

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук



Ю.В. Григорьев, И.А. Васильев, О.Н. Либанова,
Ю.В. Рябов, Д.В. Хлюстин

**Исследование резонансной структуры
нейтронных сечений
и спектрометрических характеристик
на импульсных источниках нейтронов РАДЭКС,
ИН-06**

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН
1417/2015
ДЕКАБРЬ 2015

препринт
preprint

МОСКВА 2015 MOSCOW

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук



**Ю.В. Григорьев, И.А. Васильев, О.Н. Либанова,
Ю.В. Рябов, Д.В. Хлюстин**

**Исследование резонансной структуры
нейтронных сечений
и спектрометрических характеристик
на импульсных источниках нейтронов РАДЭКС,
ИН-06**

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН
1417/2015
ДЕКАБРЬ 2015

препринт
preprint

МОСКВА 2015 MOSCOW

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук



Ю.В. Григорьев, И.А. Васильев, О.Н. Либанова,
Ю.В. Рябов, Д.В. Хлюстин

Исследование резонансной структуры
нейтронных сечений
и спектрометрических характеристик
на импульсных источниках нейтронов РАДЭКС,
ИН-06

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН

1417/2015

ДЕКАБРЬ 2015

МОСКВА

2015

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences
60-th October Anniversary prospect 7a,
Moscow 117312, Russia

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук
проспект 60-летия Октября, 7а
Москва, 117312

Ю.В. Григорьев, И.А. Васильев, О.Н. Либанова,
Ю.В. Рябов, Д.В. Хлюстин

Исследование резонансной структуры
нейтронных сечений
и спектрометрических характеристик
на импульсных источниках нейтронов
РАДЭКС, ИН-06

Были проведены времяпролетные измерения на 50 м пролетной базе импульсного нейтронного источника РАДЭКС ММФ ИЯИ РАН при длительности импульса 300 нс. Для регистрации нейтронов использовались гелиевые счетчики и 8-секционные жидкостные (n,γ)-детекторы. Образцами служили металлические диски из Mn, Mo, Nb, In, Ho, Ta, W, U диаметром 48-80 мм и толщиной от 0.25 мм до 4 мм. Спектры были сравнены со спектрами, полученными с помощью тех же гелиевых счетчиков на ИН-06. Оказалось, что потоки на одинаковых пролетных базах РАДЭКСа и ИН-06 различаются приблизительно на порядок.

Yu.V. Grigoriev, I.A. Vasiliev, O.N. Libanova,
Yu.V. Ryabov, D.V. Hlustin

Investigation of resonance structure
of neutron cross sections
and spectrometric characteristics
on pulsed neutron sources RADEX, IN-06

For a pulse duration of 300 ns TOF measurements have been carried out at 50 m flight path of a pulsed neutron source RADEX MMF INR. For registration of neutrons 8-cell fluid (n,γ)-detectors and helium neutron counters have been applied. As the samples the disks of metal Mn, Mo, Nb, In, Ho, Ta, W, U with diameter of 48-80 mm and a thickness of 0.25 mm to 4 mm have been used. The measured spectra were compared with the spectra obtained by making use the same helium counters on IN-06. It turned out that the measured fluxes in the same span bases RADEX and IN-06 differ by approximately an order of magnitude.

ISBN 978-5-94274-305-5

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук, 2015
Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences, 2015

Ю.В. Григорьев, И.А. Васильев, О.Н. Либанова,
Ю.В. Рябов, Д.В. Хлюстин

Исследование резонансной структуры нейтронных
сечений и спектрометрических характеристик
на импульсных источниках нейтронов РАДЭКС,
ИН-06

Препринт 1417/2015

Декабрь 2015

Подписано в печать 22.12.2015

Ф-т 60x84/8. Уч.-изд.л. 1,2. Зак. 22376 Тираж 55 экз.
Бесплатно

Печать цифровая
Издательский отдел

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

Экспериментальная техника, методика измерений и обработки

С целью исследования резонансной структуры полных сечений и нейтронных сечений радиационного захвата проведены измерения времяпролетных спектров на образцах-радиаторах из естественного Mn, Mo, Nb, In, Ho, Ta, W, U диаметром 48-80 мм и толщиной от 0.25 мм до 4 мм. Измерения проводились с помощью установки РЭПС на 50 м пролетной базе импульсного нейтронного источника РАДЭКС [1] Московской мезонной фабрики ИЯИ РАН в г. Троицке по схеме, изображенной на рисунках 1 и 2. Установка РЭПС [2] состояла из системы коллимации, нейтронного детектора в виде многонитяного пропорционального He-3 счетчика, 4 π -геометрии (n,γ)-детектора в виде цилиндрического бака с восемью сообщающимися жидкостными сцинтилляционными секциями общим объемом 40 л, длиной 40 см, диаметром 40 см сквозным отверстием диаметром 110 мм. В качестве сцинтиллирующей жидкости в (n,γ)-детекторе использовался раствор из 50 г сцинтиллирующих добавок, 5.5 л метилбората с 94% обогащенным бором-10 и 34.5 л толуола. Каждая секция отделена от других секций светоза-

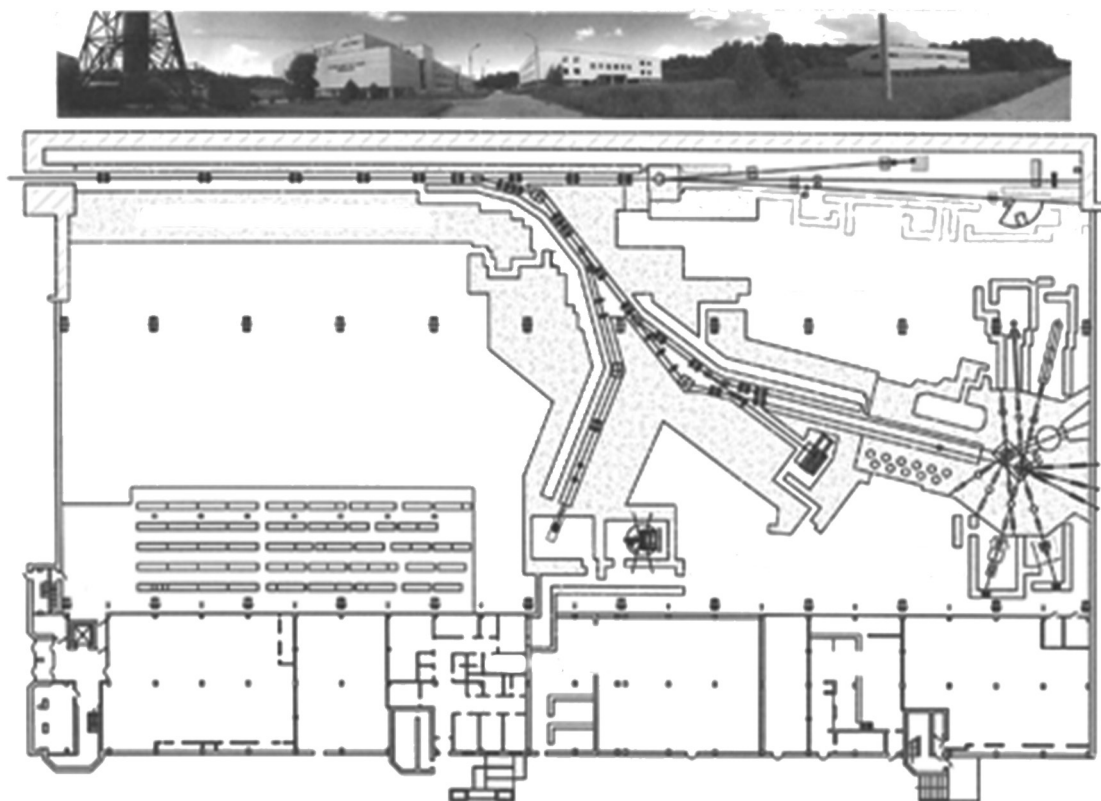


Рис. 1. Общая схема размещения импульсных источников РАДЭКС и ИН-06

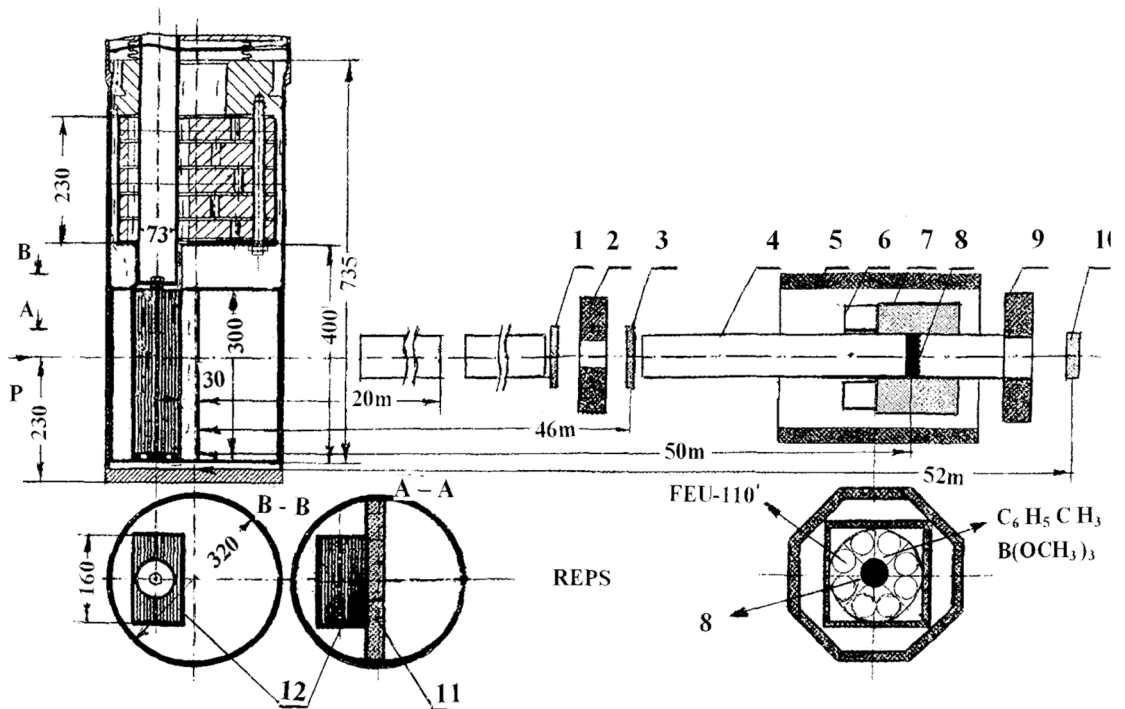


Рис. 2. Схема установки «РЭПС», расположенной на 50 м пролетной базе нейтронного источника РАДЭКС с W мишенью и водяным замедлителем:
 1 — мониторный счетчик, 2,9 — коллиматоры, 3 — образец-фильтр, 4 — нейтронород, 5 — защита из бора и свинца, 6 — ФЭУ-110, 7 — 8-секционный жидкостной (n, γ)-детектор, 8 — образец-радиатор, 10 — нейтронный ^3He детектор, 11 — водяной замедлитель, 12 — W мишень, 13 — свинцовая защита, 14 — детектор рассеянных нейтронов, 15 — нейтронород, 16 — нейтронный ^{10}B детектор

щитной алюминиевой пластиной толщиной 2 мм и просматривалась одним фотоумножителем ФЭУ-110 при непосредственном контакте фотокатода с жидкостью. Эффективность регистрации (n, γ)-детектора составляла 30%, геометрическая эффективность — 98%, энергетическое разрешение — около 30% для γ -кватнов Cs (662 кэВ).

Импульсный нейтронный источник РАДЭКС имеет вольфрамовую мишень из тонких металлических пластин общей толщиной 7 см с плоским водяным замедлителем толщиной 3 см. Во время измерений мишень облучалась импульсным пучком протонов с энергией $E = 209$ МэВ при импульсном токе $I = 5$ мА, частоте импульсов $f = 1-50$ Гц и длительности вспышки $\Delta t = 65$ мкс с помощью ^3He -счетчика высокой эффективности (100%) на 50 м пролетной базе. Поток тепловых нейтронов на поверхности детектора получился 1300 н/(см² с).

Для накопления информации от детектора использовалась быстродействующая электронная аппаратура в системе КАМАК. От каждой секции

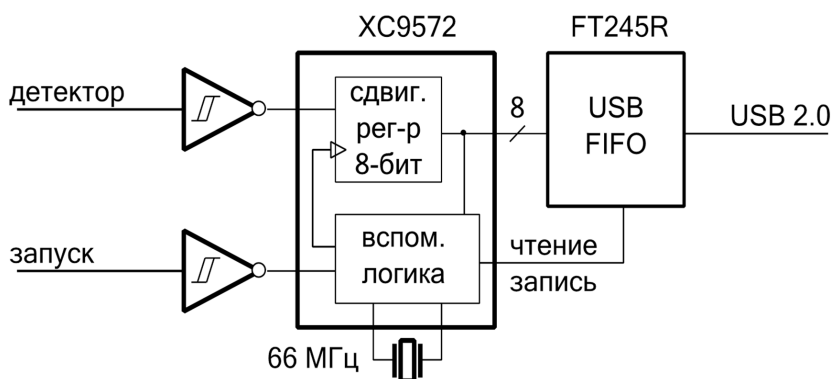


Рис.3. Функциональная схема измерительного устройства

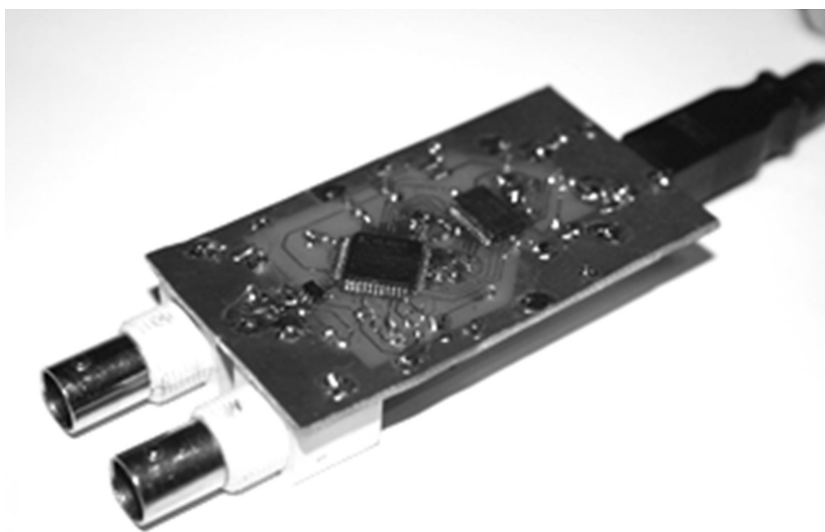


Рис.4. Внешний вид временного кодировщика

детектора аналоговые сигналы поступали с анодов ФЭУ-110 в свой независимый спектрометрический канал с токовым предусилителем и интегральным дискриминатором. Уровни дискриминации в каждом канале соответствовали энергвыделению γ -лучей 100 кэВ. С предусилителей аналоговые сигналы поступали также через линейный сумматор на интегральный быстрый дискриминатор, который удалял сигналы ниже 600 кэВ от фоновых γ -лучей при захвате нейтронов ядрами ^{10}B . Суммарная информация в виде временного спектра с 4096 временными каналами и минимальной длительностью временного канала 1 мкс в широком диапазоне энергий нейтронов от 0.005 эВ до 100 кэВ накапливалась в промежуточной памяти измерительного модуля, а затем переписывалась на твердый диск компьютера. Управление процессом накопления информации (рис. 3, 4) производилось новым временным кодировщиком, имеющим максимальное число временных каналов 524000 и минимальную ширину временного канала 121

нс. Временной кодировщик непосредственно связан с компьютером через вход USB-2.

На рис. 5–9 представлены типичные экспериментальные спектры, измеренные на установке РАДЭКС с помощью (n,γ)-детекторов, нейтронных детекторов и образцов-радиаторов.

Из времяпролетных спектров после вычитания фоновых составляющих и усреднения в энергетических интервалах системы констант БНАБ определялись групповые полные пропускания $T_t(n, E, \theta)$, функции самоиндексации $T_x(n, E, \theta)$ и наблюдаемые сечения по формулам (2, 4, 5), расчетные аналогичные величины получались по формулам (1, 3) по программе ГРУКОН на основе оцененных данных разных библиотек:

$$T_t^{\text{cal}}(n, \theta, E) = \frac{\int_{\Delta E} \varphi(E) * \varepsilon(E) * e^{-\sigma_t(E, \theta) * n} * dE}{\int_{\Delta E} \varphi(E) * \varepsilon(E) * dE}, \quad (1)$$

$$T_t^{\text{exp}}(n, \theta, E) = \frac{(N_{\text{sample}} - F_{\text{sample}}) * M}{N_{\text{open/beam}} - F_{\text{open/beam}}}, \quad (2)$$

$$T_t^{\text{cal}}(n, \theta, E) = \frac{\int_{\Delta E} \varphi(E) * \sigma_x(E, \Theta) * e^{\sigma_t(E, \theta) * n} * dE}{\int_{\Delta E} \varphi(E) * \sigma_x(E, \Theta) * dE}, \quad (3)$$

$$T_x^{\text{exp}} = \frac{(N_{\text{sample}} - F_{\text{sample}}) * M}{N_{\text{open/beam}} - F_{\text{open/beam}}} \quad (4)$$

$$\langle \sigma_t^{\text{obs}} \rangle = \frac{-\ln(T_t^{\text{exp}})}{n} \quad (5)$$

где $\varphi(E)$ — нейтронный поток, $\varepsilon(E)$ — эффективность детектора, σ — полное сечение, n — толщина образца-фильтра, E — энергия нейтронов, θ — температура образца-фильтра, N_s и $N_{o/b}$ — счет детектора в энергетической группе ΔE с образцом-фильтром и без него на нейтронном пучке, F_s и $F_{o/b}$ — фон детектора с образцом и без образца на пучке, M — мониторный коэффициент, σ_t^{ob} — наблюдаемое полное сечение, σ_x — парциальное сечение.

Полные сечения и факторы резонансного самоэкранирования в случае измерения времяпролетных спектров для нескольких толщин образцов-фильтров определялись по методу подгрупп и путем экстраполяции наблюдаемых сечений к значениям на нулевых толщинах образцов-фильтров. В первом методе полные пропускания и функции самоиндексации аппрок-

симмировались суммой экспоненциальных функций. Обычно для описания пропусканй достаточно двух экспоненциальных функций:

$$T_t(n) = a_{t1}e^{-\sigma_{t1}n} + (1 - a_{t1}) \times e^{\sigma_{t2}n}, \quad \sigma_t = a_{t1}\sigma_{t1} + (1 - a_{t1})\sigma_{t2} \quad (6)$$

$$T_{tx}(n) = a_{tx1}e^{-\sigma_{tx1}n} + (1 - a_{tx1}) \times e^{-\sigma_{tx2}n} \quad (7)$$

где a_{t1} , a_{tx1} , $a_{t2} = (1 - a_{t1})$, $a_{tx2} = (1 - a_{tx1})$ — доли подгрупповых сечений; σ_{t1} , σ_{t2} , σ_{tx1} , σ_{tx2} — коэффициенты разложения кривой на параметры; x — означает возможный процесс (c — захват, s — рассеяние, f — деление). Подгрупповые параметры для парциального процесса нужны только для определения факторов резонансного самоэкранирования и не позволяют определять парциальные сечения.

Во втором методе для экстраполяции наблюдаемых сечений к значениям на нулевых толщинах образцов-фильтров вычислялись поправочные коэффициенты самоэкранирования полных сечений K_{sh} для образца-фильтра толщиной n (ат/б) на основе оцененных данных разных библиотек. В этом случае конечное полное сечение определялось по формуле:

$$\sigma_t^{\text{exp}}(0) = K_{sh}\sigma_t^{\text{ob}}(n), \quad K_{sh} = \frac{\sigma_t^{\text{cal}}(0)}{\sigma_t^{\text{cal}}(n)}, \quad (8)$$

где $\sigma_t^{\text{cal}}(0)$ и $\sigma_t^{\text{exp}}(0)$ — экспериментальные и расчетные групповые полные сечения для нулевой толщины образца-фильтра, $\sigma_t^{\text{ob}}(n)$ и $\sigma_t^{\text{cal}}(n)$ — наблюдаемые экспериментальные и расчетные полные сечения для образца-фильтра толщиной n (ат/б).

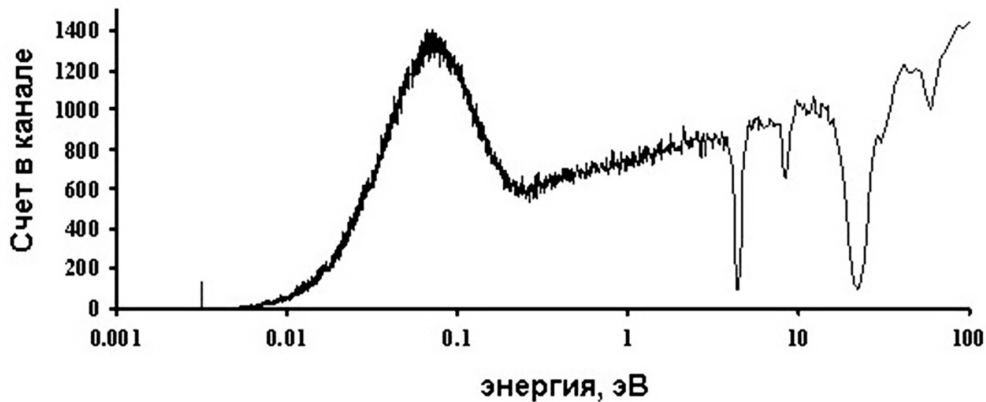


Рис. 5 Времяпролетный спектр пропускания $W(d = 0.4 \text{ мм})$, измеренный ^3He счетчиком на 50 м пролетной базе установки РЭПС. Параметры пучка: $E_p = 209 \text{ МэВ}$, $I_p = 5 \text{ МА}$, $f = 1 \text{ Гц}$, $\Delta t = 65 \text{ мкс}$, $dt_{\text{ch}} = 16 \text{ мкс}$, $t_{\text{изм}} = 60 \text{ мин}$.

Парциальные сечения, в частности, в данном случае сечения радиационного захвата определялись относительным способом, т.е. измерялись времяпролетные спектры на тонких образцах-радиаторах исследуемого материала и для принятого стандартного материала, например, Та-181, U-238 или золота, которые имеют хорошо известные сечения в определенных интервалах энергий. Этот способ позволяет определить неизвестное парциальное сечение по известному сечению стандарта и по отношению измеренных спектров и характеристик обоих образцов-фильтров согласно формуле вида (9).

$$\langle \sigma_c \rangle^{sh} = \langle \sigma_c \rangle^U \frac{M^U * S^U * n^U * N_c^s * \varphi * \varepsilon^U}{M^s * S^s * n^s * N_c^U * \varphi * \varepsilon^x} = \langle \sigma_c \rangle^U \frac{M^U * S^U * n^U * N_c^s}{M^s * S^s * n^s * N_c^U} \quad (9),$$

где M^U и M^s — мониторные коэффициенты для U и исследуемого образца, S^U и S^s — площадь образцов, n^U и n^s — толщины образцов-радиаторов, ε^U и ε^x — эффективности регистрации γ -квантов, $\varphi(E)$ — нейтронный поток.

Результаты измерений и анализ экспериментальных данных

Для исследования резонансной структуры полных и парциальных сечений, а также для определения спектрометрических характеристик установок, в частности, фоновых составляющих во времяпролетных спектрах в тепловой и надтепловой областях энергий проведены измерения пропусканий для металлического образца W толщиной 0.4 мм и других материалов. Измерения проводились ^3He счетчиком с эффективностью 100% на 50 м пролетной базе установки РЭПС импульсного нейтронного источника РАДЭКС с параметрами протонного пучка: $E_p = 209$ МэВ, $I_p = 5$ мА, $f = 1$ Гц, $\Delta t = 65$ мкс, $dt_{ch} = 16$ мкс, $t_{изм} = 60$ мин. Как видно из рис.5, максимум пика тепловых нейтронов расположен в районе 0.06 эВ. Фон под пиком составляет порядка 1%.

На рис. 6, 7, 8 изображены времяпролетные спектры после пропускания нейтронов через образец-радиатор $W(0.4$ мм) для сравнения характеристик разных импульсных источников нейтронов, измеренные с помощью ^{10}B детектора, расположенного на 124 м базе ИБР-30 ($P = 10$ кВт, $f = 100$ Гц, $\Delta t = 4$ мкс, $dt_{ch} = 2$ мкс) и ^3He счетчиком, установленного на 50 м пролетной базе источника РАДЭКС ($I = 5$ мА, $f = 50$ Гц, $\Delta t = 1$ мкс, $dt_{ch} = 1$ мкс). Следует отметить, что в случае ММФ фон составляет около 6%, тогда как на ИБР-30 фон равен эффекту. Энергетическое разрешение этих спектрометров с медленными нейтронными детекторами позволяет наблюдать только два резонанса W в районе 19 и 21 эВ. Третий резонанс W в

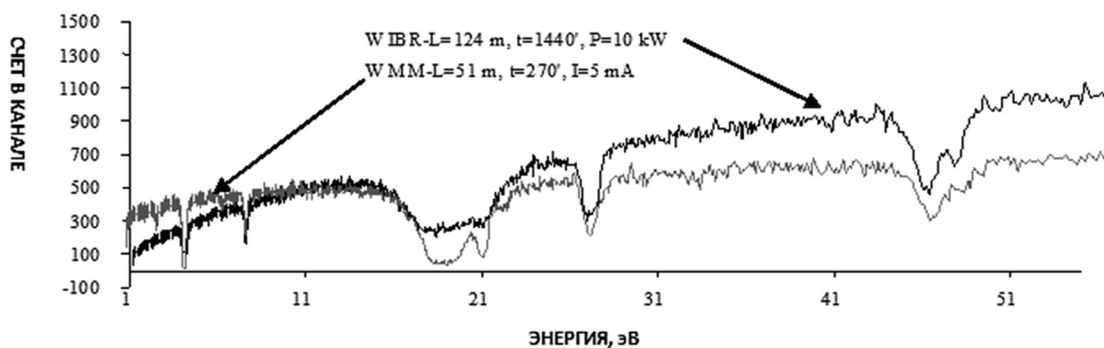


Рис. 6. Времяпролетные спектры после пропускания нейтронов через образец-радиатор $W(0.4 \text{ мм})$, измеренный с помощью $^{10}\text{В}$ детектора, расположенного на 124 м базе ИБР-30 ($P = 10 \text{ кВт}$, $f = 100 \text{ Гц}$, $\Delta t = 4 \text{ мкс}$, $dt_{\text{ch}} = 2 \text{ мкс}$) и ^3He счетчиком, установленным на 50 м пролетной базе источника РАДЭКС ($I = 5 \text{ мА}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $\Delta t = 1 \text{ мкс}$, $dt_{\text{ch}} = 1 \text{ мкс}$)

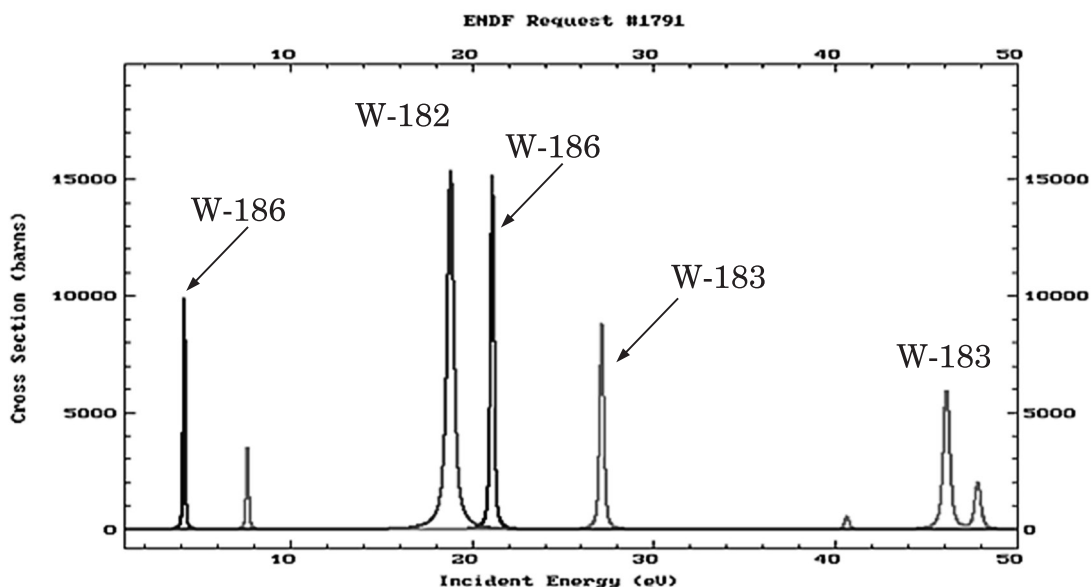


Рис. 7. Полные сечения изотопов вольфрама, рассчитанные по данным ENDF-B [6]

районе энергии 18 эВ ранее в экспериментах не наблюдался. Видимо, он принадлежит одному из двух еще неисследованных изотопов. Благодаря хорошему разрешению и высокому быстродействию нашего жидкостного (n,γ) -детектора удалось наблюдать этот новый сильный резонанс W . В дальнейшем предполагается провести аналогичные исследования на разделенных изотопах с целью определения резонансных параметров новых разрешенных резонансов.

На рис. 9 и 10 представлены времяпролетные спектры Mn , Mo , Nb , In , Ho , Ta , измеренные на установке РЭПС источника нейтронов РАДЭКС.

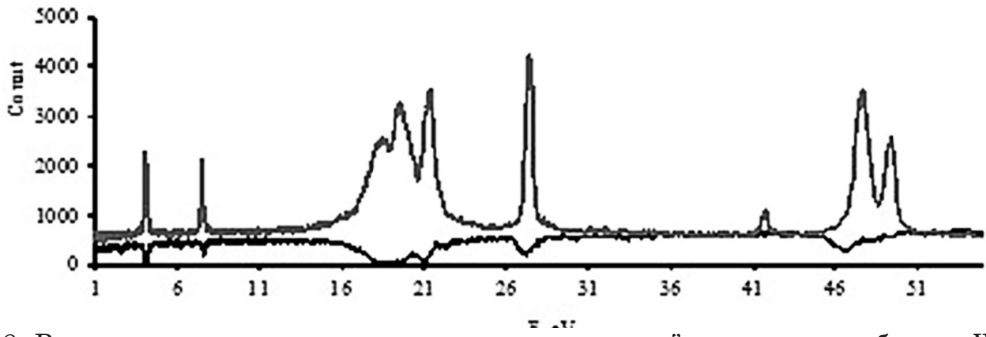


Рис. 8. Времяпролетные спектры после пропускания нейтронов через образец W (0.4 мм), измеренные с помощью жидкостного (n, γ)-детектора на 48.5 м базе и ^3He счетчика на 51 м пролетной базе РАДЭКС ($E_p = 209$ МэВ, $I = 5$ мА, $f = 50$ Гц, $\Delta t = 1$ мкс, $dt_{\text{ch}} = 1$ мкс)

В дальнейшем будут определены их резонансные параметры. Раздвоение марганцевого резонанса с энергией 336 кэВ можно объяснить наличием Mn в заглушках нейтроновода. Для сравнения на рис.6 приводятся времяпролетные спектры вольфрама, измеренные при использовании в качестве источника нейтронов реактора ИБР-30.

Для удаления рециклических фоновых нейтронов и определения фоновых составляющих в спектрах на нейтронных пучках постоянно находились фильтры из карбида бора в случае ИБР-30 (10 мм) или Cd (1 мм) и для установки РАДЭКС.

Помимо измерения времяпролетных спектров на установке РАДЭКС были проведены также измерения на 22.4 м пролетной базе импульсного источника тепловых нейтронов ИН-06 на ММФ с целью определения потока тепловых нейтронов и фоновых составляющих в спектрах. С этой

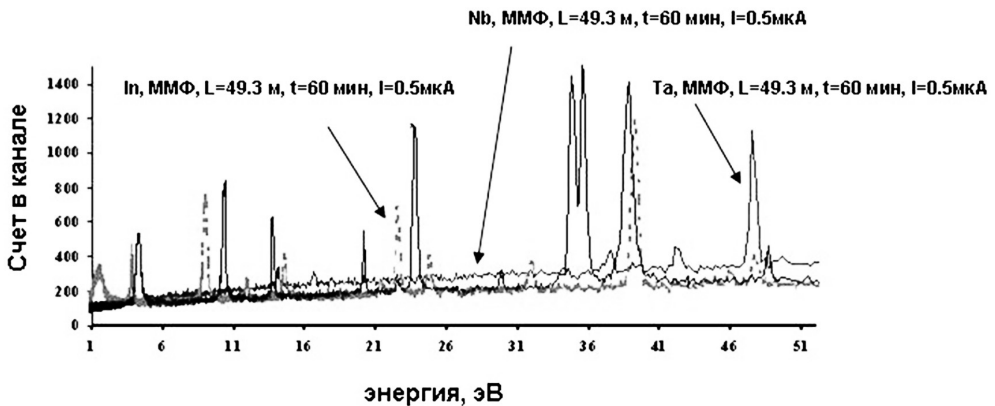


Рис. 9. Времяпролетный спектр после пропускания нейтронов через образцы-радиаторы ^{93}Nb ($d = 2$ мм), In ($d = 0.5$ мм), ^{181}Ta ($d = 0.2$ мм), измеренный с помощью жидкостного (n, γ)-детектора, расположенного на 49.3 пролетной базе. Параметры протонного пучка: ($E_p = 209$ МэВ, $I_p = 5$ мА, $f = 50$ Гц, $\Delta t = 1.5$ мкс, $dt_{\text{ch}} = 1$ мкс).

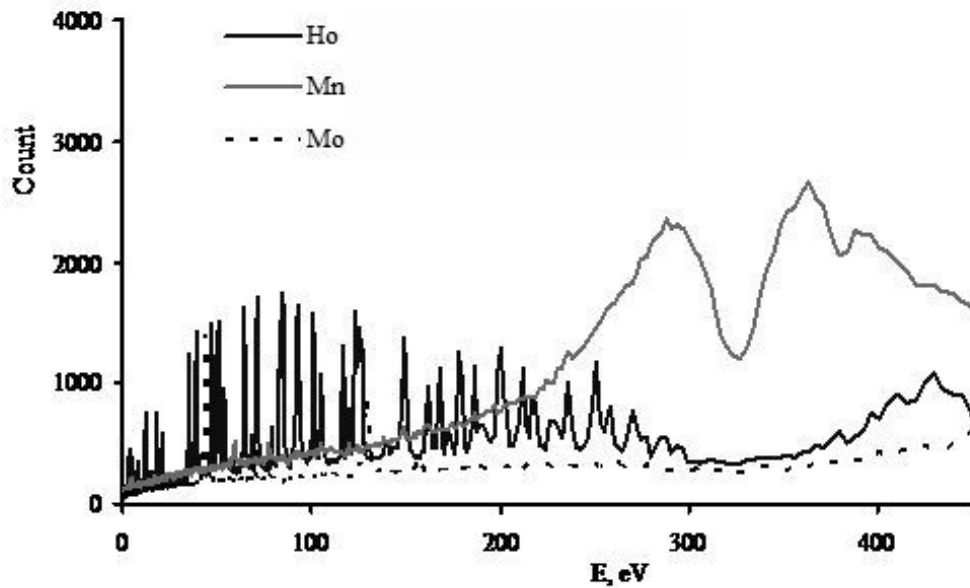


Рис. 10. Времяпролетные спектры после прохождения нейтронов через образцы ^{55}Mn ($d=2$ мм), ^{67}Ho ($d=5$ мм) и Mo ($d=0.4$ мм), измеренные с помощью жидкостного (n,γ)-детектора на 50 м пролетной базе установки РЭПС при работе ММФ с параметрами протонного пучка — $E_p = 209$ МэВ, $I_p = 5$ мА, $f = 50$ Гц, $\Delta t = 1.5$ мкс, $dt_{\text{ch}} = 1$ мкс

целью многонитяной ^3He счетчик был перенесен с 50 м пролетной базы РАДЭКСА на длинную пролетную базу импульсного источника тепловых нейтронов ИН-06. С помощью быстродействующей системы накопления было измерено несколько времяпролетных спектров, в том числе, изображенных на рис. 11 для открытого пучка и при наличии на нейтронном пучке листа кадмия толщиной 1 мм.

Из спектра на рис. 11 был вычислен импульсный поток на торцевой поверхности ^3He счетчика, который оказался равным 821 н/см 2 с при энергии протонов $E_p = 209$ МэВ, $I_p = 5$ мА, $f = 50$ Гц, $\Delta t = 90$ мкс.

Заключение

Итак, проведена значительная работа по созданию экспериментальных установок и разработки методик измерения на действующем в настоящее время отечественном импульсном источнике нейтронов РАДЭКС ИЯИ РАН г.Троицк. Проведены пробные измерения времяпролетных спектров на образцах Mn, Mo, Nb, In, Ho, Ta, W, U по методу времени пролета. Разработан и создан быстродействующий измерительный модуль, накапливающий экспериментальную информацию непосредственно от детекторов нейтронов и γ -лучей на компьютер, минуя промежуточные

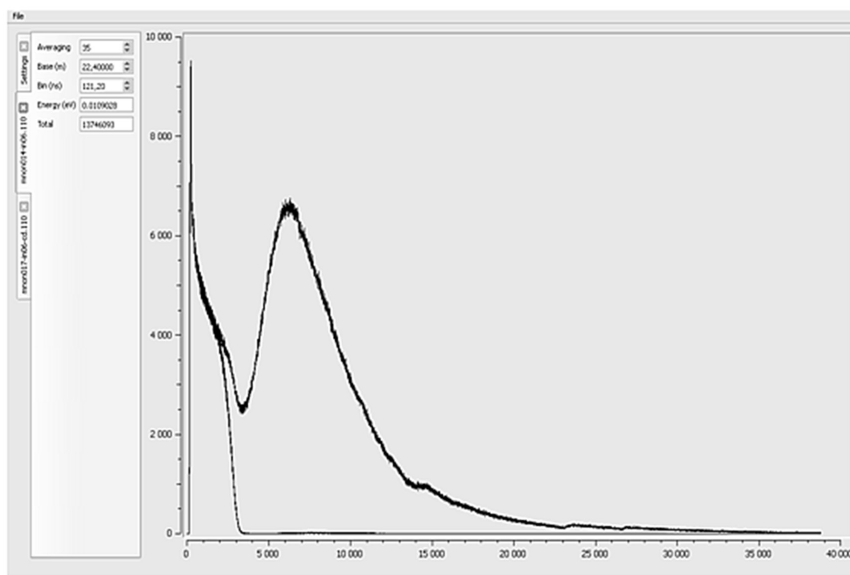


Рис.11. Времяпролетные спектры открытого пучка при наличии образца кадмия, измеренные на 22.4 м пролетной базе ИН-06 с помощью быстрой накопительной системы и ^3He счетчика при ширине временного канала 121.212 нс в 321240 каналах ($t = 39500$ мкс)

запоминающие и передающие устройства. Планируется продолжить проведение экспериментальных исследований резонансной структуры нейтронных сечений по описанным выше методикам на этих современных импульсных источниках нейтронов.

Авторы благодарят за содействие в проведении этих работ сотрудников ИЯИ РАН и ЛНФ ОИЯИ.

Литература

1. Benetskiy V.A., Beketov F.Z., Grachev M.I. et al. Preprint INR RAS, INR-1058/2001, 2001.
2. Берлев А.И., Григорьев Ю.В. Установка РЭПС для исследования структуры нейтронных сечений и фундаментальных свойств нейтрона: Препринт ИЯИ РАН № 1183/3007; М: ИНР РАН, 2007.
3. Григорьев Ю.В., Китаев В.Я., Георгиев Г.П. Препринт ФЭИ № 391. Обнинск: ЭИ, 1994.
4. Blokhin A.I., Ignatyuk A.V., Kuzminov B.D. et al. // Inter. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology (Julich, 1991). Julich: FRG, 1991. P. 800.
5. Sinitsa V.V. Program for calculating the group constants using the library of evaluated neutron data, VANT, ser. Nuclear Constants. 1984, v.5 (59), p.34.
6. Rose P.F., Dunford C.K., ed. ENDF-102, Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File, ENDF, report BNL, Upton, New York, 11973, USA, 1988.

