

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P3-94-447

С.Б.Борзаков, Э.Дерменджиев, Ю.С.Замятнин,  
В.М.Назаров, С.С.Павлов, А.Д.Рогов, И.Русков

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ  
ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ  
И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ  $\beta_{eff}$  ДЛЯ  $^{233}\text{U}$   
ПО ОТНОШЕНИЮ К  $^{235}\text{U}$

Направлено в журнал «Атомная энергия»

1994

Борзаков С.Б. и др.

Установка для изучения запаздывающих нейтронов и предварительные результаты определения величины  $\beta_{eff}$  для  $^{233}\text{U}$  по отношению к  $^{235}\text{U}$

Усовершенствованная установка для изучения выхода запаздывающих нейтронов введена в строй на импульсном реакторе ИБР-2 в Дубне. В измерениях используется метод периодического облучения, не требующий перемещения образца, в сочетании с методом времени пролета. Новая установка состоит из зеркального нейтронвода, медленного нейтронного прерывателя, синхронизированного с импульсами реактора, и нейтронного детектора, содержащего  $^3\text{He}$ -счетчики в замедлителе. Нейтронный прерыватель позволяет подавить фон тепловых нейтронов между вспышками реактора. Частота повторения импульсов реактора 5 Гц, ширина нейтронного импульса около 215 мкс. Вес исследуемых делящихся образцов, помещаемых внутри детектора, может изменяться от 100 мг до нескольких грамм. Средний поток тепловых нейтронов на образце  $2 \cdot 10^5$  н/с·см<sup>2</sup>. Получены предварительные данные по выходу запаздывающих нейтронов для  $^{233}\text{U}$  по отношению к  $^{235}\text{U}$ . Установка дает возможность измерения величины  $\beta_{eff}$  со статистической точностью лучше 1% и является наиболее подходящей для изучения короткоживущих групп запаздывающих нейтронов с периодами полураспада меньше 1 с.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1994

Перевод авторов

Borzakov S.B. et al.

P3-94-447

An Improved Experimental Facility for Studying Delayed Neutrons and Preliminary Results of Measuring the  $\beta_{eff}$  Value for  $^{233}\text{U}$  Relative to  $^{235}\text{U}$

An improved experimental facility for studying delayed neutron emission has been designed and tested at the Dubna IBR-2 pulsed reactor. The new facility consists of a mirror neutron guide to extract thermal and cold neutrons from the beam, a slow neutron chopper, which is synchronized with the reactor pulses and a  $4\pi$   $^3\text{He}$ -filled multicounter neutron detector. The use of the slow neutron chopper allows the reactor delayed neutron background to be strongly suppressed. The repetition rate of the reactor pulse is 5 Hz with a half-width of about 215  $\mu\text{s}$ . The weight of different fissile targets which are placed in the middle hole of the neutron detector can vary from 100 mg up to several grams. The mean thermal neutron flux on the target is about  $2 \cdot 10^5$  n/sec·cm<sup>2</sup>. A method of periodical irradiation of the target combined with the time-of-flight technique is used. The preliminary results on the effective fraction of delayed neutrons for  $^{233}\text{U}$  relative to  $^{235}\text{U}$  were obtained. The facility gives the possibility to measure  $\beta_{eff}$  value with the statistical accuracy better than 1% and to investigate DM groups with half-lives less than 1 second.

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

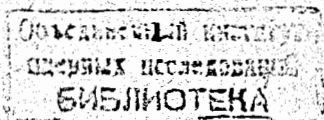
## 1. Введение

Эффективный выход запаздывающих нейтронов  $\beta_{eff} = \nu_{DN}/\nu$  является одной из важнейших констант реакторной физики, необходимой для проектирования ядерных реакторов, ядерной безопасности и др. Здесь  $\nu_{DN}$  - полный выход запаздывающих нейтронов (ЗН),  $\nu$  - среднее число нейтронов деления, испускаемых в одном акте деления. Большое количество данных по  $\nu_{DN}$  для различных делящихся изотопов оценено и приведено в работах Кишина /1/, Татла/2/, Случевской и др. /3/, Блэшота и др./4/. Недавно Филип и д'Анжело показали /5/, что в связи с развитием технологии ядерных реакторов необходимы измерения величин  $\beta_{eff}$  при делении ядер тепловыми нейтронами с более высокой точностью. Большинство экспериментальных методов определения величин  $\beta_{eff}$  включают в себя облучение мишени нейтронами и последующее перемещение образца к детектору для измерения выхода ЗН /2/. Брансоном и Хубером /6/, Мастерсом и др. /7/, а также Доуди и др. /8/ был использован метод длительного периодического облучения мишени, который позволяет достичь равновесной интенсивности ЗН между импульсами облучения.

Для того чтобы провести измерения выходов ЗН с более высокой точностью и исследовать возможность существования короткоживущих групп ЗН с миллисекундными периодами полураспада, нами создана экспериментальная установка "Изомер", использующая метод периодического облучения. Источником нейтронов служит импульсный реактор ИБР-2. Установка включает в себя зеркальный нейтронпровод, медленный прерыватель нейтронов и нейтронный детектор (НД), содержащий  $^3\text{He}$ -счетчики.

Ранее было показано, что даже первый вариант установки ( без зеркального нейтронвода ) позволял наблюдать ЗН начиная с нескольких миллисекунд после прерывания нейтронного потока /9/. Режим работы прерывателя позволяет расширить интервал, в котором регистрируются ЗН, до 1 секунды. К сожалению, момент прерывания нейтронного пучка не был фиксирован с достаточной точностью из-за большого пролетного расстояния между прерывателем и НД. К тому же фон быстрых нейтронов, который обусловлен в основном запаздывающими нейтронами из зоны реактора, слишком высок для планируемых экспериментов /10/.

Для решения этих проблем была создана усовершенствованная уста-



новка, включающая в себя новый прерыватель нейтронов и изогнутый зеркальный нейтроновод, описанный в работе /11/. Нейтронный прерыватель расположен после зеркального нейтроновода вблизи НД ( см. рис. 1 ), что позволяет фиксировать момент прерывания нейтронов с точностью 1 мс. Ниже приводятся результаты первых измерений, проведенных с изотопами  $^{235}\text{U}$  и  $^{233}\text{U}$ , полученных методом периодического облучения на установке "Изомер".

## II. Описание установки и метод измерений

Упрощенная схема установки показана на рис. 1.

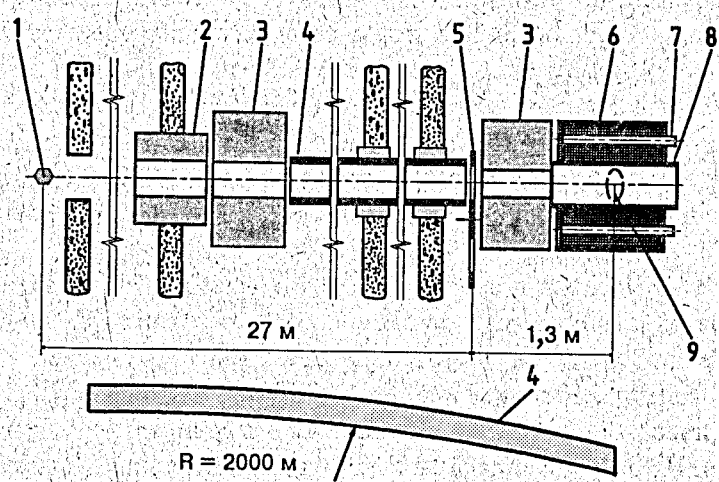


Рис. 1. Схема установки "Изомер". 1- зона реактора, 2,3 - коллиматоры, 4 - зеркальный нейтроновод, 5 - прерыватель, 6 - замедлитель, 7 - нейтронные счетчики, 8 - цилиндр из Cd, 9 - образец

Импульсный реактор ИБР-2 является источником нейтронов с временным интервалом  $T = 200$  мс между вспышками. Изогнутый зеркальный нейтроновод пропускает нейтроны с энергией меньше 0,1 эВ и значительно подавляет ( приблизительно в  $10^5$  раз ) фон быстрых нейтронов. Размеры выходного окна нейтроновода 14x 1,5 см . Средний поток тепловых нейтронов на мишени  $2 \cdot 10^9$  н/с · см<sup>2</sup>.

Нейтронный прерыватель состоит из двух дисков Cd, диаметром 600 мм и толщиной 1 мм. На каждом диске вырезаны две симметрично

расположенные щели с углом раствора  $20^\circ$  . Листы Cd расположены между алюминиевыми дисками толщиной 2 мм. Сдвигая листы Cd друг относительно друга, можно уменьшать ширину щели и, следовательно, время облучения  $\Delta t$ . Вращение прерывателя синхронизировано со вспышками реактора. Нейтронный прерыватель и детектор расположены на расстоянии 30 м от зоны реактора. Момент открытия нейтронного пучка относительно вспышки реактора может изменяться в широких пределах, что дает возможность изучения выхода ЗН для различных энергий налетающих нейтронов.

Нейтронный детектор и электроника описаны в /9/. В настоящей работе использовались 12 пропорциональных счетчиков с  $^3\text{He}$ , размещенных в замедлителе из полиэтилена. Для подавления фона замедлитель покрыт листами Cd ( 1 мм ) и плитами из борированного полиэтилена ( 10 см ). Вдоль оси детектора расположено отверстие диаметром 140 мм для размещения образцов. Для уменьшения фона от рассеянных ими тепловых нейтронов это отверстие также покрыто Cd толщиной 1 мм. Эффективность детектора для Pu-Be-источника ( $E_n \approx 4,4$  МэВ) составляет 12%. Зависимость эффективности от энергии нейтронов была рассчитана методом Монте-Карло с помощью программы MCNP /12/ и показана на рис. 2. Как видно из рисунка, эффективность детектора плавно уменьшается с ростом энергии нейтронов. При энергии 2 МэВ эффективность детектора приблизительно в 1,5 раза меньше, чем при энергии 0,1 МэВ.

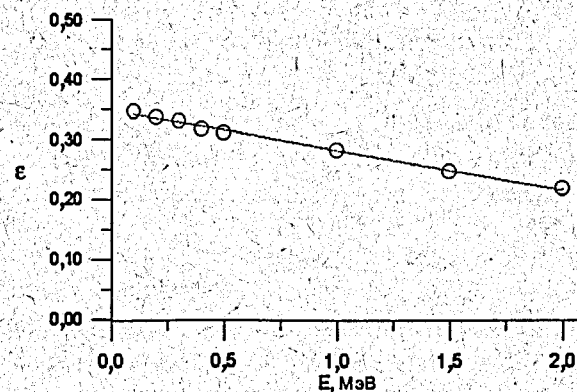


Рис. 2. Зависимость эффективности детектора от энергии нейтронов

Экспериментальная информация собирается измерительным модулем на базе персонального компьютера и представляется в виде временного распределения детектируемых нейтронов. Стартовые импульсы, запускающие временной анализ, синхронизированы с нейтронными вспышками реактора.

Временное распределение детектируемых нейтронов состоит из двух различных частей. Первая включает в себя мгновенные нейтроны деления от образца, регистрируемые в течение времени его облучения  $\Delta t$ . Зная интервал времени от вспышки реактора до момента регистрации быстрого нейтрона, можно определить энергию налетающего нейтрона. Вторая часть представляет собой распределение во времени запаздывающих нейтронов от осколков-предшественников, образовавшихся за время облучения в образце, в то время как нейтронный поток реактора подавлен.

Если обозначить сумму отсчетов ЗН, зарегистрированных в интервале времени  $(t_1, t_2)$ , как  $N_{DN}$ , где  $t_1$  и  $t_2$  отсчитывается от момента окончания облучения, то полное число ЗН  $S_{DN}$  равно

$$S_{DN} = \frac{N_{DN}}{\epsilon_{DN}} \cdot F(T, \Delta t, t_1, t_2), \quad (1)$$

где  $F(T, \Delta t, t_1, t_2)$  - функция, соответствующая методу облучения и включающая параметры групп ЗН. Число нейтронов деления, появившихся за время облучения, равно

$$S_{FN} = \frac{N_{PN}}{\epsilon_{PN}} + S_{DN}. \quad (2)$$

Здесь  $N_{PN}$  - число мгновенных нейтронов деления,  $\epsilon_{PN}$  и  $\epsilon_{DN}$  - эффективности детектора для мгновенных и запаздывающих нейтронов соответственно. Значение  $\beta_{eff}$  может быть получено из уравнения

$$\beta_{eff} = \frac{S_{DN}}{S_{FN}}. \quad (3)$$

Для величины  $F(T, \Delta t, t_1, t_2)$  было получено следующее выражение, использующее шестигрупповое приближение, предложенное Кишином [1] и учитывающее периодическое облучение мишени:

$$F(T, \Delta t, t_1, t_2) = \left[ \sum_{i=1}^6 \frac{A_i}{\lambda_i \cdot \Delta t} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_i \Delta t}}{1 - e^{-\lambda_i T}} \cdot (e^{-\lambda_i t_1} - e^{-\lambda_i t_2}) \right]^{-1}. \quad (4)$$

Здесь  $A_i$  - относительный выход и  $\lambda_i$  - постоянная распада для  $i$ -той группы ЗН.

### III. Результаты измерений

С целью проверки работоспособности установки были проведены измерения с изотопами урана  $^{233}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ . В настоящей работе представлены предварительные результаты измерений. Образцы имели форму дисков диаметром 50-80 мм и помещались внутри детектора под углом  $15^\circ - 20^\circ$  по отношению к оси нейтронного пучка. Основные характеристики образцов приведены в таблице 1. Содержание  $^{235}\text{U}$  в образце  $^{233}\text{U}$  не превышало 0,02%.

Таблица 1. Характеристики образцов

Изотоп	Вес г	Обогащение %	Толщина яд/см <sup>2</sup>
$^{235}\text{U}$	7	90	$2,7 \cdot 10^{21}$
$^{235}\text{U}$	0,3	90	$8,0 \cdot 10^{19}$
$^{233}\text{U}$	0,1	98,11	$2,7 \cdot 10^{19}$

На рис. 3 и 4 показаны экспериментальные временные распределения регистрируемых нейтронов, полученные с образцами  $^{235}\text{U}$  (0,3 г) и  $^{233}\text{U}$ .

Фон был измерен с помощью 2 мм фильтра Cd, полностью подавляющего тепловые нейтроны, и составлял не более 12% в случае  $^{235}\text{U}$  и не более 37% для  $^{233}\text{U}$ . Чтобы исключить просчеты при определении числа мгновенных нейтронов для  $^{235}\text{U}$  и уменьшить фон гамма-квантов, измерения проводились на подавленном с помощью свинцового рассеивателя (приблизительно в 10 раз) потоке нейтронов.

Результаты измерений показаны в таблице 2. Все величины  $\beta_{eff}$ , приведенные в таблице, были получены для  $\Delta t = 20$  мс,  $t_1 = 40$  мс и  $t_2 = 160$  мс. Нужно подчеркнуть, что статистическая ошибка полученных величин в несколько раз меньше суммарной, которая приведена в таблице 2.

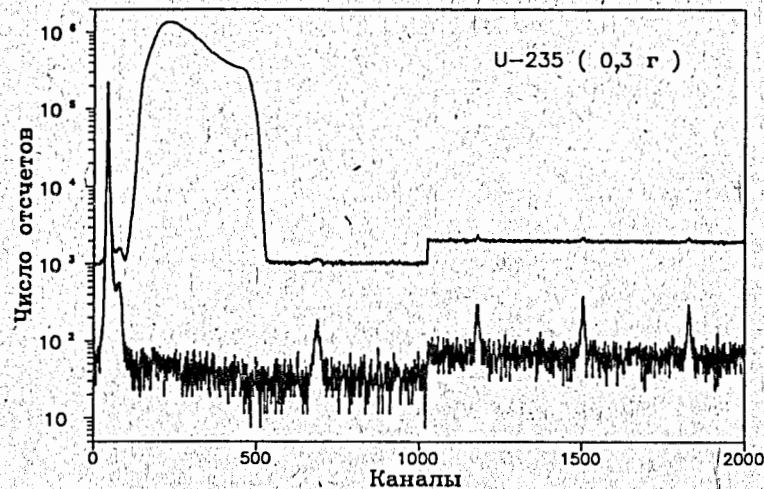


Рис. 3. Временной спектр нейтронов для  $^{235}\text{U}$ . Время измерения  $\approx 15$  час. Ширина каналов  $1024 \times 64$  мкс +  $1024 \times 128$  мкс. Нижняя кривая - фон, измеренный с помощью кадмиевого фильтра

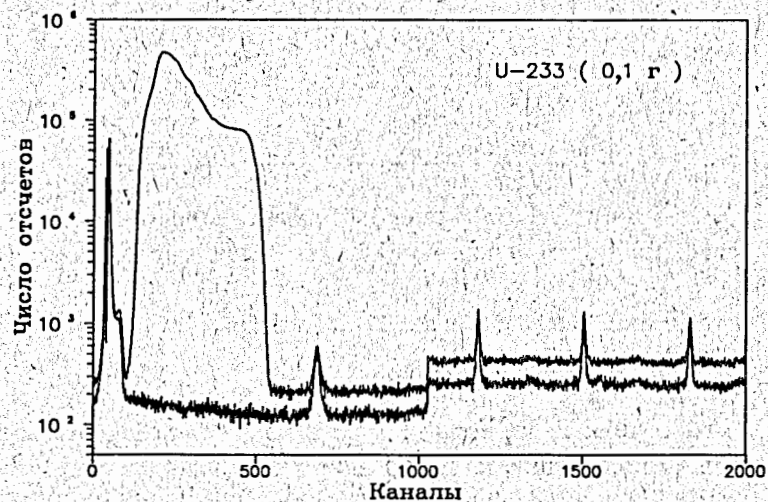


Рис. 4. Временной спектр нейтронов для  $^{233}\text{U}$ . Время измерения  $\approx 21$  час. Ширина каналов  $1024 \times 64$  мкс +  $1024 \times 128$  мкс. Нижняя кривая - фон

Таблица 2. Результаты измерений

Изотоп	$t_{\text{изм}}, \text{ч}$	$S_{PN}$	$S_{DN}$	$\beta_{\text{eff}}$
$^{235}\text{U}$	14	$2,490 \cdot 10^7$	$142019 \pm 426$	$0,00650 \pm 0,00014$
$^{235}\text{U}$	15	$4,131 \cdot 10^7$	$235918 \pm 510$	$0,00647 \pm 0,00014$
$^{233}\text{U}$	21	$6,951 \cdot 10^7$	$170608 \pm 856$	$0,00277 \pm 0,00007$

Приведенные значения  $\beta_{\text{eff}}$  получены с вычисленным отношением эффективностей для запаздывающих и мгновенных нейтронов с использованием энергий ЗН из работы /3/:

$$\epsilon_{DN}/\epsilon_{PN} = 1,42 \pm 0,02.$$

Расчет проводился для каждого изотопа в отдельности с учетом относительных выходов различных групп ЗН. Вычисления показали, что эффективности для запаздывающих нейтронов для изотопов  $^{235}\text{U}$  и  $^{233}\text{U}$  практически одинаковы. Используя известную величину  $\beta_{\text{eff}}$  для  $^{235}\text{U}$  /4/:

$$\beta_{\text{eff}}(^{235}\text{U}) = 0,0068 \pm 0,0002,$$

из эксперимента с  $^{235}\text{U}$  можно получить отношение эффективностей регистрации мгновенных и запаздывающих нейтронов:

$$\epsilon_{DN}/\epsilon_{PN} = 1,36 \pm 0,06,$$

что находится в разумном согласии с расчетным значением.

Используя экспериментальное отношение  $\epsilon_{DN}/\epsilon_{PN}$ , получим величину  $\beta_{\text{eff}}$  для  $^{233}\text{U}$ :

$$\beta_{\text{eff}}(^{233}\text{U}) = 0,0029 \pm 0,0002.$$

Это значение находится в хорошем согласии с результатом работы /13/:  $\beta_{\text{eff}}(^{233}\text{U}) = 0,0027 \pm 0,0001$ .

Измерения на установке "Изомер" позволяют получить начальный участок кривой распада ЗН, который приведен на рис. 5 для  $^{235}\text{U}$ .

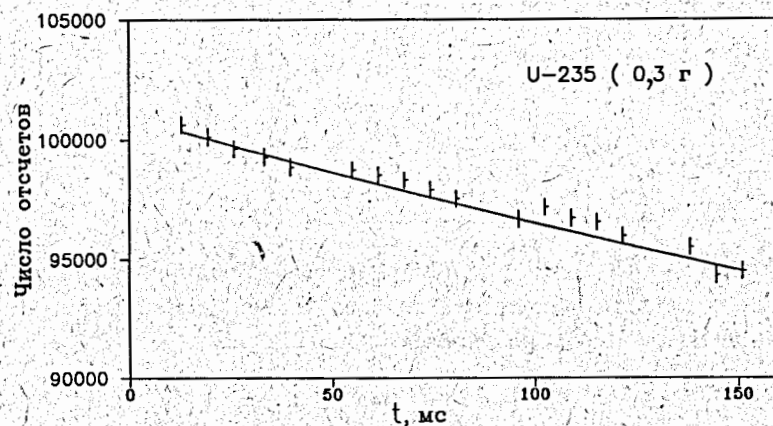


Рис. 5. Кривая распада ЗН для  $^{235}\text{U}$ . Каждая точка соответствует сумме отсчетов во временном интервале 6,4 мс

Эти данные получены из измерений без свинцового рассеивателя в нейтронном пучке. Сплошной линией на рисунке показана теоретическая кривая, полученная в шестигрупповом приближении с параметрами из работы /2/. Наши оценки возможного существования седьмой группы с  $\lambda_7 = 14 \text{ с}^{-1}$  (период полураспада  $T_{1/2} = 50 \text{ мс}$ ) показывают, что  $A_7 < 0,003$ .

#### IV. Выводы

На импульсном реакторе ИБР - 2 создана и испытана установка для изучения выходов запаздывающих нейтронов методом периодического облучения образцов. Проведены первые измерения с образцами  $^{235}\text{U}$  и  $^{233}\text{U}$ . Полученные результаты имеют хорошую статистическую точность и согласуются с известными в литературе данными. Установка дает возможность оценить вклад короткоживущих групп в испускание запаздывающих нейтронов.

В ближайшем будущем планируется повысить в несколько раз поток нейтронов на образце, увеличить число счетчиков в детекторе и улучшить фоновые условия, что должно привести к повышению точности измерений.

Описанная установка имеет ряд преимуществ перед аналогичными установками, описанными, например, в /2/. Установка позволяет изучать ЗН между нейтронными вспышками реактора спустя несколько миллисекунд после прерывания потока нейтронов. Использование установки в сочетании с другими методами измерения  $\nu_{DN}$  позволяет получить более точные данные о запаздывающих нейтронах.

Необходимо также отметить, что в действительности это многоцелевая установка, которая может быть использована для решения ряда других задач физики деления, радиационного захвата нейтронов и т.д. /11/.

Авторы выражают свою благодарность доктору В.И.Фурману за его постоянный интерес к нашей работе. Мы также благодарны другу Ю.В.Григорьеву за предоставление образцов урана и С.И.Неговелову за изготовление преусилителей.

#### Литература

1. G.R.Keepin, Physics of Nuclear Kinetics, Addison Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts, 1965.
2. R.J.Tuttle, Nucl. Sci. Eng., 56, p.37, 1975.
3. В.М.Случевская, Ж.П.Матвеевко, Вопросы ядерной науки и техники, Ядерные данные, т.3(38), с.29, 1980, Москва, СССР.
4. J.Blachot, M.C.Brady, A.Filip, R.W.Mills, D.R.Weaver, OECD-NEA, NEACRP-L-323, 1990.
5. A.Filip, A.D'Angelo, "Nuclear Data for Science and Technology", Proceedings, FRG, Juelich, 13-17 May 1991, p.946, Springer-Verlag, Berlin, 1992.
6. G.S.Brunson, R.J.Huber, "Delayed Fission Neutrons", Proc. of a Pannel, Vienna, 24-27 April 1967, p.229, IAEA, Vienna, 1968.
7. C.F.Masters, M.M.Thorpe, D.B.Smith, Nucl.Sci.Eng., 36, p.202, 1969.
8. E.J.Dowdy, J.T.Caldwell, G.M.Worth, Nucl.Instr.Meth., 115, p.573, 1974.
9. E.Dermendjiev, V.M.Nazarov, S.S.Pavlov, I.Ruskov, Yu.S.Zamyatnin, Preprint JINR, E3-93-6, Dubna, 1993.

10. E.Dermendjiev, W.I.Furman, Yu.S.Zamyatnin, Preprint JINR, E3-93-7, Dubna, 1993.
11. В.М. Назаров и др. Современные достижения в активационном анализе, Дубна, ОИЯИ, D14-88-833, с.6, 1988.
12. J.F.Briesmeister (Ed.), MCNP-A General Monte-Carlo N Particle Transport Code, Version 4A, Los-Alamos Lab. Report LA-12625, 1993.
13. J.F. Conant, P.F. Palmedo, Nucl.Sci.Eng., 44, p.173, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел  
21 ноября 1994 года.