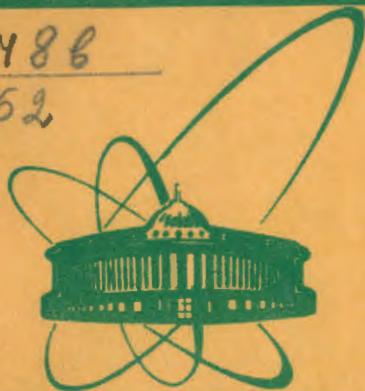


СЗУ86

Г-962



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

3939/4-79

PЗ - 12449

В.В.Гусев, В.Гудовский, В.В.Дмитренко,
А.И.Ефанов, В.Л.Ломидзе, В.С.Лаврухин,
В.В.Мелихов, Ю.Н.Пепельшев, А.Д.Рогов,
Ю.В.Фоминых, Е.П.Шабалин

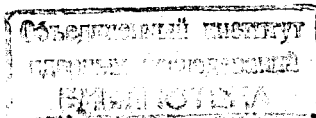
ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК РЕАКТОРА ИБР-2.
ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ
ПОКОЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ

1979

РЗ - 12449

В.В.Гусев, В.Гудовский, В.В.Дмитренко,
А.И.Ефанов, В.Л.Ломидзе, В.С.Лаврухин,
В.В.Мелихов, Ю.Н.Пепельшев, А.Д.Рогов,
Ю.В.Фоминых, Е.П.Шабалин

ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК РЕАКТОРА ИБР-2.
ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ
ПОКОЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ



Гусев В.В. и др.

РЗ - 12449

Физический пуск реактора ИБР-2. Измерения среднего времени жизни поколения нейтронов

Измерено среднее время жизни поколения нейтронов τ в реакторе ИБР-2 во время его физического пуска без теплоносителя. Исследуется влияние на величину τ отдельных элементов конструкции реактора. Непосредственно величина τ измерялась с помощью метода Росси- α , анализа формы реакторной вспышки, зависимости дисперсии энергии импульсов от средней мощности, а также из анализа спектральной плотности шумов тока ионизационной камеры. Во всех измерениях использовались ионизационные камеры деления. Значения τ , измеренные различными методами, в пределах ошибки согласуются между собой и составляют в зависимости от конструктивных особенностей реактора 46-83 нс. Показано, что отличие расчетного значения $\tau = 42$ нс от экспериментальных объясняется недооценкой в расчетах некоторых элементов подвижного отражателя. Приводятся рекомендации, позволяющие уменьшить τ до $50 \div 55$ нс.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Gusev V.V. et al.

РЗ - 12449

Reactor IBR-2 Physical Start-Up. Prompt Neutron Life Time Measurement

Prompt neutron life time τ for the IBR-2 core without sodium was measured by means of Rossi- α method, comparison between experimental and calculated neutron pulse shape, power spectra analyses, and experimental dependence of the peak pulse power dispersion upon a mean power of the reactor. Fission chambers were used for these purposes. The role of various reactor components, which effect on τ value, was investigated. Experimental value of τ depends on constructional features of the outer environment of the core and ranges from 46 up 83 ns. The theoretical value of 42 ns differs from experimental one mainly because of some features of the moving reflector device which has not been taken into consideration for the calculations performed. The recommendations are given which allow to diminish τ upto $50 \div 55$ ns.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

Среднее время жизни поколения нейтронов в реакторе τ является одной из важнейших констант, характеризующих развитие цепной реакции во времени. В частности, для импульсных реакторов величина τ определяет длительность импульса мощности θ .

В настоящей работе представлены результаты измерений τ , полученные во время физического пуска реактора ИБР-2 без теплоносителя. Исследуется влияние отдельных элементов конструкции реактора на величину τ , приводится анализ ошибок измерений.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В основном использовались два метода измерения τ : метод Росси- α ^{1-3/} и метод оценки τ из анализа экспериментальной формы импульса мощности. Дополнительно /см. приложения 1,2/ величина τ определялась по измеренной зависимости дисперсии энергии импульсов от средней мощности, а также из анализа спектральной плотности шумов тока ионизационной камеры при регистрации нейтронов.

В методе Росси- α непосредственно измеряется постоянная спада цепочки мгновенных нейтронов

$$a = \frac{1 - k_p}{\tau},$$

/1/

где $k_p = k(1-\beta)$ - коэффициент размножения на мгновенных нейтронах, β - эффективная доля запаздывающих нейтронов. В критическом реакторе ($k=1$) $a = a_0 = \beta/\tau$. Постоянная a связана

с условной вероятностью $P(t)dt$ зарегистрировать нейтрон в момент времени t /в интервале dt /, если предыдущий отсчет детектора произошел в момент $t=0$. В одноточечной модели кинетики для $P(t)dt$ справедлива известная формула Орндорфа^{1/}:

$$P(t)dt = \xi F \cdot dt + \xi \frac{D_p \cdot k_p^2}{2(1 - k_p) \tau} e^{-at} dt. \quad /2/$$

Здесь ξ - эффективность детектора в отсчетах на деление, F - скорость делений, D_p - параметр Дайвена, равный $0,815 \pm 0,017$ для ^{239}Pu .

Непосредственное определение τ из измеренного значения амплитуды при экспоненте в уравнении /2/ дает несколько иные результаты, чем τ , полученное из экспоненциального спада. Наиболее корректно /в методическом смысле/ величина τ получается из анализа константы спада измеренной зависимости^{3/}.

При измерениях вероятности $P(t)\Delta t$ использовался временной анализатор с шириной канала $\Delta t = 0,5$ мкс и числом каналов $N = 1024$. Измерения проводились с помощью одной из ионизационных камер деления на ^{235}U или ^{238}U /эффективный порог деления $0,8$ МэВ/, которые устанавливались в центре реактора. Эффективность камер к нейтронам спектра деления $\sim 10^{-5}$ имп/дел. Из-за наличия источника спонтанных нейтронов выбор приемлемой скорости делений F мог быть осуществлен только за счет изменения подкритичности $1 - k_p$ /с соблюдением условия $1 - k_p \sim \tau / (15 \div 30) \Delta t$.

Время измерений T при заданных ширине канала Δt , числе импульсов в канале N_k , средней скорости счета ξF и числе каналов N оценивалось по формуле

$$T = \frac{N_k}{(\xi F)^2 \Delta t} \left(\frac{1}{N} + N \cdot \xi F \right). \quad /3/$$

Второй метод заключался в обработке одиночного токового сигнала с ионизационной камеры, форма которого с точностью 2,5% соответствовала измеряемому импульсу мощности. При выбранной надлежащим образом величине τ экспериментальная форма импульса мощности в пределах указанной ошибки совпадает с расчетной /за исключением "хвостов" импульса, где отличие несколько больше/.

Остальные два метода, которые использовались дополнительно, описаны в приложениях 1-2.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

При обработке России-а измерений /методом наименьших квадратов/ учитывалась возможность отклонения экспериментальной зависимости $P(t)$ от одноточечного представления /2/. Поэтому полученные на временном анализаторе гистограммы аппроксимировались функцией

$$P(t) = B + \sum_{i=1}^n A_i e^{-\alpha_i t}, \quad /4/$$

с минимизацией χ^2 , члены которого взвешивались со статистической ошибкой, зависящей от числа отсчетов N_k в канале анализатора. Ошибка в определении α корректировалась с учетом χ^2 :

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_{\text{расч.}} \cdot [\chi^2 / (N - K)]^{1/2}. \quad /5/$$

Здесь N - число экспериментальных точек, K - число анализируемых параметров. Во всех измерениях число n обнаруженных программой экспонент не превышало двух.

На рис. 1 представлен типичный результат обработки экспериментальной зависимости $P(t)$, полученной с помощью камеры на ^{235}U , с использованием одной и двух экспонент в выражении /4/. Для камеры на ^{238}U отношение эффекта к фону A/B было в $\sim 1,4$ раза больше, чем в предыдущем случае, и разброс экспериментальных точек несколько превышал статистические флуктуации. Результаты измерений α согласуются между собой для обоих типов камер.

На рис. 2 приведена зависимость постоянной спада мгновенных нейтронов α от степени подкритичности реактора $-\rho = \frac{1-k}{\beta}$. Экстраполированное в состояние критичности ($k=1$) значение $\alpha = \alpha_0$ равно $2,8 \cdot 10^{-2}$ мкс⁻¹.

Статистическая точность регистрации экспоненциального спада уже в области времен $t > 3/a$ была недостаточной, поэтому однозначного ответа о наличии в экспериментальной кри-

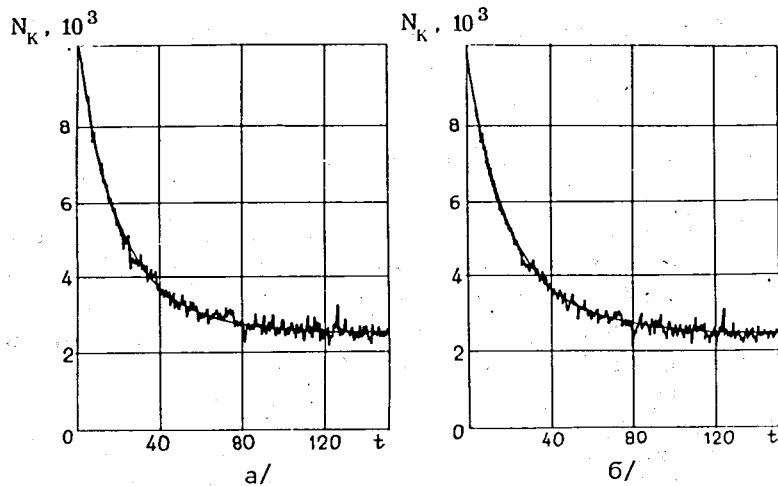


Рис. 1. Число отсчетов в канале временного анализатора N_k в зависимости от времени t /мкс/. Сплошная линия - результат аппроксимации на ЭВМ, а - аппроксимация одной экспонентой, б - аппроксимация двумя экспонентами. Активная зона окружена замедлителями.

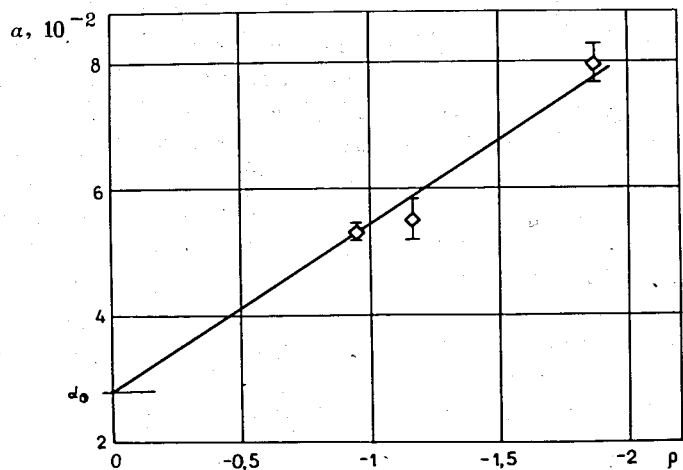


Рис. 2. Величина α как функция реактивности ρ в долях β для реактора, окруженного замедлителями. Прямая - результат аппроксимации экспериментальных точек.

вой только одной или только двух экспонент получить не удалось. Статистические критерии /например, критерий χ^2 / ввиду больших расчетных значений χ^2 оказались неэффективными. Отсюда предположение о наличии в экспериментальной кривой двух экспонент не отвергает возможности аппроксимации Росси-а измерений только одной экспонентой. На это указывает и тот факт, что измеренная форма импульса мощности ИБР-2 практически совпадает с расчетной, полученной на основе одноточечной модели. Тем не менее, зарегистрированная программой возможность присутствия второго экспоненциального члена в $P(t)$ учитывалась при определении среднего значения τ в качестве дополнительного метода измерения.

При измерении в импульсном режиме значение τ получали следующим образом. Варьированием параметра τ ширина импульса мощности на половине высоты, получаемая из численного решения уравнения кинетики, сравнивалась с экспериментальной. При обработке использовались экспериментальные значения параметров подвижного отражателя, от которых зависит длительность нейтронной вспышки /см. рис. 3/.

Полученные таким образом значения τ приведены в табл. 1, в которой метод Росси-а включает в себя два метода оценки τ : один учитывает наличие второй экспоненты в $P(t)$, другой - нет. В той же таблице приведены значения τ , усредненные по всем методам, кроме метода измерения τ из анализа реакторных шумов /см. приложение 2/. Результирующее среднее значение τ оценивалось с помощью соотношения

$$\tau = \frac{\sum_i \tau_i \sigma_i^{-2}}{\sum_i \sigma_i^{-2}},$$

где τ_i - среднее значение τ в i -ом методе, σ^2 - дисперсия τ в i -ом методе. Результирующая ошибка определялась как средневзвешенное по всем методам значение

$$\Delta\tau = \left(1 / \sum_i \sigma_i^{-2}\right)^{1/2}.$$

Следует отметить, что результирующее среднее значение τ практически совпадает с результатом Росси-а измерений в предположении, что спад нейтронной цепочки описывается только одной экспонентой $\sim e^{-at}$ /см. приложение 3/.

Таблица 1

Влияние замедлителей* и элементов конструкции подвижного отражателя на величину τ

№	Росси-а	Форма импульса	Результирующее
	τ , нс	τ , нс	τ , нс
1. ДПО** - Ве ИХЗ - есть замедлители 1,2,3	83±2	90±9	83±2
2. ДПО - Ве ИХЗ - нет замедлители - нет		72±7	72±7
3. ДПО - Ве ИХЗ - есть замедлители - нет		78±8	78±8
4. ДПО - Al ИХЗ - есть замедлители - 3 кожуа ПО-нет***	52±0,5		52±0,5
5. ДПО - Fe ИХЗ - есть замедлители - нет кожуа ПО - нет***	46,7±0,5		47±0,5
6. ДПО - Al/диск/ ИХЗ - есть замедлители - 1,2		64±7	64±7

* Помимо трех водяных замедлителей исследуется влияние имитатора холодного замедлителя /ИХЗ/. Замедлители №1, 2 расположены за компенсаторами реактивности, замедлитель №3 - за подвижным отражателем. ИХЗ помещался за блоками МАЗ.

** Дополнительный подвижный отражатель.

*** Отсутствует также алюминиевый диск ДПО /установлен ДПО в виде лопасти/.

Примечание: В погрешность величины τ не включена погрешность градуировки реактивности, составляющая ±10%.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе данных табл. 1 получены значения $\delta\tau$, вносимые различными компонентами реактора в общее время жизни. Влияние отдельных элементов на величину τ , очевидно, связано с обратным рассеянием нейтронов в активную зону. Так, вольфрамовый отражатель и тонкий слой бористой стали со стороны имитатора холодного замедлителя недостаточно экранирует активную зону /АЗ/ от влияния медленных и резонансных нейтронов, рассеянных на замедлителе. В то же время более толстый слой бористой стали и компенсаторы реактивности надежно экранируют активную зону от основных замедлителей №1,2. Они практически не влияют на τ .

Таблица 2

Величина $\delta\tau$, вносимая различными компонентами реактора в среднее время жизни нейтронов

№	Название элемента конструкции реактора	$\delta\tau$, нс	Погрешность величины $\delta\tau$, нс
1.	Основные замедлители /№1,2/	~0	±5
2.	Замедлитель со стороны подвижного отражателя /№3/	+5,3	±0,5
3.	Имитатор холодного замедлителя	+6	±6
4.	Замена бериллиевого дополнительного отражателя на алюминиевый	-14	±7
5.	Замена штатного подвижного отражателя макетом без кожуа /без учета ДПО/	-18	±17

Особенно сильно эффект обратного рассеяния нейтронов проявляется для кожуха ПО, охлаждаемого водой, со стороны которого АЗ плохо защищена от попадания медленных нейтронов.

Как видно из табл. 2, наибольший вклад в общее τ вносят именно элементы модулятора реактивности. Бериллиевый блок ДПО в положении, соответствующем максимальному значению реактивности, лишь частично отдален от АЗ лопастью ПО. Поэтому его влияние на τ более существенно, чем влияние замедлителя №3, расположенного дальше от АЗ за ДПО. В то же время измерения с макетом ПО, лишенным кожуха, алюминиевого диска ДПО и биологической защиты, показали довольно большое влияние указанных элементов конструкции ПО на величину τ . В отсутствие этих конструкций измеренное значение τ близко к расчетному /42 нс/ ^{4/}.

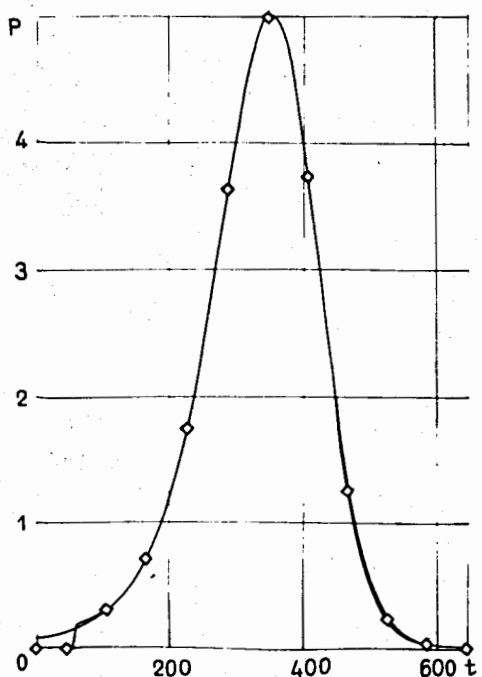


Рис. 3. Форма импульса мощности при $f = 50$ имп/с. Все замедлители отсутствуют. $\theta = 181$ мкс. \diamond - эксперимент, сплошная линия - расчет по одноточечной модели с подобранным значением $\tau = 72$ нс.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В реакторном режиме работы ИБР-2 для существующей компоновки активной зоны можно ввести однокорпусное значение τ , согласованное с измерениями Росси-а и формой импульса мощности.

2. Экспериментально наблюдаемое значение $\tau = 83$ нс почти в два раза превышает расчетное, равное 42 нс ^{4/}. Отличие прежде всего объясняется недооценкой в расчетах некоторых элементов реактора - бериллиевого ДПО, замедлителя за ДПО и кожуха ПО.

3. Основные мероприятия, направленные на уменьшение τ , могут быть следующие: усиление со стороны ПО и МАЗ экранов, поглощающих эпитепловые нейтроны, а также замена бериллиевого вкладыша ДПО на Fe или Al. Возможно, что замена водяного охлаждения кожуха ПО на газовое также снизит τ . Эти мероприятия позволят реализовать значение $\tau \approx 50-55$ нс, что эквивалентно сокращению длительности импульса мощности только за счет уменьшения τ на ~ 30 мкс.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Время жизни нейтронов τ связано с относительной дисперсией распределения числа импульсов мощности по энергии σ^2 в следующем виде ^{5/}

$$\sigma^2 = \Delta^2 (1 + \delta_0^2) + \delta_0^2, \quad /7/$$

где $\Delta^2 = D_v / 2s \cdot \tau$ - относительная дисперсия стохастических флуктуаций мощности, D_v - параметр Дайвена /определен выше/, $S = S_{сп} + \beta W$ - интенсивность постоянно действующего во время импульса источника нейтронов /спонтанного $S_{сп}$ и запаздывающих нейтронов /в дел/с; W - средняя мощность в дел/с, δ_0^2 - относительная дисперсия энергии им-

пульсов без учета стохастических флуктуаций. Если $\beta W \gg S_{\text{сп}}$ / $W \gg 3 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/н}$ и $\delta_0^2 \ll 1$ ($\delta_0^2 = 3 \cdot 10^{-4}$), то

$$\sigma^2 = \delta_0^2 + \frac{D}{2 \cdot \beta \cdot \tau W} \quad \text{и} \quad \tau = \frac{6,08}{d\sigma^2/dW^{-1}} \text{ нс.}$$

Эффективная доля запаздывающих нейтронов принималась равной $2,16 \pm 0,2 \cdot 10^{-3}$. Величина σ^2 в выражении /7/ измерялась на ЭВМ PDP-11/20 в режиме "on-line".

Импульсы тока с ионизационной камеры деления, соответствующие импульсам мощности, интегрировались во временном окне $\Delta T \gg \theta$, синхронизованном с импульсом мощности, для получения сигнала, пропорционального энергии импульса, и подавались на амплитудный кодировщик с числом каналов, равным 4096.

Дисперсия σ^2 вычислялась после накопления в памяти ЭВМ 10^4 событий. Уровень средней мощности мониторировался по то-

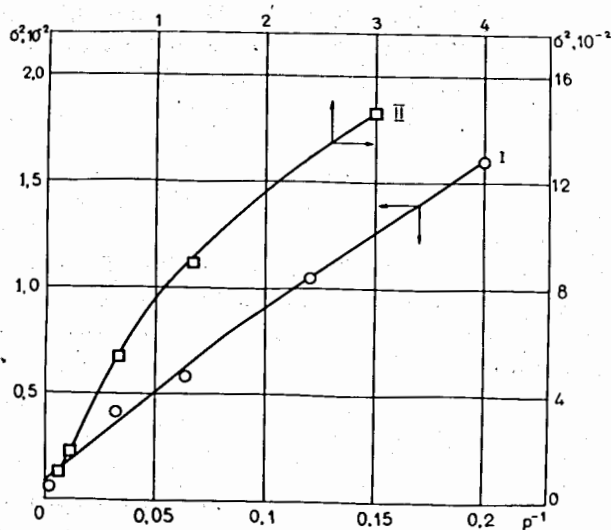


Рис. 4. Относительная дисперсия энергии импульсов мощности как функция $1/P$ в Вт^{-1} / в тексте средняя мощность обозначена W /. Активная зона окружена замедлителями. Частота импульсов мощности $f = 50 \text{ имп./с}$.

ковому сигналу с дополнительной ионизационной камеры. Абсолютная "привязка" к мощности осуществлялась по измерению тепловыделения в активной зоне.

На рис. 4 приведена зависимость σ^2 как функция $1/W$. Для линейной части этой зависимости величина $d\sigma^2/dW^{-1} = 6,8 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}^{-1}$. Отсюда τ для активной зоны, окруженной замедлителями, равно $80 \pm 10 \text{ нс}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Как известно ^{8/}, спектральная плотность шумов тока ионизационной камеры /ИК/ $S(\omega)$ может быть представлена в виде

$$S(\omega) = a + b |H(\omega)|^2, \quad /8/$$

где a, b - коэффициенты, величина которых зависит от конкретных условий эксперимента.

Передачная функция критического реактора при частотах $\omega \gg \lambda_{i \max} / \lambda_{i \max}$ - постоянная распада наиболее короткоживущей группы источников запаздывающих нейтронов/:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{a^2}{a^2 + \omega^2}, \quad \text{где} \quad a = \beta/\tau.$$

Аппроксимация измеренной зависимости выражением /8/ позволяет определить a . Измерения проводились с помощью спектроанализатора в диапазоне частот от 1 до 60 кГц. Заметим, что величина a для быстрых реакторов лежит в области $10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$, а ИК обычно подавляет частоты более 10^3 с^{-1} . Поэтому была применена специальная схема, расширяющая частотный диапазон измерений, и дополнительная коррекция экспериментальных данных на экспериментально определенную частотную характеристику всей измерительной схемы.

В качестве детектора нейтронов использовалась ИК КНТ-31, установленная в центре активной зоны. Экспериментальные кривые спектральной плотности и результаты аппроксимации методом наименьших квадратов с поиском оптимальных значений параметров a, b, α показаны на рис. 5. Измерения τ , проведенные на различных уровнях мощности от 10 до 100 Вт,

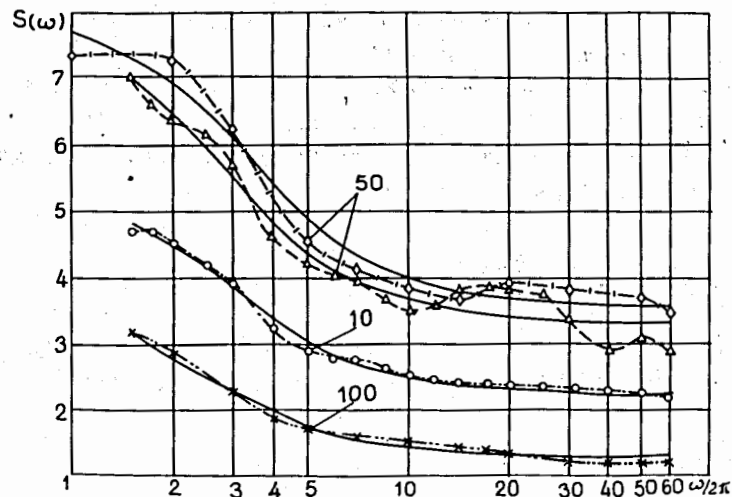


Рис. 5. Экспериментальные кривые относительных значений спектральной плотности шумов тока ионизационной камеры $S(\omega)$. Кривые проведены с помощью метода наименьших квадратов. Сплошные линии проведены с учетом оптимизации экспериментальных параметров, входящих в $S(\omega)$. Цифрами у кривых показаны значения средней мощности в ваттах.

приводят к существенно отличающимся результатам /от 110 до 150 нс/ с усредненным /по всем измерениям/ значением $\tau = 130 \pm 20$ нс. В ошибку величины τ входит погрешность определения величин α и β , но не входят систематические ошибки, связанные с измерением $S(\omega)$.

Полученное значение τ оказалось существенно большим, чем измеренное другими методами / $\tau = 83$ нс/.

Это отличие, возможно, возникло в результате систематической ошибки в измерении $S(\omega)$, обусловленной недостаточным учетом частотной характеристики измерительного тракта. Кроме того, на $S(\omega)$, возможно, сказывается "смягчение" нейтронного спектра в месте установки детектора /непосредственно рядом с ИК в АЗ помещался предусилитель/. Учесть этот эффект было практически невозможно.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Результаты обработки России-а измерений при различных гипотезах о характере спада нейтронной цепочки

τ , нс	ИХЗ есть, ДПО-Fe замедлит. №1,2,3 нет (I)	ИХЗ,замед. №3 есть,ДПО-Al замедлит. №1,2 нет (II)	Все замедлители есть, штатный вариант ДПО-ОПО
$\tau \pm \Delta\tau$	46,7 \pm 0,5	52 \pm 0,5	79 \pm 2
χ^2_p	2,7	3	1,8
	$P(t) = B + \sum_{i=1}^2 A_i e^{-\alpha_i t}$		
A_1	9840 \pm 490	12280 \pm 1230	2550 \pm 40
$\tau_1 \pm \Delta\tau_1$	26 \pm 2	13 \pm 1	50 \pm 3
A_2	4140 \pm 620	7440 \pm 2600	1670 \pm 20
$\tau_2 \pm \Delta\tau_2$	82 \pm 7	68 \pm 2	134 \pm 9
χ^2_p	1,34	1,64	1,56
$\tau_A \pm \Delta\tau_A$	60 \pm 10	55 \pm 4	103 \pm 7
$\tau_s \pm \Delta\tau_s$	43 \pm 4	33 \pm 7	83 \pm 6
$\tau^* \pm \Delta\tau^*$	46,7 \pm 0,5	52 \pm 0,5	81 \pm 2
$\bar{\tau} \pm \Delta\bar{\tau}$			83 \pm 2

Примечания к таблице:

- I, II - измерения с макетом подвижного отражателя;
- τ_A - значение, полученное при усреднении τ_1 и τ_2 при взвешивании по амплитудам соответствующих экспонент;
- τ_s - усредненное τ , взвешенное по площадям соответствующих экспонент;
- τ^* - результирующее среднее значение τ , полученное в одном измерении;
- $\bar{\tau}$ - результирующее среднее значение τ , полученное из нескольких измерений;
- χ^2_p - расчетное значение χ^2 на одну степень свободы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Orndoff J.P. Nucl. Sci. Eng., 1957, v. 2, p. 450.
2. Mihalcz J. T. Static and Dynamic Experiments with a Repetitively Pulsed Booster. Union Carbide Corporation, Nuclear Division, Oak Ridge, Y-12 Plant.
3. Iijima T., Nukleonik, 1967, v.10, No. 2, p.93.
4. Rogov A.D., Шабалин Е.П. ОИЯИ, РЗ-9990, Дубна, 1976.
5. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. Атомиздат, М., 1976.
6. Кипин Дж.Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. Атомиздат, М., 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 мая 1979 года.