

P3-2005-171

Н. А. Гундорин, К. В. Жданова, В. Е. Жучко,  
Л. Б. Пикельнер, Н. В. Реброва, И. М. Саламатин,  
В. И. Смирнов, В. И. Фурман

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДА ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ  
НЕЙТРОНОВ ПРИ ДЕЛЕНИИ  $^{237}\text{Np}$   
ТЕПЛОВЫМИ НЕЙТРОНАМИ

Гундорин Н. А. и др.

P3-2005-171

Измерение выхода запаздывающих нейтронов при делении  $^{237}\text{Np}$  тепловыми нейтронами

В работе сообщается об измерении выхода запаздывающих нейтронов  $\nu_d$  при делении  $^{237}\text{Np}$  тепловыми нейтронами. В эксперименте использовался метод, основанный на периодическом облучении образца импульсным нейтронным пучком с последующей регистрацией нейтронов в интервалах между импульсами. Метод реализован на установке «Изомер-М», расположенной на канале импульсного реактора ИБР-2. Приводится описание установки и методики эксперимента, проводится тщательный анализ фоновых процессов, демонстрируются результаты измерений.

Полученное в работе значение полного выхода запаздывающих нейтронов при делении  $^{237}\text{Np}$  тепловыми нейтронами составляет  $\nu_d = 0,0115 \pm 0,0010$ .

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Фрнака ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2005

Gundorin N. A. et al.

P3-2005-171

Measurement of Delayed Neutron Yields from Thermal Neutron Induced Fission of  $^{237}\text{Np}$

This paper reports about the measurement of delayed neutron yields from a thermal neutron induced fission of  $^{237}\text{Np}$ . The method based on periodic irradiation of the sample in pulsed neutron beam with the subsequent registration of neutrons in intervals between pulses is used in the experiment. The method is realized on the «Isomer-M» installation, located on the channel of the IBR-2 pulsed reactor. A description of the installation and a technique of the experiment are presented, a thorough analysis of background processes is performed, results of measurements are shown in this paper.

The value of delayed neutron yields from thermal neutron induced fission of  $^{237}\text{Np}$  obtained in the present investigation is  $\nu_d = 0.0115 \pm 0.0010$ .

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2005

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, деление ядер тепловыми нейтронами сопровождается испусканием нескольких мгновенных нейтронов деления. Образовавшиеся при этом осколки после  $\beta$ -распада также могут испускать нейтроны, если окажется достаточной энергия их возбуждения. Выход таких запаздывающих нейтронов (ЗН) при делении тяжелых ядер изучался с самого начала использования ядерной энергии, так как испускание ЗН имеет фундаментальное значение для реализации контролируемой цепной ядерной реакции деления. Выходы и временные характеристики ЗН из нейтронно-индуцированного деления главных и минорных реакторных изотопов являются важными ядерными константами, используемыми в расчетах кинетики ядерных реакторов.

Большинство экспериментальных методик измерения выхода запаздывающих нейтронов предусматривают перемещение изучаемого образца от места облучения к детектору для их регистрации. Однако эти методы не являются универсальными, так как не позволяют с хорошей точностью определять характеристики ЗН, испускаемых в первую секунду после акта деления.

Для изучения выхода ЗН при делении тепловыми нейтронами ряда актинидов в 1993–95 гг. в ЛНФ ОИЯИ была создана установка «Изомер», на которой впервые был реализован оригинальный экспериментальный метод [1]. Этот метод базируется на периодическом облучении образца в импульсном нейтронном пучке и измерении выхода ЗН в интервалах между импульсами. При этом мгновенные и запаздывающие нейтроны разделяются с помощью временного анализа и перемещения образца не требуется, так как он находится в непосредственной близости от счетчиков нейтронов. В результате проведения ряда экспериментов с использованием этого метода были получены данные по выходам ЗН при делении изотопов  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  [2].

С целью дальнейшего развития предложенного метода, увеличения эффективности его применения и расширения круга исследуемых ядер в 2004 г. была осуществлена модернизация установки «Изомер» и значительно улучшены ее параметры.

Результаты проведенных после модернизации тестовых измерений выхода ЗН на изотопах  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  согласуются с известными экспериментальными данными, показывают работоспособность установки и эффективность используемой методики. Это позволяет продолжить изучение характеристик ЗН для ряда других малоизученных ядер. К последним может быть отнесен изотоп  $^{237}\text{Np}$ . Сечение деления тепловыми нейтронами для него мало — всего 21 мб, в то время как для быстрых нейтронов с энергией 1–5 МэВ оно составляет

1,5–2 б. Это обстоятельство определяет наличие значительного фона и существенно затрудняет изучение характеристик ЗН при делении  $^{237}\text{Np}$  тепловыми нейтронами. Еще одна особенность этого изотопа — наличие промежуточной структуры в делении, характеризуемой многократно усиленными делительными ширинами групп резонансов в области энергий 40, 120, 200 эВ и т. д. Все это делает измерение выхода ЗН при «тепловом» делении  $^{237}\text{Np}$  сложной экспериментальной задачей.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА «ИЗОМЕР-М»

Схема модернизированной экспериментальной установки «Изомер-М», расположенной на канале 11-Б импульсного реактора ИБР-2, представлена на рис. 1. Канал оборудован изогнутым зеркальным нейтроноводом с ради-

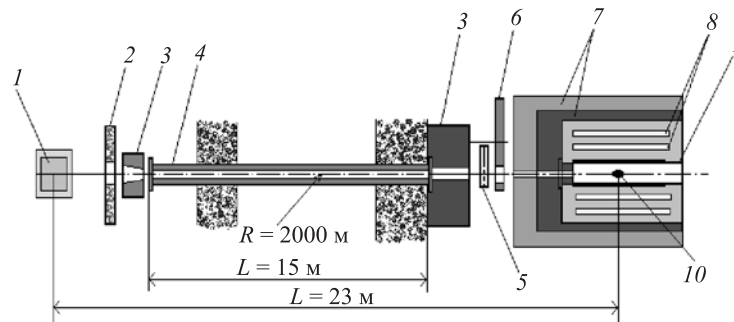


Рис. 1. Схема установки «Изомер-М» на канале 11-Б реактора ИБР-2: 1 — активная зона реактора, окруженная замедлителем; 2, 3 — коллиматоры; 4 — изогнутый зеркальный нейтроновод; 5 — Cd-пинг-понг; 6 — прерыватель; 7 — детектор нейтронов с комбинированной защитой; 8 —  $^3\text{He}$ -счетчики; 9 — Cd-экран; 10 — исследуемый образец

усом кривизны  $R=2000$  м, позволяющим отклонять тепловые нейтроны от направления прямого пучка и тем самым отделять их от сопровождающего потока быстрых нейтронов, доля которых после замедлителя достаточно высока (около 40 % полной интенсивности). Работая в импульсном режиме с частотой повторения 5 Гц и высокой пиковой мощностью (около 1300 МВт), реактор ИБР-2 обеспечивает плотность потока тепловых нейтронов на выходе нейтроновода около  $6 \cdot 10^5$  нейтрон/см<sup>2</sup>·с.

За нейтроноводом установлен медленный прерыватель из кадмия, предназначенный для подавления фона тепловых нейтронов в интервалах между импульсами реактора. Прерыватель синхронизован с импульсами реактора ИБР-2 и настроен таким образом, что пропускает тепловые нейтроны реакторного импульса в течение примерно 18 мс, а на остальное время между

импульсами перекрывает пучок задержанных тепловых нейтронов, идущих из замедлителя реактора. Между нейтроноводом и прерывателем имеется дополнительное устройство с подвижной заслонкой из кадмия (Cd-пинг-понг). Работая в автоматическом режиме, оно позволяет на заданное время полностью перекрывать пучок тепловых нейтронов. Таким образом обеспечивается возможность периодического чередования измерений эффекта и фона в широком временном интервале.

За прерывателем расположен детектор нейтронов, окруженный комбинированной защитой от внешнего фона. Основу детектора составляют пропорциональные  $^3\text{He}$ -счетчики СНМ-33, помещенные в блок из плексигласа с размерами  $50 \times 50 \times 70$  см. По оси блока имеется сквозной канал диаметром 60 мм, в который устанавливается исследуемый образец или, при необходимости, ионизационная камера с образцом. Вокруг канала двумя concentрическими рядами расположены 18 гелиевых счетчиков диаметром 32 мм и длиной 52 см, с давлением 2 ат и рабочим напряжением более 1850 В.

Блок-схема измерительной системы установки показана на рис. 2. Каждый нейтронный счетчик укомплектован отдельным предусилителем. Выход-

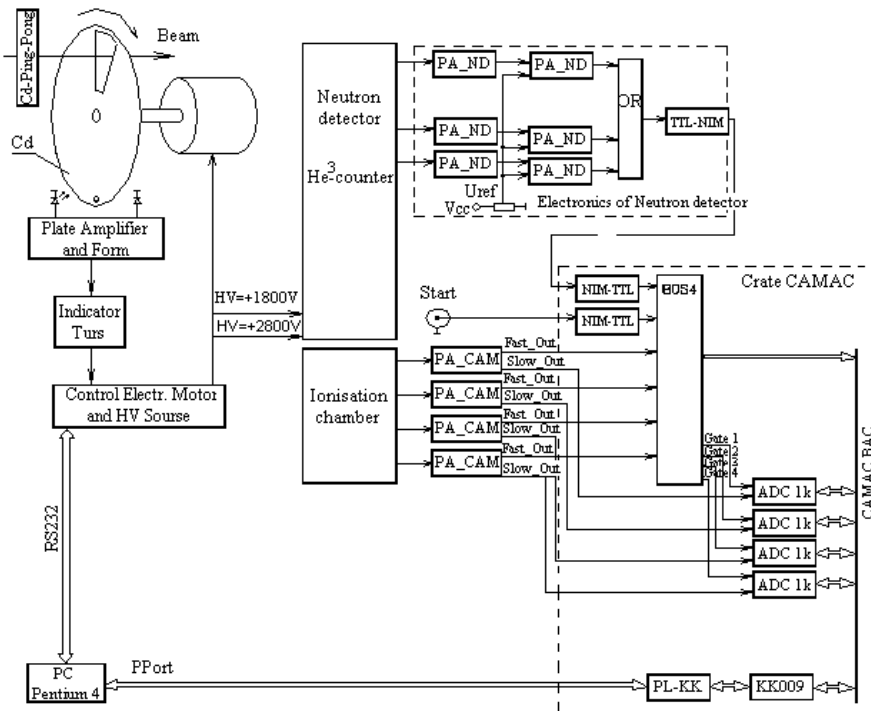


Рис. 2. Блок-схема измерительной системы установки «Изомер-М»

ды предусилителей подключены к входам дискриминаторов с регулируемым порогом. Сигналы с дискриминаторов попадают в блок совпадений BOS 4, наряду со стартовым сигналом от импульса реактора для синхронизации прерывателя и временных измерений. Сигналы от ионизационной камеры, если она установлена вместе с образцом в канале детектирующей системы, подаются на токовые предусилители PA CAM, имеющие быстрые и медленные выходы. Временное разрешение для быстрых триггеров позволяет проводить временной анализ с точностью до 100 нс.

Быстрые сигналы попадают в блок совпадений, который вырабатывает GATE-сигналы для ADC 1k. Медленный выход формируется из быстрого интегрированием. Эти сигналы продолжительностью  $\sim 2$  мкс поступают для анализа на ADC 1k. Информация от BOS 4 и ADC 1k считывается CAMAC-контроллером KK009 и через адаптерный модуль поступает в двусторонний параллельный порт PC.

В ходе модернизации первого варианта установки «Изомер» общая схема ее, представленная на рис. 1, принципиально не изменилась. Однако увеличение числа  $^3\text{He}$ -счетчиков и уменьшение диаметра канала в нейтронном детекторе со 140 до 60 мм привело к росту эффективности регистрации нейтронов. Кроме того, благодаря применению дополнительного устройства Cd-пинг-понг появилась возможность периодического чередования измерений эффекта и фона, что позволяет отслеживать стабильность работы измерительной системы и увеличивает достоверность получаемых экспериментальных данных.

Многофункциональные свойства системы сбора данных позволяют использовать ее возможности гибким образом для экспериментов с различными ядрами-мишенями. Для некоторых из них ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ) достаточно использовать простой временной анализ счета нейтронов от «пассивной» мишени. В этом случае мертвое время измерительной системы минимально и составляет несколько мкс. В случае «активной» мишени, когда необходимо использовать образец, находящийся в ионизационной камере деления для реализации режимов совпадений или антисовпадений с сигналами от камеры, возможно использование дополнительных параметров, регистрируемых измерительной системой. Соответствующее мертвое время системы возрастает до нескольких десятков мкс, но при этом существенно улучшается ее селективность, что в результате приводит к увеличению надежности получаемых экспериментальных данных.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Выход ЗН зависит от времени и описывается в общем виде [3] с помощью так называемой многогрупповой формулы:

$$N_d(t) = N_f \nu_d \varepsilon_d \sum_{i=1}^6 \frac{a_i}{\lambda_i \Delta t} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \Delta t)}{1 - \exp(-\lambda_i T)} \exp(-\lambda_i t), \quad (1)$$

справедливой для временного интервала  $0 < t < T - \Delta t$ . Здесь  $N_f$  — число случаев деления,  $\lambda_i$  и  $a_i$  — константа распада и относительный выход  $i$ -й группы ЗН ( $\sum a_i = 1$ ) соответственно;  $\Delta t$  есть время облучения и  $T$  — интервал между импульсами облучения.

Для групп запаздывающих нейтронов со временем жизни  $\geq 2$  с, составляющих около 85 % всех запаздывающих нейтронов, наклон на участке спектра от 50 до 200 мс не превосходит 2 %, а для групп с меньшим периодом полураспада составляет около 25 %, но сам вес этих групп мал ( $\sim 0,15$ ), так что суммарный наклон на всем участке спектра составляет около 5 %. На основании этого можно считать, что при установившемся равновесном режиме облучения образца и регистрации нейтронов в интервале между импульсами получаемое в эксперименте на установке «Изомер» значение будет отличаться от полного выхода ЗН, описываемого формулой (1), не более, чем на 1,5 %.

В связи с тем, что значение выхода мгновенных нейтронов «теплового» деления  $^{237}\text{Np}$  известно с высокой точностью, задача измерения выхода ЗН для этого ядра может быть сведена к вычислению отношения числа мгновенных и запаздывающих нейтронов, зарегистрированных в эксперименте.

Рассмотрим несколько математических выражений, которые позволяют представить это отношение в аналитическом виде. Число делений, произошедших в образце за все время измерения, определяется выражением

$$N_f = \int \phi(E) n \sigma_f dE, \quad (2)$$

где  $\phi(E)$  — зависящий от энергии поток нейтронов, попавших на образец за все время измерения;  $n$  — число ядер на  $\text{см}^2$  мишени;  $\sigma_f(E)$  — сечение деления ядер мишени. Число мгновенных нейтронов деления  $N_p$  и запаздывающих  $N_d$ , зарегистрированных детектором, равно

$$N_p = N_f \nu_p \varepsilon_p, \quad (3)$$

$$N_d = N_f \nu_d \varepsilon_d. \quad (4)$$

Здесь  $\nu_p$  и  $\nu_d$  — выход мгновенных и запаздывающих нейтронов на акт деления;  $\varepsilon_p$  и  $\varepsilon_d$  — эффективность детектора для мгновенных и запаздывающих нейтронов.

Из отношения (3) и (4) следует соотношение (5), из которого можно определить выход ЗН:

$$\frac{N_p}{N_d} = \frac{\nu_p \varepsilon_p}{\nu_d \varepsilon_d}. \quad (5)$$

Как видно из выражения (5), для определения величины  $\nu_d$  помимо измеренного в эксперименте отношения  $N_p/N_d$  и известной величины  $\nu_p$  необходимо знать отношение эффективностей регистрации мгновенных и запаздывающих нейтронов. Это отношение, зависящее от особенностей используемого детектора нейтронов, можно получить, например, в измерениях с образцом  $^{235}\text{U}$ , для которого  $\nu_p$  и  $\nu_d$  известны с высокой точностью.

**Измерения с  $^{235}\text{U}$ .** На рис. 3 представлены аппаратурные спектры временного анализа, полученные в измерениях с  $^{235}\text{U}$  на установке «Изомер-М». В этих измерениях образец представлял собой алюминиевую фольгу диаметром

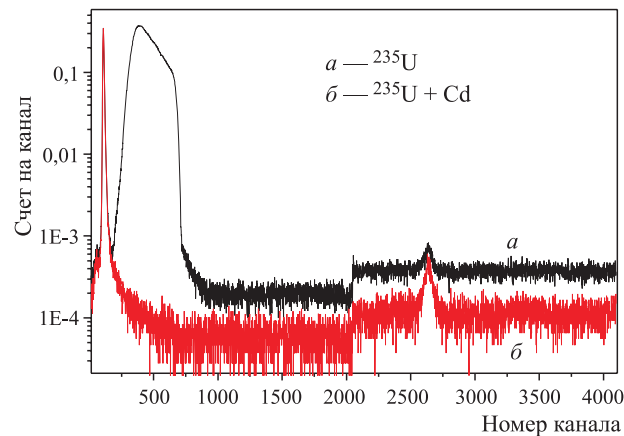


Рис. 3. Аппаратурные спектры временного анализа, полученные на установке «Изомер-М» в измерениях с  $^{235}\text{U}$ : *a* — эффект + фон ( $^{235}\text{U}$ ), *b* — фон ( $^{235}\text{U}+\text{Cd}$ -фильтр)

1 см, на которую было нанесено около 8 мг изотопа  $^{235}\text{U}$ . Режим временного анализа определялся частотой импульсов реактора, равной 5 Гц, и выбирался так, чтобы анализировать большую часть интервала между нейтронными импульсами.

Число временных каналов составляло 4096, ширина канала в первой половине из них была 32 мкс, во второй — 64 мкс. Таким образом, получаемый в измерениях аппаратурный спектр содержал информацию о временном интервале 196,7 мс из 200 мс, составляющих полный интервал между импульсами реактора. Поскольку электронный импульс, запускающий временной анализ, опережает нейтронную вспышку реактора на 3,5 мс, то на спектре импульс быстрых нейтронов, соответствующий пику мощности реактора, виден в районе 110-го канала.

Пролетное расстояние для нейтронов от замедлителя, окружающего активную зону реактора, до образца составляет 23 м, и широкий пик, лежащий в

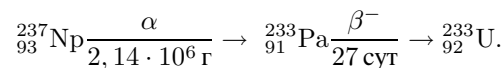


интервале от 3 до 20 мс (каналы 210–730), соответствует вылету мгновенных нейтронов деления из образца при взаимодействии с ним тепловых нейтронов пучка. Отсчеты детектора, соответствующие ЗН, распределены по всему временному спектру и являются определяющими в интервале от 1000-го до 4096-го канала. Для извлечения величины  $\nu_d$  использовалась часть спектра за 1500-м каналом. Из представленных на рис. 3 нормированных аппаратурных спектров один ( $^{235}\text{U}$ ) соответствует измерению эффекта при работающем прерывателе и открытой кадмиевой заслонке системы Cd-пинг-понг, второй ( $^{235}\text{U}+\text{Cd}$ -фильтр) — измерению фона, в тех же условиях, но при закрытой заслонке. В области теплового пика (каналы 210–730) фон не превышал 3 %, а для области ЗН (каналы 1500–2500 и 3000–4096) он составлял 10 %.

При обработке аппаратурных спектров вычислялась площадь теплового пика, соответствующая числу мгновенных нейтронов деления и площадь участков спектра, далеких от вспышки реактора, соответствующая числу ЗН. При этом в расчет принимались запаздывающие нейтроны не всего интервала, 200 мс, а только его части, 110 мс, так как помимо начальных 1500 каналов исключался участок спектра, заключенный между каналами 2500–3000, с присутствующим на нем небольшим пиком, так называемым сателлитом, обусловленным конструктивной особенностью реактора ИБР-2. После введения коэффициента, учитывающего это обстоятельство, определялась величина отношения  $N_p/N_d$ . Используя это значение, а также известные для  $^{235}\text{U}$  величины  $\nu_p = 2,432 \pm 0,004$  и  $\nu_d = 0,0167 \pm 0,0007$  [4], из соотношения (5) определяли значение отношения эффективностей  $\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_d} = 0,76$  для нейтронного детектора установки «Изомер-М».

**Измерения с  $^{237}\text{Np}$ .** Измерения выхода ЗН с  $^{237}\text{Np}$  проводились с использованием образца  $\text{NpO}_2$  диаметром 60 мм, массой 23,05 г, помещенного в никелевую оболочку и герметично упакованного в алюминиевый контейнер. Учитывая, что сечение деления тепловыми нейтронами таких ядер, как  $^{235}\text{U}$  или  $^{239}\text{Pu}$ , на 4–5 порядков больше, чем у  $^{237}\text{Np}$ , необходимо было иметь мишень с очень малым содержанием таких примесей. Поэтому материал мишени был дважды химически очищен, после чего содержание примесей  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  не превышало  $10^{-6}$ . При этом вклад ЗН от этих изотопов в измеряемую величину  $\nu_d$  для  $^{237}\text{Np}$  составил 1–2 %.

Более существенная поправка, которую необходимо учитывать при определении  $\nu_d$  для  $^{237}\text{Np}$ , связана с накоплением  $^{233}\text{U}$  в результате радиоактивного распада  $^{237}\text{Np}$ :



Поскольку с момента приготовления образца прошло 10 лет, то количество  $^{233}\text{U}$  в нем во время измерений составляло  $N(^{233}\text{U}) = N(\text{Np}) \cdot 3,2 \cdot 10^{-6}$ .

Сама по себе это величина небольшая, но из сопоставления сечений деления тепловыми нейтронами  $^{237}\text{Np}$  и  $^{233}\text{U}$  (21 мб и 529 б соответственно) следует существование заметного вклада  $^{233}\text{U}$  в выход ЗН при измерениях с этим образцом. Величина поправки, которую необходимо вносить в конечный результат, составила 4 %.

Так как ожидаемая величина эффекта для ЗН от теплового деления  $^{237}\text{Np}$  очень мала, то для надежного определения отношения  $N_p/N_d$  при проведении эксперимента предъявлялись особые требования к работе измерительной системы. Кроме того, проводилось тщательное рассмотрение всех процессов, которые могут быть фоновыми при измерении выхода ЗН. К таким процессам относится деление нептуния быстрыми нейтронами, рассеяние нейтронов на образце, фон в измерительном павильоне, испускание быстрых нейтронов в реакции  $(\alpha, n)$  на кислороде, содержащемся в образце ( $\text{NpO}_2$ ).

Для контроля за стабильностью работы измерительной системы и повышения достоверности получаемых данных в ходе эксперимента проводилось периодическое чередование измерений эффекта и фона. Общее время измерений составило 190 ч. На рис. 4 представлены аппаратные спектры, полученные в этих измерениях.

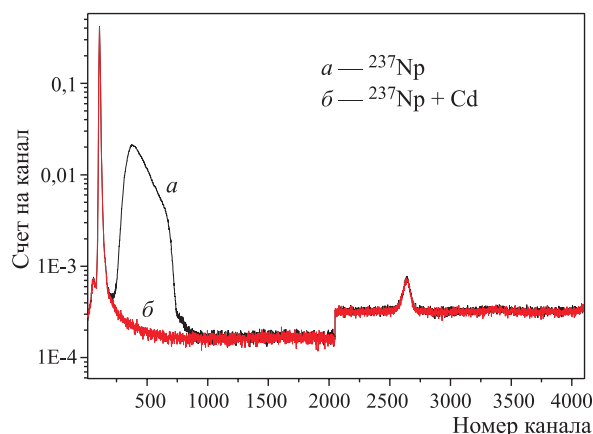


Рис. 4. Аппаратурные спектры временного анализа, полученные на установке «Изомер-М»: *a* — эффект + фон ( $^{237}\text{Np}$ ), *b* — фон ( $^{237}\text{Np}+\text{Cd}$ -фильтр)

Спектр, соответствующий измерению эффекта ( $^{237}\text{Np}$ ) при работающем прерывателе и открытой кадмиевой заслонке, и спектр фона ( $^{237}\text{Np}+\text{Cd}$ -фильтр), измеренный в аналогичных условиях, но при закрытой заслонке, приведены к одному числу стартов реактора. Из сравнения этих спектров следует, что фон в области теплового пика (210–730-й каналы) составляет

немногим более 2%. А в интервале 1500–4096-го каналов, содержащем отсчеты детектора от ЗН, оба спектра почти совпадают друг с другом и разница составляет менее 2%. Это обстоятельство диктует необходимость детального анализа всех компонентов фона.

Для области теплового пика при измерении эффект + фон ( $^{237}\text{Np}$ ) многокомпонентный счет детектора представляется в виде

$$N_{\text{exp}}^p = N_p + N_s + N_{(\alpha,n)} + N_{\text{bgr}} + N_{\text{fn}}, \quad (6)$$

Для фонового измерения ( $^{237}\text{Np}+\text{Cd}$ -фильтр) в соответствующем выражении счета детектора остаются только компоненты фона:

$$N_{\text{exp}}'^p = N'_s + N_{(\alpha,n)} + N'_{\text{bgr}} + N_{\text{fn}}. \quad (7)$$

Аналогичным образом представляется счет детектора при измерении эффекта (8) и фона (9) для области спектра, соответствующей ЗН:

$$N_{\text{exp}}^d = N_d + N_s + N_{(\alpha,n)} + N_{\text{bgr}} + N_{\text{fn}}, \quad (8)$$

$$N_{\text{exp}}'^d = N'_s + N_{(\alpha,n)} + N'_{\text{bgr}} + N_{\text{fn}}. \quad (9)$$

В приведенных выражениях  $N_s$  соответствует счёту рассеянных нейтронов;  $N_{(\alpha,n)}$  — быстрым нейтронам из реакции  $O(\alpha, n)$ ;  $N_{\text{bgr}}$  — внешнему фону;  $N_{\text{fn}}$  — быстрым нейтронам, летящим из активной зоны реактора.

Для определения вклада рассеянных нейтронов  $N_s$  были проведены дополнительные измерения с образцом меди, который выбирался таким образом, чтобы значение  $n\sigma_s$  для него совпадало с  $n\sigma_s$  для нептуниевой мишени. Время измерения составило 120 ч.

Для элементов с большим сечением деления тепловыми нейтронами вклад рассеянных нейтронов ничтожен, так как в детекторе предусмотрена экранировка кадмием канала с образцом (см. рис. 1). Для  $^{237}\text{Np}$  вклад рассеянных нейтронов учитывался, он составил около 2% от общего счёта детектора в области теплового пика.

Величина  $N_{(\alpha,n)}$  определяется быстрыми нейтронами из реакции  $O(\alpha, n)$ . Эта составляющая фона оказала наибольшее влияние на точность измерения выхода ЗН. Отдельное измерение счёта детектора с мишенью нептуния при остановленном реакторе показало, что около 62% отсчетов на участке спектра каналов 1500–4096 обусловлены этой реакцией.

Компонента фона  $N_{\text{bgr}}$  обусловлена внешним фоном при работающем реакторе. Она была измерена при отсутствии образца в канале.

Полученные в результате обработки экспериментальных данных величины для различных компонентов фона и полного счёта мгновенных и запаздывающих нейтронов в измерениях с образцом  $^{237}\text{Np}$ , приведенные к одной вспышке реактора, представлены в таблице.

**Измеренные величины различных компонентов фона и полного счета нейтронов,  
приведенные к одной вспышке реактора**

Область теплового пика (каналы 210–730)		
Компоненты счета детектора	Число отсчетов в измерении без Cd	Число отсчетов в измерении с Cd
$N_{scat}$	0,111	0,003
$N_{bgr}$	0,854	0,051
$N_{\alpha n}$	0,040	0,040
$N_{fn}$	0,004	0,004
$N_{exp}^p$	4,637	0,101
Область запаздывающих нейтронов (каналы 1500–4096)		
Компоненты счета детектора	Число отсчетов в измерении без Cd	Число отсчетов в измерении с Cd
$N_{scat}$	0,021	0,019
$N_{bgr}$	0,201	0,199
$N_{\alpha n}$	0,299	0,299
$N_{fn}$	0,025	0,025
$N_{exp}^d$	0,556	0,542

Подставляя число отсчетов из таблицы в выражения (6)–(9), можно получить значения  $N_p$  и  $N_d$ , приведенные к одной вспышке реактора.

Используя известную величину  $\nu_p(^{237}\text{Np})=2,52$  [4], а также полученное из измерений с  $^{235}\text{U}$  значение отношения  $\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_d} = 0,76$ , можно определить искомую величину  $\nu_d(^{237}\text{Np})$ . В ходе эксперимента были проведены две серии измерений с образцом нептуния и серия фоновых измерений с образцом меди. Для каждой серии с  $^{237}\text{Np}$  были определены значения  $\nu_d$ , которые в пределах погрешности согласуются друг с другом. Среднее взвешенное значение выхода ЗН, полученное в эксперименте, составило величину  $\nu_d = 0,0115 \pm 0,0010$ .

Погрешность полученного значения включает погрешности всех компонентов фона и возможные систематические ошибки, связанные с проведенными нормировками.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приводится описание модернизированной установки «Изомер-М», обладающей улучшенными параметрами и дополнительными возможностями по сравнению с первоначальным вариантом установки «Изомер-М». Это позволяет рассчитывать на успешное развитие работ по исследованию запаздывающих нейтронов на ИБР-2 с использованием оригинального экспериментального метода.

Здесь же представлены первые результаты, полученные на этой установке в эксперименте по определению полного выхода ЗН при делении  $^{237}\text{Np}$  тепловыми нейтронами. В пределах погрешности эти результаты не противоречат известным экспериментальным данным [2].

Для достижения большей точности необходимо проведение измерений с образцом металлического нептуния, так как в проведенном эксперименте наибольший вклад в погрешность измерения  $\nu_d$  определялся реакцией  $(\alpha, n)$  с кислородом, входящим в состав мишени  $\text{NpO}_2$ .

Авторы благодарны Ю. С. Замятнину, С. Б. Борзакову и Ш. Зейналову за участие в полезных обсуждениях на различных этапах работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борзаков С. Б. и др. // Атомная энергия. 1995. Т. 79. С. 231.
2. Борзаков С. Б. и др. // Ядерная физика. 2000. Т. 63. С. 589.
3. Keepin G. R. Physics of Nuclear Kinetics. Addison-Westley Reading, 1965.
4. Landolt-Börnstein. Low Energy Neutron Physics, Springer. V. 16.

Получено 3 ноября 2005 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 17.01.2006.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,69. Уч.-изд. л. 0,83. Тираж 300 экз. Заказ № 55184.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)