таблица 2. Основные физические характеристики АИ

Состав АИ	Толщина, г/см ²	Масса индикатора, мг							
		Эксперимент №1		Эксперимент №2		Эксперимент №3		Эксперимент №4	
		К1	К2	К1	К2	К1	К2	К1	К2
Цирконий	0,0667	0,131	0,112	0,065	0,064	0,042	–	0,182	0,195
Никель	0,167	0,131	–	0,131	0,131	0,131	–	–	–

Таблица 3. Экспериментальные значения удельной активности A активационных индикаторов на момент облучения, скорость реакции Q и плотность потока нейтронов $\Phi(E_{эфф})$ с энергией $E > E_{эфф}$ в измерительной (К1) и фоновой кассетах (К2)

Реакция	$A, 10^5$ Бк/г		$Q, 10^{-14}$ с ⁻¹		$\Phi, 10^{10}$ н/(см ² ·с)	
	К1	К2	К1	К2	К1	К2
Эксперимент №1						
⁹⁰ Zr (n, 2n) ⁸⁹ Zr	0,990	0,878	0,224	0,198	0,286	0,248
⁵⁸ Ni (n, 2n) ⁵⁷ Ni	0,145	-	0,007	-	0,248	-
⁵⁸ Ni (n, p) ⁵⁸ Co	49,0	-	115,2	-	343,8	-
Эксперимент №2						
⁹⁰ Zr (n, 2n) ⁸⁹ Zr	7,182	7,063	0,157	0,155	0,199	0,195
⁵⁸ Ni (n, 2n) ⁵⁷ Ni	1,251	1,044	0,006	0,005	0,207	0,177
⁵⁸ Ni (n, p) ⁵⁸ Co	506,4	480,7	115,3	109,3	343,8	327,1
Эксперимент №3						
⁹⁰ Zr (n, 2n) ⁸⁹ Zr	18,537	-	0,155	-	0,197	-
⁵⁸ Ni (n, 2n) ⁵⁷ Ni	2,972	-	0,006	-	0,186	-
⁵⁸ Ni (n, p) ⁵⁸ Co	1325,5	-	114,9	-	343,8	-
Эксперимент №4						
⁹⁰ Zr(n, 2n) ⁸⁹ Zr	0,804	0,669	0,179	0,149	0,227	0,189

Данные об активации никеля в реакции (6) не были получены из-за высокого уровня гамма-излучения при измерениях и поэтому не представлены в таблице.

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

Оцененное значение коэффициента согласно работ [3, 6] конверсии можно получить по формуле

$$K_{оц} \approx \Phi_{быст} / \Phi_{тепл}, \quad (8)$$

где $\Phi_{быст}$ – плотность потока конверторных нейтронов, н/(см²·с);

$\Phi_{тепл}$ – плотность потока тепловых нейтронов в месте расположения конвертора, н/(см²·с);

Полагаем, что на процесс активации АИ быстрыми нейтронами отдельно влияют реакторное и конверторное нейтронные излучения. Из таблицы 3 видно, что на процесс активации в месте расположения фоновой кассеты К2 кроме реакторных нейтронов влияют и конверторные нейтроны (экспери-

мент №1). Тогда плотность потока конверторных нейтронов равна разности плотностей потока быстрых нейтронов, полученной в эксперименте №1, и быстрых реакторных нейтронов, полученной в эксперименте №2. Т.е. плотность потока конверторных нейтронов составила $\sim 0,9 \cdot 10^9$ н/(см² с).

Плотность потока тепловых нейтронов в месте расположения конвертора была рассчитана методом Монте-Карло [13] и составила $\sim 5,2 \cdot 10^{12}$ н/(см² с). Тогда по формуле (8) получим оцененное значение коэффициента конверсии, которое составляет $\sim 1,7 \cdot 10^{-4}$. Найденное оцененное значение коэффициента конверсии имеет порядок найденных ранее [2-6] измеренных значений величины коэффициента конверсии.

Для численного определения нахождения коэффициента конверсии по формуле (4) необходимо найти величины скорости поглощения тепловых нейтронов в конверторе и скорости генерации конверторных нейтронов. Скорость поглощения тепловых нейтронов в конверторе R_a , с⁻¹, определяется по формуле

$$R_a = \int \Sigma_a(E) \varphi(E) dE, \quad (9)$$

где E – энергия нейтронов, Дж; $\Sigma_a(E)$ – макроскопическое сечение поглощения нейтронов с энергией E в материале конверторе, см⁻¹; $\varphi(E)$ – плотность потока нейтронов с энергией E , н/(см² с).

Скорость генерации связана со скоростью активации АИ конверторными нейтронами следующим образом

$$R_{ген} = f^{-1} \cdot Q^{LiD}; \quad (10)$$

где f – характерная функция, связывающая скорость реакции активации со скоростью генерации конверторных нейтронов.

Полагаем, что на процесс активации АИ быстрыми нейтронами отдельно влияют реакторное и конверторное нейтронные излучения. Поэтому скорость активации Q , с⁻¹, АИ, полученную в эксперименте №1, можно представить в виде суммы

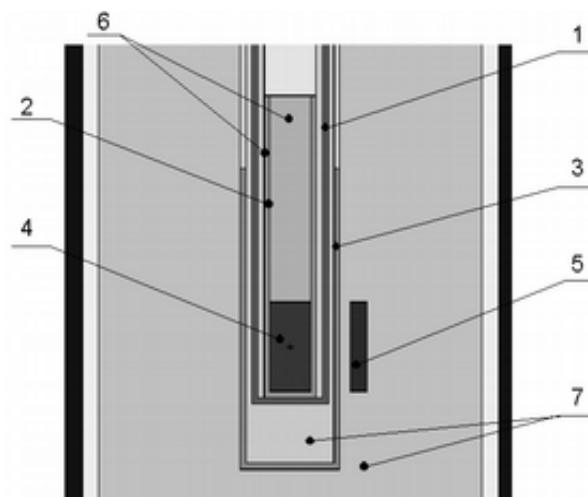
$$Q = Q^p + Q^{LiD}, \quad (11)$$

где Q^p – скорость активации АИ реакторными нейтронами, с⁻¹, полученная в эксперименте №2; Q^{LiD} – скорость активации АИ конверторными нейтронами, с⁻¹;

Откуда скорость активации АИ конверторными нейтронами можно определяется как

$$Q^{LiD} = Q - Q^p. \quad (12)$$

Для решения задачи нахождения функции g была создана модель, имитирующая источник быстрых нейтронов (1), (2). Характеристики модели были следующие: материал генерирующего слоя – дейтерид лития, выход нейтронов Φ , с⁻¹, равный скорости генерации $R_{ген}$ быстрых нейтронов в конверторе. Модель источника изображена на рисунке 2. Спектр рождающихся нейтронов в результате реакций (1), (2) взят из работ [6, 12].



1 – ампульное устройство; 2 – циркониевый «стаканчик»; 3 – чехол охлаждения; 4 – источник конверторных нейтронов; 5 – активационный индикатор; 6 – пространство, заполненное дейтерием; 7 – пространство, заполненное азотом

Рисунок 2. Расчетная модель переноса конверторных нейтронов

При этом ставилась следующая задача: варьируя значениями выхода нейтронов определить скорость активации (5) – (7) АИ в месте его расположения в следующем виде:

$$Q_{AI}^{LiD} = g(\Phi) \cdot \Phi; \quad (13)$$

Построив зависимость вида (13), определяем функцию $g(\Phi)$ аппроксимацией полученных значений g . Из этой зависимости можно определить выход нейтронов, т.е. скорость генерации нейтронов в LiD-конверторе.

При создании модели были сделаны следующие допущения. Распределение мест рождения нейтронов в LiD-источнике описывается законом выхода ядер трития в конверторе. Выходы нейтронов, рождающихся по реакциям (1) и (2) равномерно распределены. Влияние реакторного излучения на материалы конструкций экспериментального устройства не учитывается.

Данный метод расчета применим в данном случае, так как можно отдельно выделить влияние конверторного и реакторного нейтронного излучения на АИ.

Моделирование переноса нейтронов от источника к АИ осуществляется по трехмерной программе MCNP5 с нейтронными константами ENDF/B-VI методом Монте-Карло с учетом реального окружения источника. Расчетная конфигурация модели LiD-источника быстрых нейтронов для программы MCNP5 максимально соответствует реальной конструкции LiD-конвертора в ФКЭ реактора. Модель LiD-источника передает все основные особенности реального LiD-конвертора.

Поставленная задача является незаконченной и на данный момент ведутся работы по реализации заданной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения работы проведены физические и теоретические исследования для оценки эффективности LiD-конвертора для получения быстрых нейтронов в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М.

Физические исследования выполнялись с применением активационных индикаторов, выполнена количественная оценка плотности потока конвертерных нейтронов.

В процессе определения эффективности конвертора была разработана расчетная конфигурация модели переноса нейтронного излучения от LiD-источника к АИ для определения скорости генерации быстрых нейтронов с энергией 14,1 МэВ.

По результатам физических исследований были сделаны следующие выводы:

1. Оценка коэффициента конверсии составила $\sim 10^{-4}$, что хорошо согласуется с ранее найденными значениями коэффициента конверсии.

2. Использование LiD-конвертера в качестве источника быстрых нейтронов возможно и подтверждено настоящими исследованиями. Плотность потока конвертерных нейтронов составила $0,9 \times 10^9$ н/(см² · с) при этом суммарная плотность потока быстрых нейтронов с энергией свыше 12,5 МэВ – $0,29 \times 10^{10}$ н/(см² · с) при уровне мощности реактора 6,0 МВт.

3. Значения скорости реакции, определённые для АИ из циркония и никеля в экспериментах №2 и №3 в отсутствие LiD-конвертера совпадают в пределах погрешности, что говорит о сходимости результатов измерения плотности потока быстрых нейтронов.

4. Чувствительность активационного метода измерения плотности потока быстрых нейтронов с энергией свыше 12,5 МэВ с помощью индикаторов из циркония достаточна для детектирования быстрых нейтронов в экспериментальном канале реакторе ИВГ.1М при выбранном режиме облучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Almquist, E. Fast neutron from T+D and T+Li reactions / E. Almquist // Can. J. Res. – 1950. – Vol. 28A. – P. 433.
2. Design of an In-Core Fast Neutron Generator / B. Napier [et al.] // Nucl. Instr. Meth. – 1976. – Vol. 138. – P. 463.
3. Miller, W. Thermal Neutron Driven 14.1 MeV Neutron Generators / W. Miller, W. Law, R. Brugger // Nucl. Instrum. Meth. – 1983. – Vol. 216. – P. 219.
4. Perry, R. T. A 14 MeV Neutron Source / R. T. Perry, T.A. Parish, W. B. Wilson // Fusion Technology. – 1985. – Vol. 8, № 1, Part 2B. – P. 1454.
5. Конвертирование нейтронов реакторного спектра в нейтроны с энергией выше 10 МэВ / М. И. Рождественский [и др.] // Труды конференции по нейтронной физике. – Киев. – 1987.
6. Измерение эффективности ⁶LiD-конвертера тепловых нейтронов в нейтроны с энергией 14 МэВ в экспериментальном канале реактора ИВВ-2М / Ю. Н. Зуев [и др.] // Атомная энергия – 2002. – Т. 92, вып. 3. – С. 226 – 232.
7. Рождественский, М. Конвертирование тепловых нейтронов в быстрые с энергией 14,1 МэВ / М. Рождественский, Л. Точный, Л. Чупова. // Атомная техника за рубежом. – 1986. – № 1. – С. 22–27.
8. Сечения пороговых реакций, вызываемых нейтронами. Справочник. / В. М. Бычков [и др.] – М. : Энергоатомиздат, 1982.
9. Исследовательские реакторы ИГР, ИВГ.1М, РА. Опыт эксплуатации и экспериментальные исследования. Часть . Реактор ИВГ.1 (ИВГ.1М). Аналитический обзор // ИАЭ НЯЦ РК, 1994. – 97 с.
10. Ломакин, С. С. Радиометрия нейтронов активационным методом / С. С. Ломакин, В. И. Петров, П. С. Самойлов. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 144 с.
11. Овечкин, В. В. Уточнение сечений реакций быстрых нейтронов на ⁹⁰Zr и ⁹¹Zr с образованием нуклидов в изомерном состоянии / В. В. Овечкин, А. Е. Хохлов // Атомная энергия – 1986. – Т. 60, вып. 2. – С. 143 – 144.
12. Таблицы физических величин. Справочник / И.К. Кикоин. – М. : Атомиздат, 1976. – 1008 с.
13. RSIC Computer Code Collection, MCNP – 4A. Monte – Carlo N – Particle Transport Code Sistem // Oac Ridje National Laboratory, 1997.

ЖЫЛДАМ НЕЙТРОНДАРДЫ АЛУ ҮШІН LiD-КОНВЕРТОРЫНЫҢ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ

Кимолаев Ж.Б., Алейников Ю.В., Попов Ю.А., Прозорова И.В.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатова, Қазақстан

Бұл жұмыста ИВГ.1М реакторында (Курчатова) эксперименталды арнасында, жылдам нейтрондарды жылулық нейтронға литий-дейтерийлік конвертор тиімділігін бағалаудың нәтижелері көрсетілген. Конверсия коэффициентінің бағаланған мәні 10^{-4} -не жуық болды. Бағаланған мән жуықтығы бұрын табылған [2-6] өлшенген мән жуықтығына тең. Бұрын жасаған эксперименттерден ерекшелігі табиғи байытылған литий-дейтерийлік конверторды пайдалану болып табылады.

Орындалған жұмыс эксперименталды-есептеу әдісімен жүргізілді. Жұмыстың бірінші бөлімінде жылдам конверторлық нейтрондардың өрісін активациялық әдіс көмегімен анықтау бойынша эксперименталды зерттеулер жүргізілді. Екінші бөлімде Монте-Карло әдістерімен конвертордың тиімділігін анықтау бойынша жұмыстар жүргізілуде. Бұл бөлімде конверсия коэффициентінің сандық мәнін анықтау бойынша жұмыстар

аяқталмаған, бірақ конверсия коэффициентінің бағаланған мәні ИВГ.1М реакторының эксперименталды арнасындағы LiD-конверторы бар эксперименталдық қондырғысы 14 МэВ энергиясы бар жылдам нейтрондардың жеңіл алынатын қайнар көзі болып табылатынын көрсетеді.

EFFICIENCY ESTIMATION OF LiD-CONVERTER FOR FAST NEUTRONS OBTAINING

Z.B. Kimolaev, U.V. Aleinikov, U.A. Popov, I.V. Prozorova

Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Estimation results of lithium-deuterium converter efficiency of thermal neutrons to fast in experimental IVG 1M reactor (Kurchatov) are presented in this work. Estimated value of conversion factor is equal to 10^{-4} . Obtained value has a degree of values of this value [2-6] obtained before. The difference from the experiments conducted before is in lithium-deuterium converter with natural enrichment use.

Work fulfillment is conducted by experimental-calculated method. At the first stage the experimental research on determination of converter neutrons field with the help activation method was conducted. At the second – works on determination of numerical value of conversion factor by the method of Monte-Karlo are conducted.

At this work stage the works on determination of numerical value of conversion factor are not finished, but converter efficiency estimation shows that the experimental device with lithium-deuterium converter in experimental channel of IVG 1M reactor is available source of fast neutrons with power 14 МэВ.