

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 539.16.04;539.169;589.166

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-235-242>

Поступила в редакцию 28.11.2019

Received 28.11.2019

И. А. Едчик, Т. Н. Корбут, А. В. Кузьмин, С. Э. Мазаник, В. П. Тогушов, М. О. Кравченко*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМНОЖЕНИЯ НЕЙТРОНОВ
ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ «ЯЛИНА-ТЕПЛОВАЯ»**

Аннотация. Для изучения кинетики подкритических систем и определения оптимальных условий трансмутации долгоживущих радиоактивных продуктов деления в спектре ADS-систем (Accelerator Driven Subcritical System) в Объединенном институте энергетических и ядерных исследований – Сосны создана исследовательская ядерная установка (ИЯУ) «Ялина», включающая генератор нейтронов и две подкритические сборки: «Ялина-Тепловая» с тепловым спектром нейтронов и «Ялина-Бустер» – с быстрым. Представлены исследования по изучению реактивности подкритической сборки «Ялина-Тепловая». Для этого были проведены измерения эффективного коэффициента размножения нейтронов ($k_{эфф}$) тремя независимыми методами: обратного умножения, вероятностным и импульсным. Исследование выполнялось для топливной загрузки из 285 твэлов ЭК-10. Для метода обратного умножения измеренный коэффициент умножения составил $M = 22,3 \pm 0,6$, что соответствует эффективному коэффициенту размножения нейтронов $k_{эфф} = 0,9551 \pm 0,0016$. Измерения по вероятностному методу, или методу Фейнман-альфа, основанному на измерении флуктуации уровня нейтронной плотности в системе, дали значение $k_{эфф} = 0,9597 \pm 0,0003$. При изучении поведения нейтронов после введения нейтронного импульса в подкритическую среду (импульсный метод) была измерена постоянная спада мгновенных нейтронов $\alpha = -670 \pm 0,7$ 1/с, которая соответствует $k_{эфф} = 0,9560 \pm 0,0001$. В результате проведенных исследований получено среднее значение $k_{эфф}$ подкритической сборки «Ялина-Тепловая», которое составило $k_{эфф} = 0,9569 \pm 0,0018$. Рассмотренные методы могут применяться для мониторинга уровня подкритичности ADS-систем и исследовательских ядерных установок.

Ключевые слова: подкритическая сборка, генератор нейтронов, метод обратного умножения, вероятностный метод, метод Фейнман-альфа, импульсный метод, эффективный коэффициент размножения нейтронов

Для цитирования: Определение эффективного коэффициента размножения нейтронов подкритической сборки «Ялина-Тепловая» / И. А. Едчик [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №2. – С. 235–242. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-235-242>

**Ivan A. Edchik, Tamara N. Korbut, Andrey V. Kuzmin, Sergey E. Mazanik, Vladislav P. Togushov,
Maksim O. Kravchenko***Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic
of Belarus***EXPERIMENTAL METHODS FOR DETERMINING THE EFFECTIVE NEUTRON MULTIPLICATION
FACTOR OF THE “YALINA-THERMAL” SUBCRITICAL ASSEMBLY**

Abstract. To study the kinetics of subcritical systems and determine the optimal conditions for the transmutation of long-lived radioactive waste in the neutron spectrum of ADS-systems the “Yalina” research nuclear facility was created at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny (Minsk, Belarus). The main safety indicator of a subcritical system (active zone reactivity) was measured for a “Yalina-Thermal” assembly via three independent methods: inverse multiplication, probabilistic and impulse ones. For the inverse multiplication method, the neutron flux density was monitored during assembly loading. For a fuel load of 285 EK-10 rods the neutron multiplication was $M = 22.3 \pm 0.6$, and the effective neutron multiplication coefficient was $k_{eff} = 0.9551 \pm 0.0016$. The probabilistic method (Feynman-alpha method), based on measuring fluctuations in the neutron density level within a system with a fission chain reaction, gave the ratio of the variance to the average counting rate value $D/n = 1.779 \pm 0.005$, which corresponds to $k_{eff} = 0.9597 \pm 0.0003$. The pulse method is aimed at studying the neutron flux behavior of after the neutron pulse injection into the breeding system. Measurements were held with the same setup, used in the Feynman-alpha method. The measured decay constant of instantaneous neutrons is $\alpha = -670 \pm 0.7$ 1/s, which corresponds to $k_{eff} = 0.9560 \pm 0.0001$. The effective multiplication factor k_{eff} of the subcritical assembly “Yalina-Thermal”, obtained via three different independent methods, is around average value of $k_{eff} = 0.9569 \pm 0.0018$. The methods considered can be used for subcritical level monitoring for ADS-systems and research nuclear facilities.

Keywords: subcritical assembly, neutron generator, inverse multiplication method, probabilistic method, Feynman-alpha method, pulsed method, effective neutron multiplication factor

For citation: Edchik I. A., Korbut T. N., Kuzmin A. V., Mazanik S. E., Togushov V. P., Kravchenko M. O. Experimental methods for determining the effective neutron multiplication factor of the “Yalina-Thermal” subcritical assembly. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 235–242 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-235-242>

Введение. Наряду с преимуществами по сравнению с другими видами энергии ядерная энергетика обладает двумя существенными недостатками. Для компенсации выгорания ядерного топлива, отравления, шлакования и других эффектов в реакторах энергетических ядерных установок требуется избыточная первоначальная загрузка ядерного топлива, обеспечивающая запас реактивности, что вызывает принципиальную возможность возникновения аварийных ситуаций с неконтролируемым увеличением выделяемой реактором мощности. Загрузка водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР) составляет порядка 30–40 критических масс, реактора большой мощности канального (РБМК) – 60–70 критических масс. Второй проблемой является утилизация высокоактивных долгоживущих радиоактивных отходов (РАО), образующихся в энергетических реакторах за кампанию. В настоящее время концепция обращения с РАО ядерных держав заключается в складировании и последующем долговременном хранении в специальных помещениях либо в окончательном захоронении их в глубоких геологических формациях. Таким образом, в данных условиях актуальными становятся развитие и отработка методов контроля реактивности на ядерных установках (ЯУ), а также потребность в поддержании современного уровня знаний в ядерной отрасли и подготовка научных кадров в этой области.

Одним из путей решения указанных проблем было предложение использовать в качестве источника энергии подкритический реактор, процесс деления ядерного топлива в котором инициируется и управляется внешним источником нейтронов. Возникновение самоподдерживающейся цепной реакции деления в подкритическом реакторе невозможно [1]. Подкритический реактор предлагается также рассматривать как источник нейтронов для трансмутации, то есть для перевода долгоживущих радиоактивных осколков деления и минор-актинидов (МА) в короткоживущие либо стабильные изотопы [2].

Для изучения физики и в первую очередь кинетики подкритических систем, а также возможности трансмутации долгоживущих РАО в спектре нейтронного потока таких систем в Объединенном институте энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси была создана исследовательская ядерная установка «Яліна» (ИЯУ «Яліна»).

Целью настоящей работы явилось определение наиболее важного параметра активной зоны ИЯУ «Яліна» – эффективного коэффициента размножения нейтронов ($k_{\text{эфф}}$) – тремя независимыми методами: обратного умножения, вероятностным и импульсным, что необходимо для обоснования ядерной безопасности исследовательского комплекса.

Краткое описание ИЯУ «Яліна». ИЯУ «Яліна» включает генератор нейтронов НГ-12-1; две подкритические сборки: «Яліна-Тепловая» с тепловым спектром нейтронов и «Яліна-Бустер» с быстро-тепловым спектром нейтронов; измерительный комплекс; систему жизнеобеспечения и систему физической защиты. Генератор нейтронов НГ-12-1 представляет собой ускоритель ионов дейтерия с магнитной сепарацией ускоренного пучка и вращающейся титан-тритиевой или титан-дейтериевой мишенью. Тракт ускорения и транспортировки пучка – горизонтальный. Сепарация пучка и вращение мишени позволяет значительно увеличить срок службы мишени. Ионы дейтерия образуются в двухплазменном ионном источнике, формируются в пучок и ускоряются электрическим полем ускорительной трубки до энергии $E_d \sim 240$ кэВ. При использовании титан-дейтериевой мишени формируются нейтроны с энергией $E_n = 2,5$ МэВ, титан-тритиевой мишени – $E_n = 14,1$ МэВ. В экспериментах также используется изотопный источник на основе калифорния. Схема и общий вид сборки показан на рис. 1.

Активная зона подкритической сборки «Яліна-Тепловая» представляет собой параллелепипед $400 \times 400 \times 600$ мм, окруженный боковым отражателем из графита толщиной 400 мм. Положение активной зоны – горизонтальное. Активная зона набирается из полиэтиленовых кассет бесчехловой конструкции, содержащих тепловыделяющие элементы ЭК-10, расположенные по прямоугольной регулярной решетке шагом 20 мм. Кассета набирается из 12 малых блоков $80 \times 80 \times 48$ мм, изготовленных из блочного полиэтилена высокого давления плотностью $\gamma = 0,927$ г/см³.

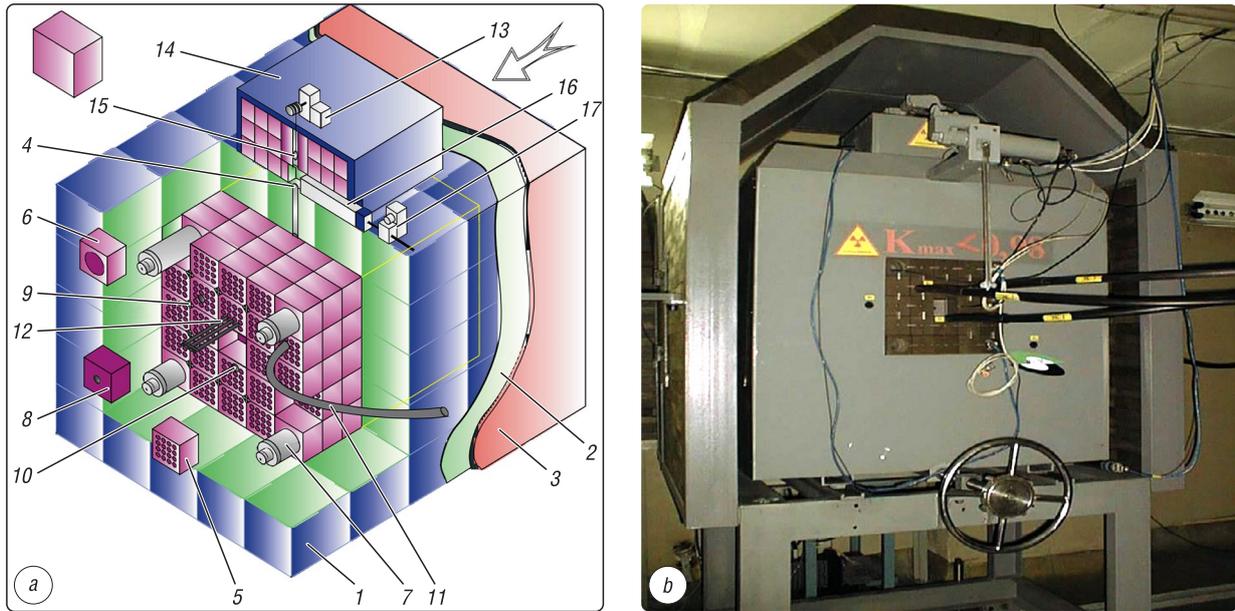


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (b) подкритической сборки «Ялина-Тепловая»: 1 – графитовый блок, 2 – кадмиевый экран, 3 – корпус, 4 – канал подвода нейтронного источника, 5 – полиэтиленовый блок, 6 – блок СУЗ, 7 – нейтронный детектор, 8 – свинцовая мишень, 9 – запирающий элемент, 10 – экспериментальный канал, 11 – кабельный трубопровод, 12 – компенсирующие органы управления, 13 – сервопривод нейтронного источника, 14 – контейнер нейтронного источника, 15 – нейтронный источник, 16 – заслонка, 17 – привод заслонки

Fig. 1. Scheme (a) and general view (b) of the sub-critical assembly “Yalina-Thermal”: 1 – graphite block, 2 – cadmium screen, 3 – case, 4 – neutron source supply channel, 5 – polyethylene block, 6 – CPS block, 7 – neutron detector, 8 – lead target, 9 – locking element, 10 – experimental channel, 11 – cable conduit, 12 – compensating controls, 13 – servo drive of a neutron source, 14 – container of a neutron source, 15 – neutron source, 16 – shutter, 17 – shutter drive

Шаг прямоугольной решетки, равный 20 мм, является оптимальным для размножающей среды с полиэтиленовым замедлителем и твэлами ЭК-10. Твэл ЭК-10 представляет с собой трубку из алюминия марки САВ (ГОСТ 4784–2019) длиной 590 мм, внешним диаметром 10 мм с толщиной стенки 1,5 мм, заполненную диоксидом урана 10%-ного обогащения по U-235. Длина топливной части твэла равна 500 мм, среднее содержание U-235 в твэле составляет ~7,76 г.

По центру активной зоны размещена свинцовая кассета, по размерам не отличающаяся от топливной кассеты с центральным каналом Ø11 мм.

По углам активной зоны установлены кассеты измерительных каналов, составленных из девяти малых блоков полиэтилена размером 80×80×63 мм со сквозным центральным каналом Ø55 мм для размещения датчиков контроля нейтронного потока.

Проведенные в трех кассетах активной зоны три твэльных канала с увеличенными до 24 мм диаметрами служат экспериментальными каналами. В четвертой кассете между вторым и третьим рядом твэлов выполнены три канала для размещения в них поглощающих стержней с В₄С компенсирующего органа (КО).

Таким образом, активная зона подкритической сборки содержит 20 топливных кассет, четыре кассеты СУЗ (система управления и защиты), свинцовую мишень, три измерительных канала и КО. Картограмма незагруженной активной зоны показана на рис. 2. Реактивность сборки определялась тремя методами: обратного умножения, вероятностным и импульсным.

Метод обратного умножения. Известно, что умножение M нейтронов в подкритической системе связано с эффективным коэффициентом размножения нейтронов $k_{эфф}$ соотношением [3]

$$M = \frac{1}{1 - k_{эфф}} \Rightarrow k_{эфф} = \frac{M - 1}{M}, \tag{1}$$

где $M = \frac{n}{n_0}$ равно отношению скорости счета n детектора, соответствующей загрузке m , к скорости счета n_0 детектора в «пустой», незагруженной ($m = 0$), сборке.

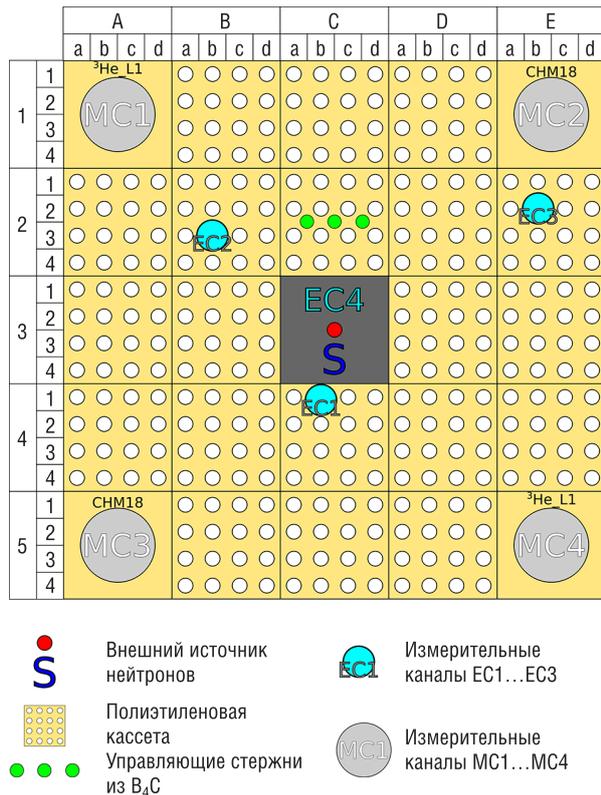


Рис. 2. Картограмма начального состояния активной зоны подкритической сборки «Ялина-Тепловая»

Fig. 2. “Yalina-Thermal” active zone initial state layout

янная спада мгновенных нейтронов, τ – длительность счетных интервалов, ε – эффективность регистрации нейтронов, e – экспонента.

Величина Y равна нулю для случайных пуассоновских флуктуаций. В справедливости этого утверждения авторы статьи убедились экспериментально. Для этого отношения дисперсии к среднему значению интенсивности нейтронного потока измеряли ³He-детектором 12NH25/1F в ячейке Dd-34 «пустой», незагруженной, сборки с установленным в центр активной зоны нейтронным источником ИНК-7-3 при $\tau = 60$ мс, $D / \bar{n} = 1,000 \pm 0,003$.

Функция Y связана с параметрами реактора, и в системе с цепной реакцией деления Y является мерой дополнительных флуктуаций, величина которых зависит от параметров системы, и в первую очередь от k_p .

Рассчитав некоторые параметры либо оценив их в независимом эксперименте, можно по измеренному отношению дисперсии к среднему определить эффективный коэффициент размножения и подкритичность сборки.

Упростим выражение (3). Оценка величины $(\overline{v_p^2} - \overline{v_p}) / (\overline{v_p})^2$ по данным [3] составляет 0,795.

В последнем сомножителе постоянная спада α мгновенных нейтронов для тепловой сборки при загрузке 284 твэла ЭК-10, измеренная в ячейке Dd-33, составляет 670 с^{-1} .

Использование этой величины при длительности счетного интервала $\tau = 60$ мс дает значение последнего сомножителя 0,975. Известно, что при меньших загрузках подкритичность сборки

Значения M и $k_{\text{эфф}}$ подкритической сборки при загрузке $m = 285$ твэлов ЭК-10, измеренные в каналах MC1...MC4
 M and k_{eff} values for the subcritical load of 285 Ek-10 fuel rods and measured in MC1 through MC4

M				$k_{\text{эфф}}$				
MC1	MC2	MC3	MC4	MC1	MC2	MC3	MC4	Среднее значение
23,30	21,41	21,15	23,48	0,9571	0,9533	0,9527	0,9574	0,9551 ± 0,0016

Контроль плотности потока нейтронов в процессе загрузки сборки осуществлялся с помощью счетчиков медленных нейтронов типа СНМ-18 и 12NH25/1F, находящихся в измерительных каналах MC1...MC4, при установленном в центр активной зоны Cf-252 нейтронном источнике.

Значение M и $k_{\text{эфф}}$ при загрузке $m = 285$ твэлов ЭК-10 представлены в таблице.

Вероятностный метод. Вероятностный метод, или метод Фейнман-альфа, основан на общем теоретическом рассмотрении флуктуаций уровня нейтронной плотности в системе с цепной реакцией деления. Для детектора, помещенного в реактор, отношение дисперсии D скорости счета n к среднему значению выражается следующим соотношением [3]:

$$\frac{D}{\bar{n}} = \frac{\overline{n^2} - \bar{n}^2}{\bar{n}} = 1 + Y, \quad (2)$$

где

$$Y = \varepsilon \frac{\overline{v_p^2} - \overline{v_p}}{(\overline{v_p})^2} \frac{k_p^2}{(1 - k_p)^2} \left(1 + \frac{1 - e^{-\alpha\tau}}{\alpha\tau} \right). \quad (3)$$

Здесь v_p – число мгновенных нейтронов в 1-м акте деления, k_p – коэффициент размножения на мгновенных нейтронах, α – постоянная спада мгновенных нейтронов, τ – длительность счетных интервалов, ε – эффективность регистрации нейтронов, e – экспонента.

увеличивается, абсолютное значение постоянной спада α растет, поправочный коэффициент, содержащий α , стремится к единице.

Эффективность ε регистрации нейтронов детектором можно определять двумя способами. Первый способ – как отношение скорости счета n_0 детектора в «пустой» незагруженной сборке к интенсивности нейтронного источника I

$$\varepsilon = \frac{n_0}{I}; \tag{4}$$

второй – как отношение скорости счета n для загрузки m к максимально возможному количеству нейтронов, произведенных в активной зоне, в этой загрузке m :

$$\varepsilon = \frac{n}{M \cdot I}, \tag{5}$$

где M – умножение нейтронов.

В первом случае для ячейки Dd-33 нами получено значение $\varepsilon = 3,32 \cdot 10^{-3}$, во втором $\varepsilon = 1,97 \cdot 10^{-3}$. Для вычислений будем использовать среднее значение $\varepsilon = 2,64 \cdot 10^{-3}$.

Подстановка числовых значений упростит выражение (2):

$$\frac{D}{\bar{n}} = 1 + 2,046 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{k_p}{1 - k_p} \right)^2, \quad k_p = k_{эфф} \cdot (1 - \beta_{эфф}). \tag{6}$$

В результате получили уравнение с одним неизвестным, где величина дисперсии однозначно связана с эффективным коэффициентом размножения нейтронов в сборке.

Отношение дисперсии к среднему измерялось в средней части кольцевой активной зоны (ячейка Dd-33) с помощью ^3He -детектора 12NH25/1F. Детектор помещался в топливный канал вместо извлеченного твэла. Блок-схема измерительной установки показана на рис. 3. Картограмма загрузки представлена на рис. 4.

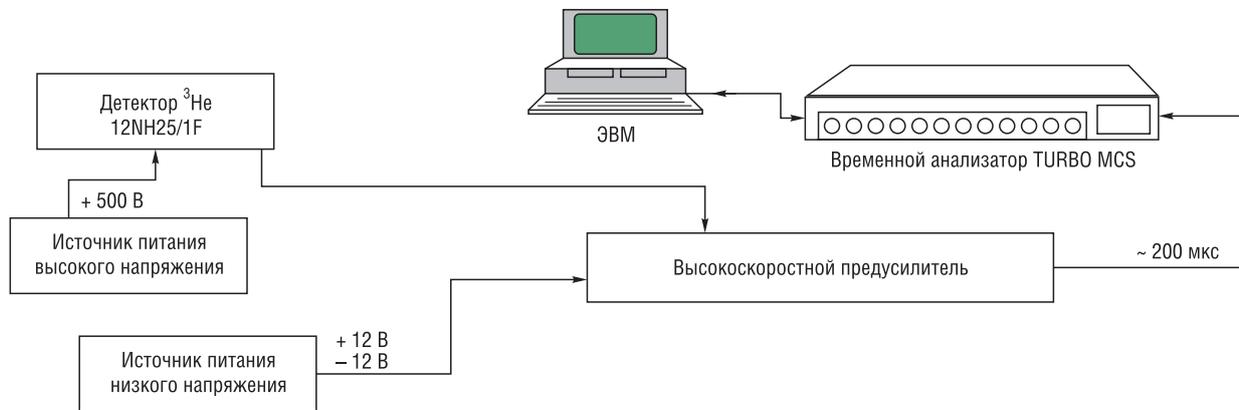


Рис. 3. Блок-схема измерительной установки

Fig. 3. Measurement setup diagram

Измеренное значение в ячейке Dd-33 при $m = 284$ твэл ЭК-10 составило $D / \bar{n} = 1,779 \pm 0,005$. Подстановка этого значения в (6) дает $k_{эфф} = 0,9589 \pm 0,0003$. Для загрузки $m = 285$ твэлов необходимо вести поправку на эффективность одного твэла, расположенного в активной зоне на позиции Dd-33, равную $\Delta k = 0,1 \cdot \beta_{эфф} \approx 0,00078$, следовательно, при $m = 285$ твэлов ЭК-10 $k_{эфф} = 0,9597 \pm 0,0003$.

Импульсный метод. Импульсный метод является более прямым способом получения характеристик реакторных систем, чем вероятностный метод. Основной принцип этого метода – исследование поведения нейтронов после введения нейтронного импульса в изучаемую среду. Несмотря на низкий выход нейтронов на один импульс, хорошая статистическая точность может быть обеспечена за счет высокой частоты повторения импульсов.

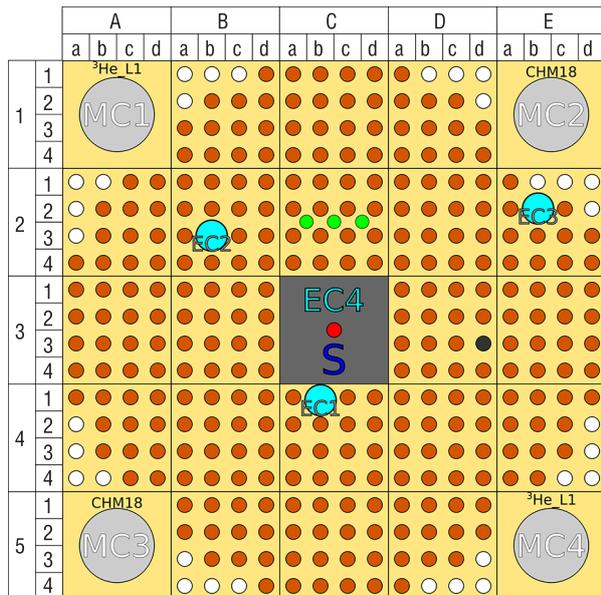


Рис. 4. Положение детектора He-3 вместо твэла в ячейке Dd-33 (в активную зону загружен 284 твэл ЭК-10)
 Fig. 4. He-3 detector placement instead of Dd-33 fuel rod (284 EK-10 fuel rods loaded into the core)

менного анализатора типа TURBO MCS фирмы ORTEC [4]. Запуск измерения производится от синхроимпульса, сформированного от тока пучка ионов по фронту блоком формирования и измерения тока пучка НГ-12-1. Блок-схема измерительной установки показана на рис. 5.

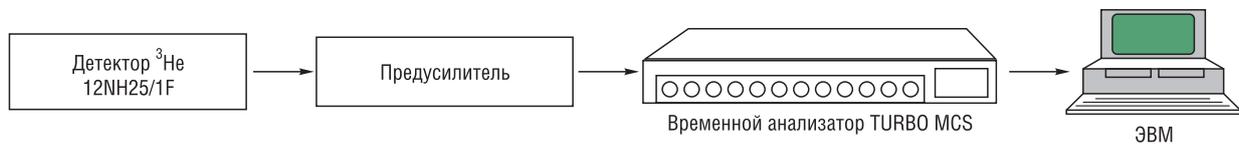


Рис. 5. Блок-схема измерительной установки
 Fig. 5. Measurement setup diagram

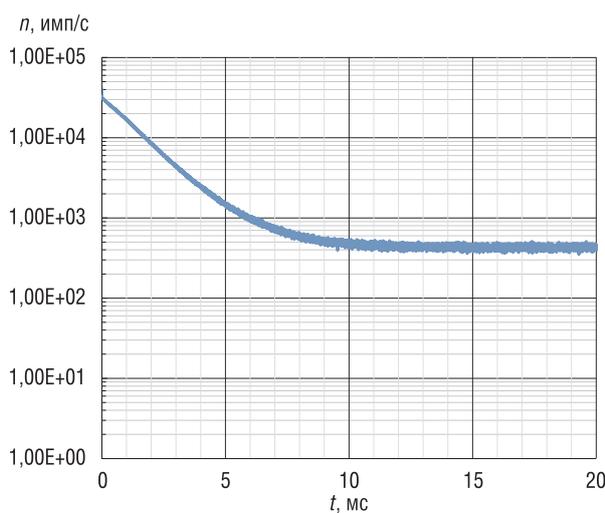


Рис. 6. Кривая спада плотности нейтронного потока в зависимости от времени подкритической сборки при облучении ее импульсным источником
 Fig. 6. Neutron flux density decline for the subcritical assembly under impulse neutron irradiation

Нейтронный импульс, введенный в размножающую среду, для которой $k_p < 1$, спадает по закону [3]

$$n(t) = n_0 e^{\alpha t}, \quad (7)$$

где постоянная спада мгновенных нейтронов α является удобным параметром для определения реактивности сборки и определяется соотношением

$$\alpha = \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{k_p - 1}{l} = \frac{k_{эфф}(1 - \beta_{эфф})}{l}, \quad (8)$$

здесь $k_p = k_{эфф}(1 - \beta_{эфф})$ – коэффициент размножения мгновенных нейтронов, l – время жизни мгновенных нейтронов.

Для проведения нейтронно-физических измерений нами использовался разработанный и изготовленный в Объединенном институте энергетических и ядерных исследований – Сосны экспериментальный измерительный канал на основе счетчиков медленных нейтронов с радиатором из ^3He типа 12NH25/1F фирмы EURISIS MEASURES (Франция), быстродействующего предварительного усилителя и вре-

менного анализатора типа TURBO MCS фирмы ORTEC [4]. Запуск измерения производится от синхроимпульса, сформированного от тока пучка ионов по фронту блоком формирования и измерения тока пучка НГ-12-1. Блок-схема измерительной установки показана на рис. 5.

Титан-третиевая мишень располагалась таким образом, чтобы точки рождения нейтронов находились в центре активной зоны. Частота задающего кварцевого генератора управления блоком ионного источника равнялась 49 Гц, длительность ионного импульса – 5 мкс, ускоряющее напряжение – 95 кВ. Ширина счетного канала (bin) составляла 2 мкс. Количество каналов временного анализатора (число bin-ов) равнялось 10 200. Каждый сеанс облучения содержал 50 000 циклов.

Постоянная спада мгновенных нейтронов измерялась в твэльном канале Dd-33 средней части кольцевой активной зоны, для чего из активной зоны извлекался твэл ЭК-10, а на его место устанавливался счетчик 12NH25/1F. Середина чувствительной области детектора совпадала с серединой активной зоны сборки. На рис. 6 приведен в качестве примера отклик сборки на нейтронный импульс.

Вычисление α по формуле $\alpha = \frac{\ln[n(t_2)/n(t_1)]}{t_2 - t_1}$ проводилось на прямолинейном участке зависимости $\ln[n(t)] = f(t)$ в диапазоне от 1 до 5 мс. Получены следующие значения: $\alpha = -(6,700 \pm 0,007) \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$, $k_{\text{эфф}} = \frac{1 + \alpha l}{1 - \beta_{\text{эфф}}} = 0,9552 \pm 0,0001$, где время жизни $l = 78 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ взято из расчетного значения [5] и $\beta = 0,00781$ [4]. Скорректированное значение $k_{\text{эфф}}$ для загрузки $m = 285$ твэлов ЭК-10 составит $0,9560 \pm 0,0001$.

Заклучение. В результате измерения тремя различными независимыми методами (обратного умножения, вероятностным и импульсным) получен $k_{\text{эфф}}$ подкритической сборки «Яліна-Тепловая». Все три метода дают согласованные результаты, среднее значение равно $k_{\text{эфф}} = 0,9569 \pm 0,0018$.

Поскольку в применяемых методах использовались как расчетные, так и экспериментальные параметры сборки с тепловым спектром нейтронов и получены согласованные результаты с погрешностью около 0,19 %, то к этим величинам можно относиться с высокой долей доверия и утверждать, что подкритичность подобных сборок определяется надежно. Данные результаты будут использоваться при обосновании ядерной безопасности экспериментальной установки при проведении дальнейших исследований.

Вопросы влияния пространственных эффектов на величину подкритичности сборки являются темой отдельного рассмотрения и экспериментальных исследований.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации задания Государственной программы научных исследований на 2019–2020 годы «Энергетические системы, процессы и технологии» подпрограммы 1.3 «Атомная энергетика и ядерные-физические технологии».

Acknowledgments

The work was held within the subprogram 1.3 “Atomic energy and nuclear physics technologies” under Governmental Scientific Research Program “Energy systems, processes and technologies” realization.

Список использованных источников

1. Salvatores, M. Global Physics Approach to Transmutation of Radioactive Nuclei / M. Salvatores, I. Slessarev, M. Uematsu // Nucl. Sci. Technol. – 1994. – Vol. 116, iss. 1. – P. 215–227. <https://doi.org/10.13182/NSE94-A21476>
2. The Research of Transmutation of Long-Lived Fission Products and Minor-Actinides in a Sub-critical Assembly Driven by the Neutron Generator / S. Chigrinov [et al.] // Proc. of the 2nd Int. Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies & Applications (ADTTA), Kalmar, Sweden, June 1996. – Vol. 2. – P. 737–741.
3. Кипин, Дж. Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов / Дж. Р. Кипин. – М.: Атомиздат, 1967. – 428 с.
4. Отчет по обоснованию безопасности подкритического стенда «Яліна», 5 редакция. – Минск: ОИЭЯИ-Сосны, 2016. – 178 с.
5. Use of Low Enriched Uranium Fuel in Accelerator Driven Subcritical Systems [Electronic Resource]: IAEA-TECDOC-1821 / International Atomic Energy Agency. – Vienna, 2017. – Mode of access: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1821_web.pdf

References

1. Salvatores M., Slessarev I., Uematsu M. Global Physics Approach to Transmutation of Radioactive Nuclei. *Nuclear Science and Engineering*, 1994, vol. 116, iss. 1, pp. 215–227. <https://doi.org/10.13182/NSE94-A21476>
2. Chigrinov S., Kiyavitskaya H., Serafimovich I., Bournos V., Fokov Yu., Korneev S. The Research of Transmutation of Long-Lived Fission Products and Minor-Actinides in a Sub-critical Assembly Driven by the Neutron Generator. *Proceedings of 2nd International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications (ADTTA), Kalmar, Sweden, June 1996, vol. 2, pp. 737–741.*
3. Kipin J. R. *Physical Fundamentals of Nuclear Reactor Kinetics*. Moscow, Atomizdat Publ., 1967. 428 p. (in Russian).
4. *Safety Substantiation Report for the “Yalina” Subcritical Assembly*, 5 formulation. Minsk, JIPNR – Sosny, 2016. 178 p. (in Russian).
5. International Atomic Energy Agency. *Use of Low Enriched Uranium Fuel in Accelerator Driven Subcritical Systems: IAEA-TECDOC-1821*. Vienna, 2017. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1821_web.pdf

Информация об авторах

Едчик Иван Адамович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 223063, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lab21@sosny.bas-net.by

Корбут Тамара Николаевна – кандидат технических наук, заместитель генерального директора, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 223063, Минск, Республика Беларусь). E-mail: korbut@sosny.bas-net.by

Кузьмин Андрей Владимирович – кандидат физико-математических наук, генеральный директор, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 223063, Минск, Республика Беларусь). E-mail: avkuzmin@sosny.bas-net.by

Мазаник Сергей Эдуардович – начальник смены ИЯУ, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 223063, Минск, Республика Беларусь).

Тогущов Владислав Павлович – инженер-электроник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 223063, Минск, Республика Беларусь).

Кравченко Максим Олегович – младший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 223063, Минск, Республика Беларусь). E-mail: m.kravch@sosny.bas-net.by

Information about the authors

Ivan A. Edchik – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 223063, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lab21@sosny.bas-net.by

Tamara N. Korbut – Ph. D. (Engineering), Deputy Director, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 223063, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korbut@sosny.bas-net.by

Andrey V. Kuzmin – Ph. D. (Physics and Mathematics), Director the General, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 223063, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: avkuzmin@sosny.bas-net.by

Sergey E. Mazanik – Shift Supervisor, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 223063, Minsk, Republic of Belarus).

Vladislav P. Togushov – Electronic Engineer, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 223063, Minsk, Republic of Belarus).

Maksim O. Kravchenko – Junior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 223063, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: m.kravch@sosny.bas-net.by