

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОНСТАНТЫ СПАДА МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ В ХРАНИЛИЩЕ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

**А. А. Ключников, А. А. Кучмагра, Г. И. Одинокин,
Е. Е. Олейник, В. Б. Шостак**

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

В. Н. Макаровский, В. Н. Павлович, С. А. Стороженко, С. В. Ярошенко

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Описан эксперимент с применением аппаратурно-методической системы измерения нейтронных шумов топливосодержащих материалов. Приведены результаты измерений константы спада мгновенных нейтронов деления в хранилище отработанного ядерного топлива реактора ВВР-М.

Введение

Ранее, с целью определения степени ядерной безопасности объекта "Укрытие", были проведены предварительные измерения характеристик нестационарного поля мгновенных нейтронов деления основных скоплений топливосодержащих материалов (ТСМ) объекта "Укрытие". Выполнен расчет коэффициентов размножения нейтронов ($k_{эф}$) на базе этих измерений. Анализ полученных данных и результаты расчетов представлены в работе [1]. Измерения проводились в рамках первичных работ по натурным испытаниям в условиях объекта "Укрытие" макета измерителя времени регистрации событий (ИВРС) [2], который был разработан для этих целей. Практические измерения проводились четырьмя информационно-измерительными каналами системы контроля (ИИК СК) нейтронных характеристик ТСМ "Финиш" с использованием разработанной методики измерения $k_{эф}$ и динамики поведения подкритичности на основе методов шумовой диагностики в условиях объекта "Укрытие" [3].

Однако дальнейшее тестирование аналогов ИИК СК ТСМ "Финиш" и "Сигнал" с использованием нейтронных плутоний-бериллиевых источников в измерительной лаборатории [1] показало, что полученные значения величины $k_{эф}$ можно считать только грубой оценкой в скоплениях ТСМ на объекте "Укрытие". Это можно связать с некоторыми характеристиками предусилителей системы "Финиш", которая не была предусмотрена для проведения анализа временных распределений регистрируемых нейтронов в микросекундном диапазоне. Такое же тестирование ИИК СК ТСМ "Сигнал" показало, что статистические измерения для определения значений $k_{эф}$ как в скоплениях ТСМ на объекте "Укрытие", так и на других ядерно-опасных объектах должны быть значительно более информативны и определены, если их проводить на базе аналогов ИИК СК ТСМ "Сигнал".

Обоснованно отмечено [4], что для окончательного ответа на вопрос о работоспособности ИИК СК ТСМ "Сигнал" и чувствительности разработанной методики необходимо провести измерения времени регистрации событий с использованием нейтронного источника с $k_{эф} > 0$, для которого можно достаточно точно рассчитать величину $k_{эф}$.

Измерения в хранилище отработанного ядерного топлива

С целью подтверждения возможности применения методов шумовой диагностики для измерения $k_{эф}$ в скоплениях ядерноопасных делящихся материалов была запланирована и проведена серия измерений временных интервалов между регистрациями отсчетов ИИК с блоком детектирования нейтронного излучения, аналогичного СК ТСМ "Сигнал", в хранилище отработанного ядерного топлива (ХОЯТ) исследовательского реактора ВВР-М Института ядерных исследований НАН Украины (Киев).

© А. А. Ключников, А. А. Кучмагра, Г. И. Одинокин, Е. Е. Олейник, В. Б. Шостак,
В. Н. Макаровский, В. Н. Павлович, С. А. Стороженко, С. В. Ярошенко, 2004

При подготовке эксперимента была разработана конструкторская документация и изготовлен «сухой» канал, представляющий собой дюралюминиевую трубу длиной 5,2 м, заваренную с одного торца, и грузом для затопления. Этот канал предназначался для размещения блока детектирования в непосредственной близости от кассет с тепловыделяющими сборками (ТВС), обеспечивая отсутствие контакта с радиоактивной водой в ХОЯТ и постоянное пространственное положение блока детектирования относительно источника нейтронов. В экспериментах был применен блок детектирования с камерой деления КНТ-31. Для повышения эффективности регистрации детектор помещается в «утеплитель» [5].

При проведении эксперимента необходимыми условиями являлись: стабильность временных и метрологических параметров технических средств измерительного тракта; отсутствие изменения геометрии измерений; отсутствие переходных характеристик в состоянии подкритичности измеряемой среды в текущей серии измерений; отсутствие помех общего вида (электромагнитных и пр.), вносящих дополнительные погрешности (увеличение счетности в ИИК, не связанные с измеряемым параметром источника излучения).

Для обеспечения этих условий после каждого изменения условий эксперимента снижалась дискриминационная характеристика ИИК.

Для определения параметров пространственного распределения нейтронных и гамма-полей проведено измерение зависимостей числа отсчетов нейтронного детектора в единицу

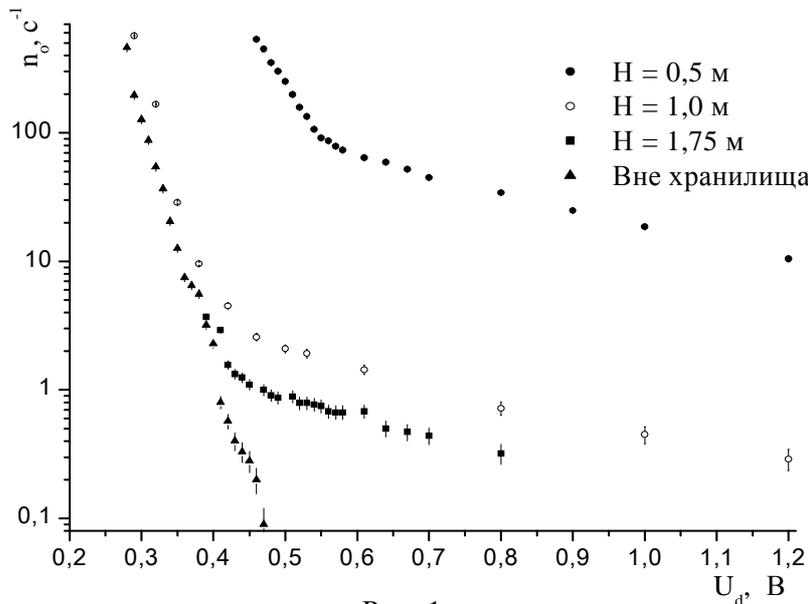


Рис. 1

времени (n_0) от порога дискриминации (U_d) для различных расстояний между детектором и полом хранилища (H). Результаты этих измерений представлены на рис. 1.

На рис. 2 представлена схема взаимного расположения отработанного ядерного топлива и нейтронного детектора, а также направление перемещения последнего при проведении измерений зависимости n_0 от H . «Сухой» канал размещался между кассетами с отработанным ядерным топливом.

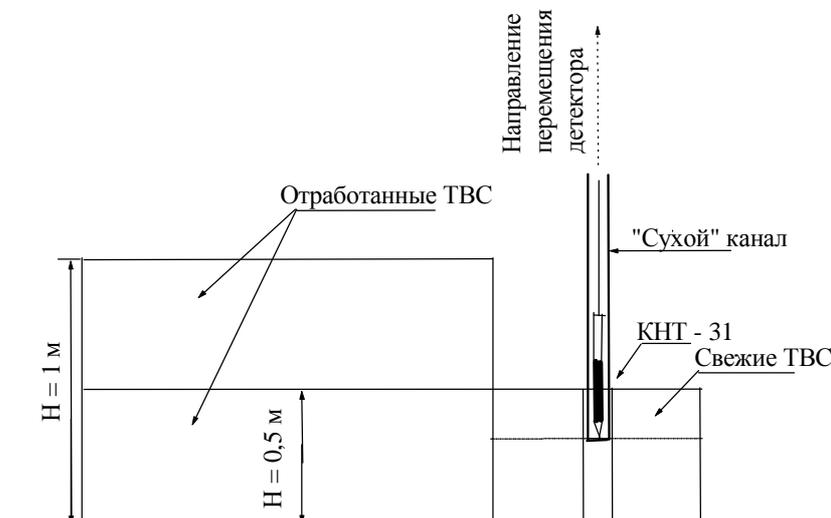


Рис. 2

Зависимости, представленные на рис. 1, имеют характерную форму типичной дискриминационной характеристики. Особенностью этой характеристики является резкий подъем счетности (излом характеристики) в области относительно малых значений порога дискриминации, связанный в основном с наличием импульсов от альфа-частиц радиатора детектора, излучае-

мых непосредственно в чувствительный объем детектора, а также с наличием дробовых шумов в электронных узлах ИИК и импульсов от потока гамма-квантов от ТВС.

Выбор пространственного положения детектора для проведения измерений осуществлялся по критерию максимального значения интегрального потока регистрируемых нейтронов в рамках оптимальной величины. Руководствуясь данными, представленными на рис. 1 и в табл. 1, были выбраны оптимальные пороги дискриминации, при которых проведены относительно длительные измерения времени регистрации событий в режиме одновременной регистрации событий на шести разных входах ИВРС и $H = 0,5$ м. При этом каждый из входов ИВРС имел свой порог дискриминации ($U_d = 0,58$ В, 0,64 В, 0,7 В, 0,8 В, 1,0 В и 1,2 В).

Таблица 1. Значения n_0 при пороге дискриминации 0,46 В и мощность экспозиционной дозы P_γ для различных расстояний между детектором и полом хранилища H_γ

H_γ , м	0,5	1,0	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0
P_γ , Р/ч	35000	1300	1320	1080	232	8	3,7
n_0 , с ⁻¹	663	2,6	3,8	0,85	0,17	0,1	0,06

Априори предполагается, что в ХОЯТ обеспечивается достоверно безопасный уровень $k_{эф}$. При этом критмассовая безопасность достигается: ограничением количества хранимого отработанного ядерного топлива; взаимным расположением ТВС и нейтронпоглощающих стержней с учетом эффективного замедлителя нейтронов - воды в объеме хранилища; отражением нейтронов от стен; достаточным количеством нейтронпоглощающих стержней.

Одной из целей проводимых измерений была оценка значимости последнего из перечисленных факторов. Поэтому были проведены три серии измерений, каждая из которых могла характеризоваться своим значением $k_{эф}$. Первая серия измерений была проведена в условиях, когда весь комплект нейтронпоглощающих стержней находился в зоне поля нейтронов, создаваемого топливом реактора.

Во второй серии были выведены из зоны поля нейтронов девять нейтронпоглощающих стержней, в третьей - 25.

Время экспозиции выбиралось равным одному или двум часам. При последующей обработке и анализе временных спектров из рассмотрения исключались файлы, в которых проявлялись существенные отличия от основной массы полученных данных: либо в форме спектров, либо в значениях их усредненных оценок. Эти отличия объяснялись наличием значительных помех в цепях силового питания вторичной аппаратуры, вероятно, связанных с коммутацией силового оборудования реактора, либо помех в контуре заземления реакторного зала ВВР-М. Выбор часовых экспозиций позволил минимизировать потери информации в экспериментах, сохранив возможность получения минимальной статистической ошибки измерений. Кроме того, на базе анализа исключенных файлов, в которых помехи проявились в ярко выраженной форме, была получена функция временного распределения помех. Эта функция, нормированная относительно вклада помех в первый канал всех анализируемых спектров, использовалась для исключения вклада помех в процессе обработки результатов измерений.

Проведена обработка части результатов этих натуральных измерений (первая и третья серии измерений). Получены спектры распределения длин интервалов времени (t) между двумя отсчетами детектора нейтронов в течение полного времени измерений ($T_{эксп.}$). Рассчитан и вычтен из этих спектров вклад нейтронов, обусловленный случайными пуассоновскими процессами [1 - 3]. В результате получены временные спектры распределения длин t между двумя отсчетами детектора, отвечающие регистрации только мгновенных нейтронов, коррелированных во времени, их принадлежностью к одной и той же цепочке распада.

Такие спектры, полученные при различных U_d в первой и третьей сериях измерений, представлены на рис. 3 - 14. В первой серии измерений, когда весь комплект нейтронпоглощающих стержней находился в зоне поля нейтронов, $T_{\text{эксп.}} = 29,3$ ч. В третьей серии измерений, когда было выведено 25 нейтронпоглощающих стержней, $T_{\text{эксп.}} = 45$ ч. Каждая точка на этих спектрах N - это количество временных интервалов t , длительности которых не различаются между собой более чем на отрезок времени dt . Шкала разбита на последовательность отрезков $dt = 32$ мкс.

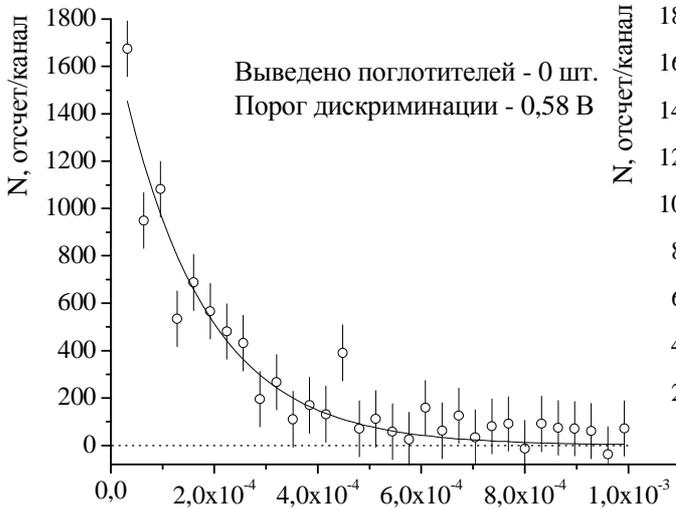


Рис. 3

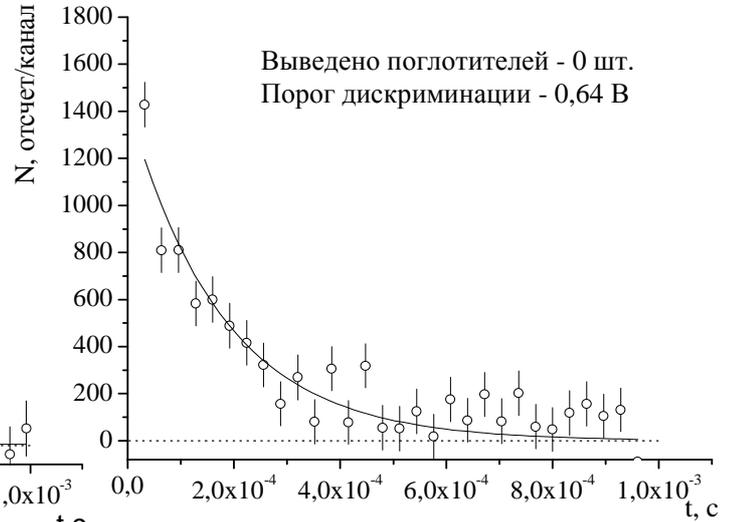


Рис. 4

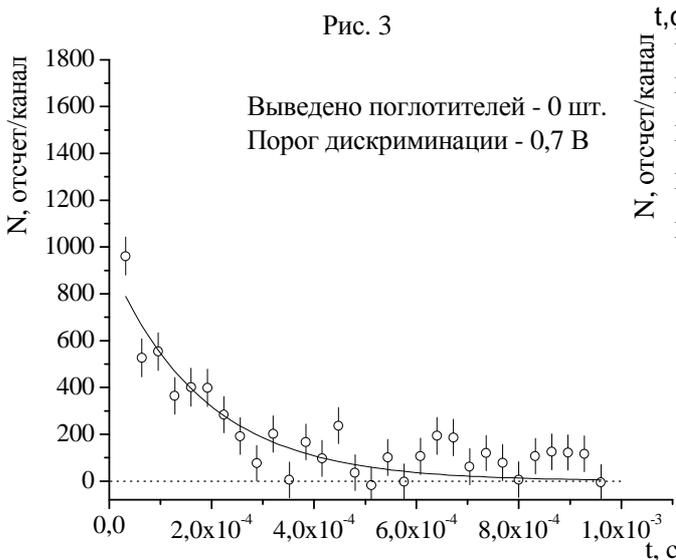


Рис. 5

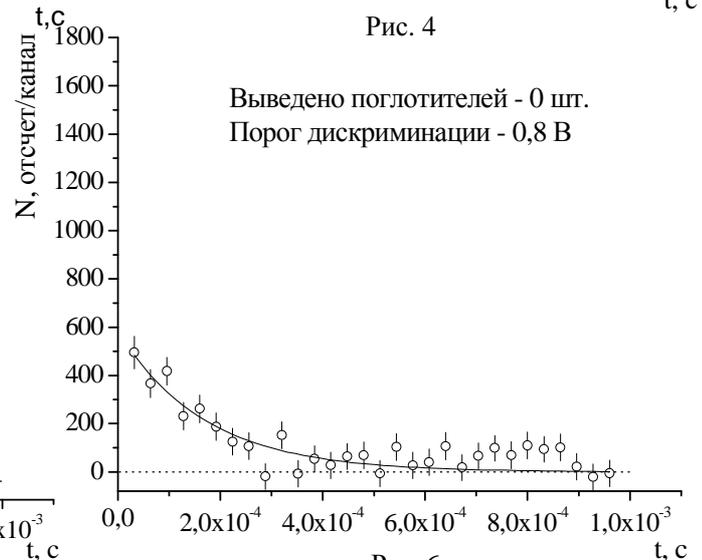


Рис. 6

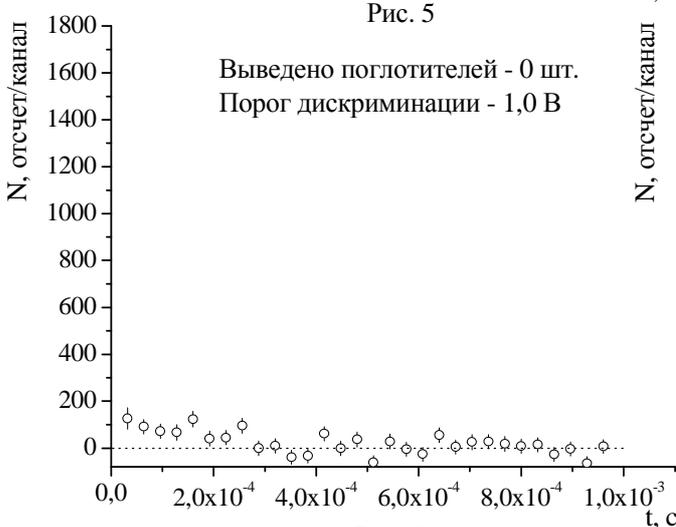


Рис. 7

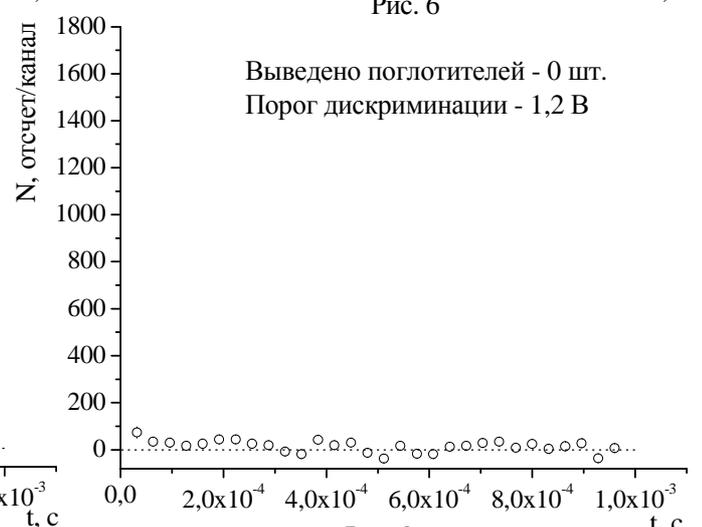


Рис. 8

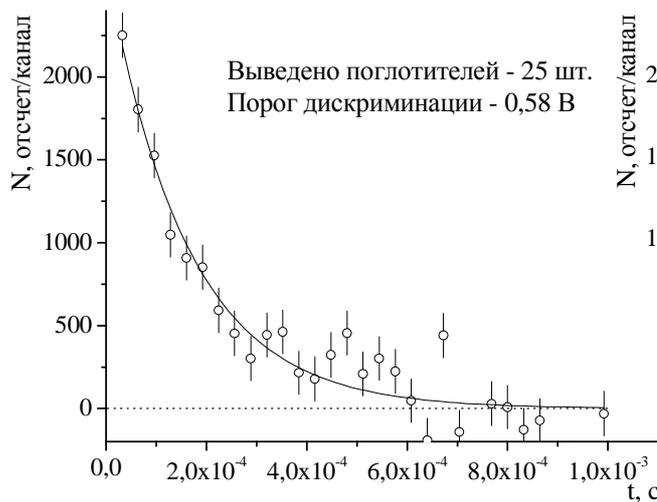


Рис. 9

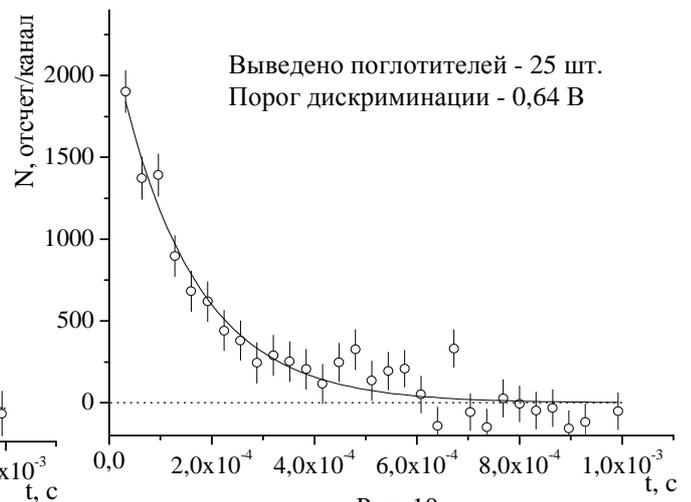


Рис. 10

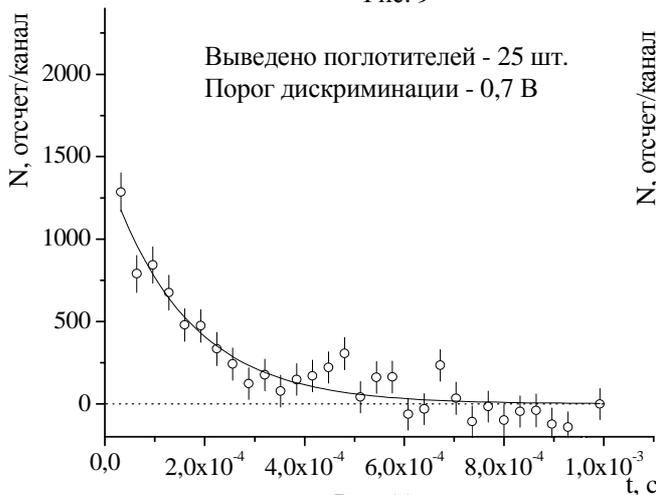


Рис. 11

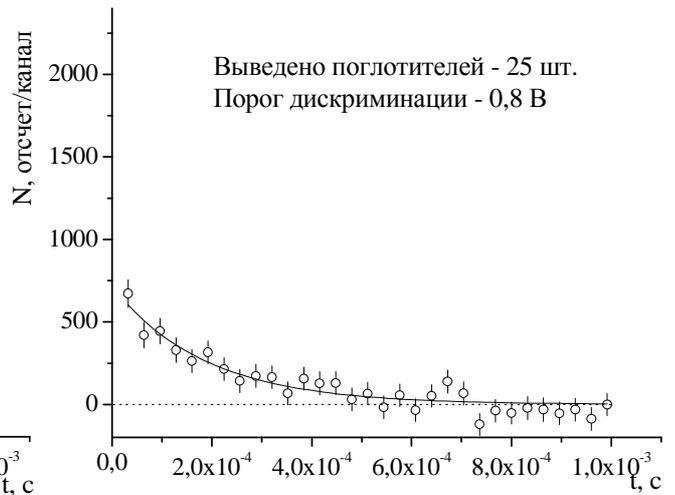


Рис. 12

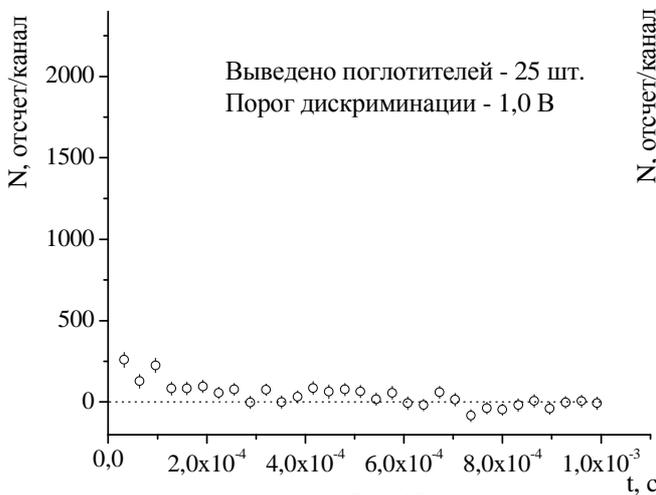


Рис. 13

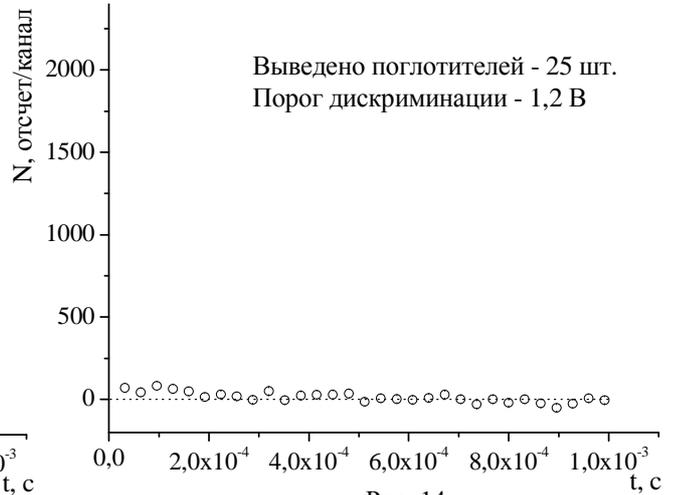


Рис. 14

Анализ результатов измерений и выводы

Исходя из достигнутой статистической точности измерений в рамках метода росси-альфа [6 - 8], был проведен анализ временных спектров, соответствующих четырем уровням $U_d = 0,58 \text{ В}, 0,64 \text{ В}, 0,7 \text{ В}, 0,8 \text{ В}$. В соответствии с этим анализом к полученным экспериментальным результатам подгонялась по методу χ^2 расчетная функция, представленная на рисунках кривыми (см. [1, 9]):

$$N = 0,5 \cdot T_{\text{экс}} \cdot n_0 \cdot dt \cdot \alpha \cdot Z \cdot e^{-\alpha \cdot t}, \quad (1)$$

здесь α - константа спада мгновенных нейтронов (константа росси-альфа), определяемая соотношением

$$\alpha = \frac{1 - k_{эф} (1 - \beta)}{l}, \quad (2)$$

где l - эффективное время жизни нейтронов в реакторе; β - доля запаздывающих нейтронов. Величина Z определяется из выражения

$$Z = \varepsilon_n D_v / \rho_p^2, \quad (3)$$

где ρ_p - реактивность; D_v - параметр Дайвена; ε_n - эффективность регистрации нейтронов.

Подгоночными параметрами были величины Z и α . Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты обработки части экспериментальных данных, полученных при проведении нейтронных измерений в ХОЯТ исследовательского реактора ВВР-М ИЯИ НАН Украины

Количество выведенных нейтронпоглощающих стержней, шт.	Порог дискриминации U_d , В	α , c^{-1}	$Z \cdot 10^{-4}$	Z/n_0 , С	Вклад гамма-квантов в n_0 , %
0 шт. ($T_{\text{эсп.}} = 29$ ч)	0,58	6198 ± 545	$28,2 \pm 3,6$	$4,70 \cdot 10^{-5}$	14
	0,64	5602 ± 584	$30,2 \pm 4,1$	$6,04 \cdot 10^{-5}$	4
	0,7	5405 ± 717	$25,7 \pm 4,4$	$6,42 \cdot 10^{-5}$	0,1
	0,8	5905 ± 838	$19,5 \pm 3,5$	$6,50 \cdot 10^{-5}$	0,0
25 шт. ($T_{\text{эсп.}} = 45$ ч)	0,58	6201 ± 608	$27,6 \pm 3,9$	$4,60 \cdot 10^{-5}$	10
	0,64	6665 ± 570	$26,4 \pm 3,1$	$5,27 \cdot 10^{-5}$	4
	0,7	6292 ± 716	$22,1 \pm 3,3$	$5,51 \cdot 10^{-5}$	0,2
	0,8	5336 ± 665	$17,2 \pm 2,3$	$5,75 \cdot 10^{-5}$	0,0

Видно, что в обеих сериях измерений как до, так и после выведения 25 нейтронпоглощающих стержней полученные величины α не отличаются между собой в пределах ошибок измерения и средняя величина $\alpha \approx 6000 \text{ c}^{-1}$.

Эти данные позволяют провести расчеты $k_{эф}$ после того, как будет определено время жизни нейтронов на основе численных модельных расчетов размножающих свойств отработанного ядерного топлива в хранилище реактора.

Предварительные расчеты показали, что по состоянию на момент проведения эксперимента время жизни нейтронов в ХОЯТ составляло $1,5 \cdot 10^{-4}$ с, тогда в соответствии с уравнением (2) $k_{эф}$ равно 0,1.

В табл. 2 также представлены отношения Z/n_0 .

Величины Z , как видно из соотношений (1) и (3), и n_0 изменяются при изменении U_d пропорционально изменению ε_n . Однако если n_0 изменяется прямо пропорционально изменению вклада в скорость счета, связанного с многократным наложением импульсов от гамма-квантов, то при этом величина Z , получаемая из подгонки расчетной функции (1), изменяется обратно пропорционально. Вычисленное изменение вклада гамма-квантов в n_0 , при изменении U_d , представлено в последней колонке табл. 2. Видно, что в данных измерениях, при порогах дискриминации, превышающих 0,7 В, вклад от гамма-квантов отсутствовал, а при более низких порогах он не превышал 14 %. Эти выводы согласуются с оценками, сделанными в работах других авторов [10].

Следует особо отметить, что при проектировании размеров ХОЯТ для заданного количества и качества ТВС определяющим является ожидаемая величина $k_{эф}$, которая для этого определяется расчетным путем. Как видно из уравнения (2), для оценки $k_{эф}$ необходимо рассчитать две переменные величины α и l . Ошибки расчетных оценок α и l задают величину

неопределенности в оценке $k_{эф}$. Если же величину α определить более точно путем экспериментальных измерений, тогда и неопределенность в оценке $k_{эф}$ также уменьшится. В нашем случае это позволит уменьшить ограничения, накладываемые на количество ТВС, хранящихся в данном ХОЯТ. В дальнейшем результаты экспериментальных измерений величин α могут быть использованы при проектировании новых ХОЯТ, а разработанная методика может использоваться для постоянного эффективного контроля величины $k_{эф}$ в существующих ХОЯТ.

В заключение можно отметить, что для повышения эффективности используемой методики и повышения точности получаемых результатов, в первую очередь, желательно найти методическое решение, которое позволит исключить влияние на результаты измерений инструментальных и методических погрешностей, обусловленных наличием значительных помех в цепях силового питания вторичной аппаратуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключников А. А., Олейник Е. Е., Кучмагра А. А. и др. Статистические измерения подкритичности в условиях объекта "Укрытие" // Проблемы Чернобиля. - 2004. - Вып. 14. - С. 81.
2. Бадковский В. П., Ключников А. А., Кучмагра А. А. и др. Развитие методов шумовой диагностики скоплений ядерноопасных делящихся материалов объекта "Укрытие" // Там же. - 2002. - Вып. 9. - С. 76.
3. Ключников А. А., Кучмагра А. А., Олейник Е.Е. и др. Разработка методики измерения эффективного коэффициента размножения скоплений топливосодержащих материалов на основе методов шумовой диагностики // Там же. - 2002. - Вып. 12. - С. 154.
4. Ключников А. А., Кучмагра А. А., Котляров В. Т. и др. Адаптация методики статистических измерений подкритичности к условиям объекта "Укрытие" // Там же. - 2002. - Вып. 13. - С. 33.
5. Краснянская О. Г., Кучмагра А. А., Одинокин Г. И. и др. Использование "утеплителей" при измерении нейтронных потоков топливосодержащих материалов объекта "Укрытие" // Там же. - 2003. - Вып. 12. - С. 37.
6. Babala D. On the theory of rossi-alpha experiment in reactor noise studies // Nucl. Sci. Engng. - 1966. - Vol. 26. - P. 418 - 419.
7. Mihalcz J.T. Prompt neutron decay and reactivity measurements in subcritical uranium metal cylinders // Ibid. - 1968. Vol. 32. - P. 292 - 301.
8. Spriggs G. D. Two rossi- β techniques for measuring the effective delayed neutron fraction // Ibid. - 1993. - Vol. 113. - P. 161-172.
9. Уриг Р. Статистические методы в физике ядерных реакторов // Пер. с англ. - М.: Атомиздат, 1974. - С. 31 - 33.
10. Беляев С. Т., Бондаренко Л. Н., Боровой А. А. и др. Техника и методы изучения нейтронно-физических характеристик топливосодержащих масс 4-го энергоблока ЧАЭС. - М., 1991. - 23 с. - (Препр. / Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова; ИАЭ-5312/3).

Поступила в редакцию 30.08.04,
после доработки - 26.10.04.

**15 СТАТИСТИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ КОНСТАНТИ СПАДУ МИТТЄВИХ
НЕЙТРОНІВ У СХОВИЩІ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА**

**О. О. Ключников, О. А. Кучмагра, В. М. Макаровський, Г. І. Одинокін,
Є. Є. Олійник, В. М. Павлович, С. А. Стороженко, В. Б. Шостак, С. В. Ярошенко**

Описано експеримент із застосуванням апаратурно-методичної системи вимірювання нейтронних шумів паливовмісних матеріалів і приведено результати вимірювань константи спаду миттєвих нейтронів розподілу у сховищі відпрацьованого ядерного палива реактора ВВР-М.

**STATISTICAL MEASUREMENTS OF CONSTANT OF SLUMP OF INSTANTANEOUS
NEUTRONS IN THE DEPOSITORY OF THE WORKED NUCLEAR FUEL**

**A. A. Kliuchnykov, A. A. Kuchmagra, V. N. Makarovski, G. I. Odinokin, E. E. Olejnik,
V. N. Pavlovich, S. A. Storozhenko, V. B. Shostak, S. V. Yaroshenko**

Experiment with application methodical system for FCM neutron noise measurement is described, and results of measurements of constant slump instantaneous neutrons in the depository of the spend nuclear fuel are submitted.