

## ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ГЕНЕРАЦИИ МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ИМПУЛЬСНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВИР-2М

Л. Ю. Глухов<sup>2</sup>, С. П. Котков<sup>2</sup>, М. С. Кузнецов<sup>1</sup>, С. С. Чурсин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО НИ ТПУ, г. Томск

<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Проведено измерение времени генерации мгновенных нейтронов в активной зоне исследовательского ядерного реактора ВИР-2М. Измерения проводились в подкритическом состоянии реактора с помощью метода Бабала. Дано краткое описание устройства реактора ВИР-2М и использованного экспериментального оборудования, представлена методика проведения и обработки результатов экспериментов. Показано, что время генерации мгновенных нейтронов при незагруженных экспериментальных каналах равно  $35 \pm 1$  мкс.

**Ключевые слова:** время жизни мгновенных нейтронов, импульсный ядерный реактор, метод Бабала, растворный импульсный реактор ВИР-2М.

**MEASUREMENT OF PROMPT NEUTRONS PRODUCTION TIME OF VIR-2M PULSED NUCLEAR REACTOR / L. Yu. GLUKHOV, S. P. KOTKOV, M. S. KUZNETSOV, S. S. CHURSIN** // The study of the prompt neutrons production time in VIR-2M research reactor core was carried out. Investigations were performed under conditions of a subcritical state of the reactor. Babala method was used. Description of the reactor arrangement and used experimental equipment are presented. Investigation method and way of experimental data treatment are shown in the work. Prompt neutrons production time was found to be equal  $35 \pm 1$   $\mu$ s when experimental channel was empty.

**Key words:** prompt neutrons production time, pulse reactor, Babala method, fuel solution of pulse reactors VIR-2M.

### Введение

Исследовательские ядерные реакторы находят широкое применение в области ядерной энергетики и технологии. Данные установки используются для проведения исследований поведения материалов в полях реакторных излучений, в испытаниях на воздействие импульсного и статического  $n$ ,  $\gamma$ -излучения на различные узлы и приборы, для испытаний топлива АЭС с различными теплоносителями в нештатных условиях реактивных аварийных ситуаций, аварий с потерей теплоносителя и т. д.

Отдельным классом исследовательских реакторов являются импульсные ядерные реакторы (ИЯР), предназначенные для генерирования контролируемых и повторяемых импульсов деления атомных ядер на мгновенных нейтронах. Доминирующим типом таких устройств являются аperiодические импульсные реакторы, в которых импульс делений генерируется быстрым переводом

реактора в надкритическое состояние. Гасится импульс за счет отрицательной реактивной обратной связи, обусловленной ядерными, термомеханическими, гидродинамическими и другими явлениями [1].

Важную роль при прогнозировании параметров импульса (длительность, максимальная мощность и др.) ИЯР является постоянная спада при критичности на запаздывающих нейтронах [1], определяемая как

$$\alpha_c = \frac{\beta_{\text{эф}}}{\Lambda}, \quad (1)$$

где  $\beta_{\text{эф}}$  – эффективная доля запаздывающих нейтронов;  $\Lambda$  – время генерации мгновенных нейтронов\* [1, 2].

---

\* Для систем критических на запаздывающих нейтронах время жизни мгновенных нейтронов ( $l$ ) и время генерации мгновенных нейтронов ( $\Lambda$ ) равны.

Данная работа посвящена определению времени генерации мгновенных нейтронов деления в ИЯР ВИР-2М по экспериментально измеренной величине  $\alpha_c$ .

## Методика измерений

Константа спада мгновенных нейтронов (или константа альфа-Росси) определяется временем генерации мгновенных нейтронов и коэффициентом размножения нейтронов

$$\alpha = \frac{\beta_{эф} - \tilde{\rho}}{\Lambda}, \quad (2)$$

где  $\tilde{\rho}$  – реактивность;

$$\text{или } \alpha = \frac{\beta_{эф}}{\Lambda} \left( 1 - \frac{\tilde{\rho}}{\beta_{эф}} \right) = \alpha_c \left( 1 - \frac{\tilde{\rho}}{\beta_{эф}} \right) = \alpha_c [1 - \rho], \quad (3)$$

где  $\rho$  – реактивность, выраженная в единицах  $\beta_{эф}$ ,  $\alpha_c$  – постоянная спада при критичности на запаздывающих нейтронах.

Имеется достаточно большое количество экспериментальных методов определения постоянной спада мгновенных нейтронов (константы альфа-Росси), основанных на счете нейтронов [2]. На начальном этапе выполнения данной работы были проведены предварительные исследования возможности применения некоторых методов для определения константы альфа-Росси на ИЯР ВИР-2М. Ниже приводятся результаты проведенного анализа.

Метод альфа-Росси [3] нашел наилучшее применение для систем на быстрых нейтронах. Применение этого метода для тепловых систем требует низкой счетности. Для реактора ВИР-2М это соответствует не более 10 отсчетов/с, что в свою очередь приводит к длительному набору статистики и требует измерений при большой подкритичности реактора (не выше  $-3\beta_{эф}$ ).

Метод Фейнмана [4] лучше всего подходит для систем на тепловых нейтронах. Он также требует низкой счетности, и для реактора ВИР-2М лучше всего подходит диапазон от 100 до 1000 отсчетов/с (возможно проводить измерения и при более низкой счетности, но это занимает крайне длительное время), что в свою очередь требует измерений при подкритичности реактора не ниже  $-0,5\beta_{эф}$ .

Метод Могильнера [5], как и метод Фейнмана, нашел свое преимущественное применение для систем на тепловых нейтронах. Однако данный метод может быть применим лишь при очень низ-

ком уровне мощности в совокупности с высочайшей эффективностью детектора.

Метод Бабала [6] применим как для систем на тепловых нейтронах, так и для систем на быстрых нейтронах. Для реактора ВИР-2М применимость данного метода ограничена счетностью не более 300 отсчетов/с (подкритичность – не выше  $-0,1\beta_{эф}$ ).

Учитывая все вышеизложенное (имеющееся экспериментальное оборудование, возможность проводить длительные измерения, достижимую подкритичность ИЯР ВИР-2М), измерение постоянной спада на ИЯР ВИР-2М проводилось по методу Бабала в диапазоне подкритичности от  $-4\beta_{эф}$  до  $-0,1\beta_{эф}$ .

Выражение для распределения счетно-счетных интервалов, используемое по методу Бабала, определяется следующим образом:

$$p_{cc}(t)dt = C_1(t)dt + C_2(t)e^{-\alpha\gamma t}dt, \quad (4)$$

где

$$C_1(t) = 4F\varepsilon p_0(t) \left[ \frac{(\gamma+1) + (\gamma-1)e^{-\alpha\gamma t}}{(\gamma+1)^2 - (\gamma-1)^2 e^{-\alpha\gamma t}} \right]^2, \quad (5)$$

$$C_2(t) = \frac{8F\varepsilon p_0(t)\gamma^2}{\sigma \left[ (\gamma+1)^2 - (\gamma-1)^2 e^{-\alpha\gamma t} \right]^2 t}, \quad (6)$$

$$\gamma = \left( 1 + 2 \frac{\varepsilon D_v}{\rho_p^2} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

$$p_0(\Delta) = e^{-\frac{2\bar{c}\Delta}{\gamma+1} \left[ 1 + \frac{2}{(\gamma-1)\alpha\Delta} \ln \left( \frac{(\gamma+1)^2 - (\gamma-1)^2 e^{-\alpha\gamma\Delta}}{4\gamma} \right) \right]}, \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{S\Lambda}{D_v}, \quad (9)$$

где  $D_v$  – параметр Дайвена;  $S$  – мощность нейтронного источника в подкритической системе;  $\rho_p$  – мгновенная реактивность;  $\sigma$  – коэффициент, эквивалентный мощности источника нейтронов;  $\bar{c}$  – среднее число отсчетов за интервал времени  $\Delta$ ;  $F$  – средняя скорость делений в системе;  $\varepsilon$  – эффективность детектора в отсчетах на деление.

Для получения величины  $\alpha$  (постоянной спада на мгновенных нейтронах) экспериментально найденное распределение счетно-счетных интервалов  $p_{cc}(t)$  обрабатывается методом наименьших квадратов в соответствии с уравнениями (4)–(9).

# Экспериментальное оборудование и аппаратура

## 1. Основные технические характеристики реактора ВИР-2М

Реакторы семейства ВИР [7] создавались для испытания различных объектов в условиях воздействия мощного ионизирующего  $n, \gamma$ -излучения. Водный импульсный реактор ВИР-2М относится к классу аperiodических импульсных реакторов самогасящегося действия и представляет собой растворный вариант ИЯР, отличающийся малым количеством делящегося материала, используемого в качестве топлива (всего около 7 кг урана).

В качестве топлива в реакторе ВИР-2М используется уран 90 %-ного обогащения по изотопу  $^{235}\text{U}$  в виде раствора соли – уранилсульфата ( $\text{UO}_2\text{SO}_4$ ) – в обычной воде. Топливный раствор постоянно находится в герметичном корпусе (рис. 1), придающем топливной композиции компактную геометрическую форму, необходимую для получения интенсивных потоков нейтронов и гамма-квантов.

Цилиндрический корпус реактора ВИР-2М (рис. 1) имеет высоту 2 м и диаметр  $\sim 0,7$  м (снаружи) при толщине стенок 65 мм. В днище корпуса толщиной 155 мм имеется вогнутый полусферический канал (ПСК) с внутренним диаметром 300 мм. К крышке корпуса, выполненной изнутри в виде полусферы с минимальной толщиной 160 мм, приварено семь глухих цилиндрических каналов: шесть периферийных для стержней управления реактивностью и один центральный канал (ЦК).

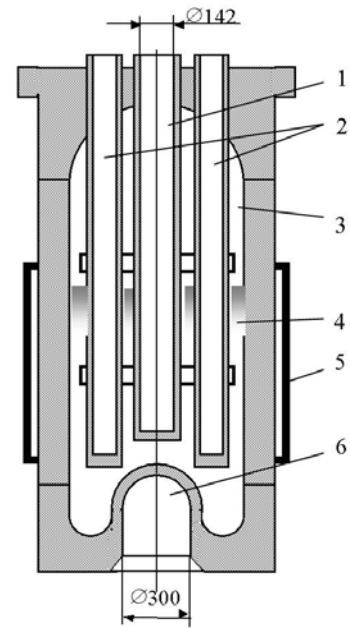


Рис. 1. Схематический разрез корпуса активной зоны реактора ВИР-2М: 1 – центральный экспериментальный канал, 2 – каналы для стержней управления реактивностью, 3 – надтопливное пространство, 4 – топливный раствор, 5 – «рубашка» охлаждения, 6 – полусферический экспериментальный канал

## 2. Экспериментальное оборудование и алгоритм обработки данных

Структурная схема измерительного канала представлена на рис. 2. В качестве детектора использовался коронный счетчик нейтронов СНМ-11. Детектор, помещенный в замедлитель, окруженный чехлом из кадмия, размещался в экспериментальной шахте, которая расположена сбоку от корпуса реактора ВИР-2М, или устанавливался

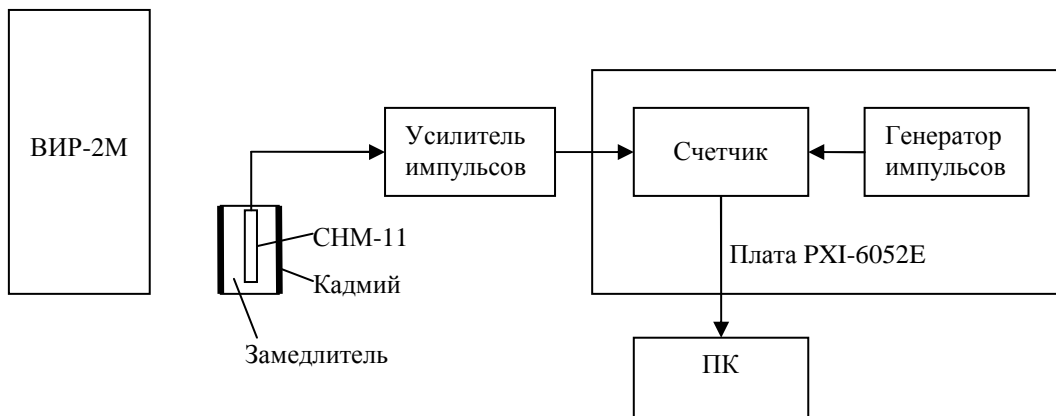


Рис. 2. Структурная схема измерительного канала

## Условия проводимых экспериментов

№ эксперимента	Положение детектора	Загрузка экспериментальных каналов	Диапазон изменяемой реактивности, $\beta_{эф}$	Примечания
1	ЦК	поглотитель (борный счетчик) в ЦК (вес $\sim -0,01\beta_{эф}$ )	$-2,02\dots-0,17$	
2	шахта	отсутствует	$-1,04\dots-0,19$	ИС-1 расположен между центром АЗ и детектором (ИС-1 играет роль экрана)
3	шахта	отсутствует	$-1,88\dots-0,29$	Между центром АЗ и детектором экран отсутствует
4	шахта	поглотитель в ПСК (вес $\sim -2\beta_{эф}$ )	$-3,66\dots-0,12$	ИС-1 расположен между центром АЗ и детектором (ИС-1 играет роль экрана)
5	шахта	отражатель в ПСК (вес $\sim +1\beta_{эф}$ )	$-1,23\dots-0,12$	

в центральный канал\* ИЯР. Измерения проводились в подкритическом состоянии, в диапазоне реактивности от  $-4\beta_{эф}$  до  $-0,1\beta_{эф}$ . Реактивность в данном диапазоне варьировалась путем извлечения одной группы поглощающих стержней (ИС-1). Условия при проведении соответствующих экспериментов приведены в табл. 1.

Импульсы с детектора поступали на многофункциональную плату NI PXI-6052E. В интервале времени между двумя соседними импульсами, поступившими с детектора, счетчик платы подсчитывал импульсы, сформированные генератором импульсов (частотой 20 МГц), входящим в состав измерительной платы. В дальнейшем данные (подсчитанные импульсы за интервал времени) передавались с платы на ПК и в режиме реального времени подвергались математической обработке специальной программой, разработанной в среде National Instruments LabVIEW.

Мертвое время измерительного канала составляло  $\sim 3 \cdot 10^{-6}$  с, а максимальная счетность детектора не превышала 300 имп./с. Используя данные [8], получили, что число просчетов измерительного канала не превысило 0,1 % от счетности. Исходя из этого, мертвое время при обработке данных не учитывали.

Результатом математической обработки данных для одного измерения являлась гистограмма распределения импульсов в зависимости от длительности временного интервала (пример типич-

ной гистограммы приведен на рис. 3). Шагом гистограммы выбрали 50 мкс, основываясь на соотношении оптимальности времени измерения и возможности провести обработку методом Бабала.

Далее гистограмма обрабатывалась по методу наименьших квадратов с использованием формул (4)–(9), и определялось значение константы альфа-Росси. При использовании метода наименьших квадратов в формулах (4)–(9) варьировались следующие величины:  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $c$  и  $A$  ( $A$  – константа нормировки).

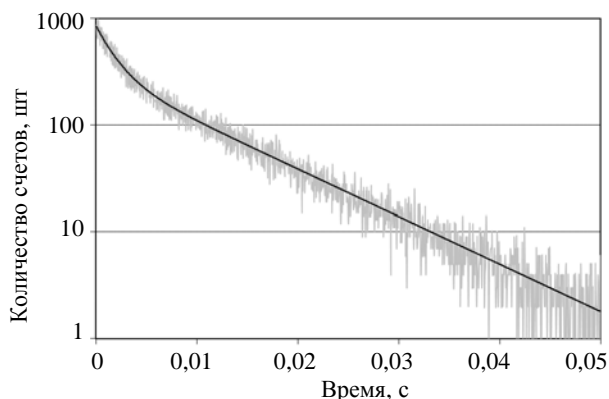


Рис. 3. Распределение счетно-счетных интервалов при реактивности реактора  $-0,17\beta_{эф}$ : — — экспериментальные данные; — — аппроксимированная кривая

По результатам измерений, проведенных для нескольких значений реактивности, была построена зависимость константы альфа-Росси (ось OY) от реактивности (ось OX). Полученная зависимость аппроксимировалась прямой с дополнительным требованием  $\alpha(\beta) = 0$ , т. е. прямая долж-

\* Размещенный в центральном канале детектор использовался без замедлителя и кадмиевого чехла.

на пересекать ось  $OX$  в точке  $\rho = \beta$ . Точка пересечения аппроксимирующей прямой с осью  $OY$  дает значение константы альфа-Росси для критического состояния реактора. Время генерации мгновенных нейтронов определялось по формуле (1). Погрешность определялась из дисперсии полученных значений константы альфа-Росси в зависимости от реактивности.

## Результаты эксперимента

В целях достижения необходимой точности определения константы альфа-Росси при каждом измерении набиралась статистика не менее 100 000 отсчетов нейтронов. Для оценки погрешности измерения эксперименты проводились при пяти разных значениях реактивности ядерного реактора.

Полученная зависимость константы альфа-Росси от реактивности представлена на рис. 4. Там же отмечена прямая, аппроксимирующая результаты эксперимента. Параметры прямой определялись методом наименьших квадратов. Как было сказано выше, аппроксимирующая прямая «привязывалась» к точке  $(1, 0)$ , поскольку при реактивности реактора, равной  $+\beta_{эф}$ , константа альфа-Росси равна нулю (см. формулу (1)).

В качестве примера в табл. 2 представлены результаты измерений константы альфа-Росси

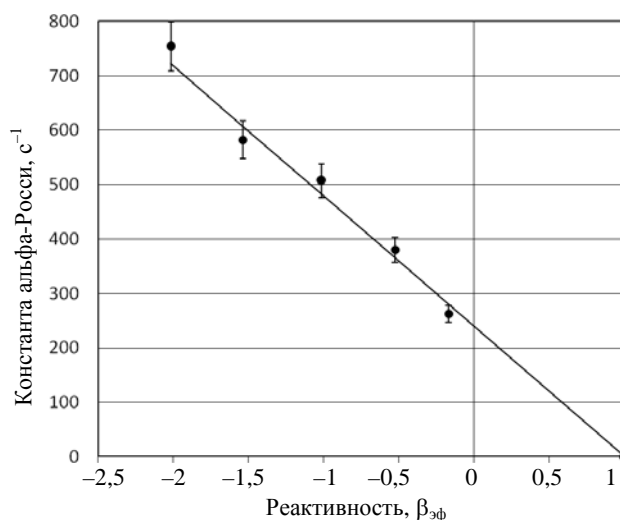


Рис. 4. Зависимость константы альфа-Росси от реактивности реактора

в эксперименте № 1 при различной подкритичности ИЯР ВИР-2М.

Из результатов обработки данного эксперимента было получено следующее значение константы альфа-Росси-0  $\alpha_c = 2,4 \cdot 10^2 \pm 0,1 \cdot 10^2 c^{-1}$ . Для реактора ВИР-2М  $\beta_{эф} = 0,008$  [7]. В соответствии с формулой (1) получаем время генерации мгновенных нейтронов  $l = 33 \pm 1$  мкс.

Полученные значения  $\alpha_c$  во всех проведенных экспериментах приведены в табл. 3.

Таблица 2

*Результаты измерений константы альфа-Росси в эксперименте № 1 при различной подкритичности ИЯР ВИР-2М*

Реактивность, $\beta_{эф}$	Высота извлечения стержней ИС-1, мм	Константа альфа-Росси, $c^{-1}$
-2,02	0	$7,5 \cdot 10^2$
-1,54	25	$5,8 \cdot 10^2$
-1,01	50	$5,1 \cdot 10^2$
-0,53	75	$3,8 \cdot 10^2$
-0,17	95	$2,6 \cdot 10^2$
$\alpha_c = 2,4 \cdot 10^2 \pm 0,1 \cdot 10^2 c^{-1}$		

Обобщенные результаты полученных величин  $\alpha_c$ 

№ эксперимента	Положение детектора	Полученное значение $\alpha_c$ , с <sup>-1</sup>	Полученное значение $\Lambda$ , мкс	Примечания
1	ЦК	$2,4 \cdot 10^2 \pm 0,1 \cdot 10^2$	$33 \pm 1$	поглотитель (борный счетчик) в ЦК
2	шахта	$2,3 \cdot 10^2 \pm 0,1 \cdot 10^2$	$35 \pm 1$	ИС-1 расположен между центром АЗ и детектором (ИС-1 играет роль экрана)
3	шахта	$2,3 \cdot 10^2 \pm 0,1 \cdot 10^2$	$35 \pm 1$	между центром АЗ и детектором экран отсутствует
4	шахта	$2,6 \cdot 10^2 \pm 0,1 \cdot 10^2$	$31 \pm 1$	поглотитель в ПСК
5	шахта	$2,4 \cdot 10^2 \pm 0,1 \cdot 10^2$	$33 \pm 1$	отражатель в ПСК

**Заключение**

В работе проведено измерение времени генерации мгновенных нейтронов в растворном импульсном ядерном реакторе ВИР-2М. Экспериментально определено распределение счетно-счетных интервалов при нескольких значениях реактивности реактора (в подкритическом состоянии). Определена зависимость константы альфа-Росси от реактивности при различной загрузке, методом аппроксимации получено значение константы альфа-Росси-0 (постоянной спада мгновенных нейтронов при критичности на запаздывающих нейтронах). Константа альфа-Росси-0, в зависимости от загрузки экспериментальных каналов, находится в пределах от  $2,3 \cdot 10^2$  с<sup>-1</sup> до  $2,6 \cdot 10^2$  с<sup>-1</sup>.

В зависимости от загрузки экспериментальных каналов время генерации мгновенных нейтронов  $\Lambda$ , определенное по результатам обработки экспериментов, находится в пределах 31–35 мкс.

Отметим, что время генерации мгновенных нейтронов реактора ВИР-2М при пустых экспериментальных каналах, определенное расчетным путем, составляет 40 мкс [7], что достаточно близко к значению, полученному в настоящей работе.

**Список литературы**

1. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007. Т. 1.

2. Уриг Р. Статистические методы в физике ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1974. 400 с.

3. Orndoff J. D. Prompt Neutron Periods of Metal Critical Assemblies // Nucl. Sci. Engng, 1957, vol. 2, p. 450.

4. Feynman R. P., de Hoffman F., Serber R. Dispersion of the Neutron Emission in U-235 Fission // J. Nucl. Energy, 1956, vol. 3, p. 64.

5. Могильнер А. И., Золотухин В. Г. Измерение характеристик реактора статистическим р-методом // Атомная энергия, 1961, т. 10, вып. 4, с. 377.

6. Babala D. Neutron Counting Statistics in Nuclear Reactors // Norwegian Report KR-114, November 1966.

7. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеевко А. С. и др. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1990, вып. 3, с. 3–15.

8. Толченев Ю. М., Чайковский В. Г. Коронные счетчики медленных нейтронов // ПТЭ, 1963, № 6.

Контактная информация –

Котков Сергей Павлович,  
факс: (83130) 4-55-69,  
e-mail: kotkov@expd.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 05.06.2015.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып. 4, с. 58–63.