

УДК 539.1.074.8+539.1.074.23+539.12-164

# Исследование возможности дискриминации $\gamma$ -фона в нейтронном спектрометре с пропорциональным счетчиком протонов отдачи

Ю. И. Виноградов, О. П. Вихлянцев,  
А. В. Курякин, А. М. Швецов

*Исследована возможность расширения диапазона измерения нейтронного спектрометра с пропорциональным счетчиком протонов отдачи в область низких энергий при работе в полях смешанного  $n$ -,  $\gamma$ -излучения за счет разделения импульсов от протонов отдачи и электронов, индуцированных  $\gamma$ -излучением. С помощью цифрового осциллографа получен массив данных о форме импульсов счетчика при его облучении в поле смешанного  $n$ -,  $\gamma$ -излучения ( $^{252}\text{Cf}$ ) и в поле  $\gamma$ -квантов (комплект СОСГИ-М). В результате обработки полученных данных показано, что существует возможность различения импульсов от протонов отдачи и электронов. При этом для источника  $^{252}\text{Cf}$  нижняя граница рабочего диапазона нейтронного спектрометра может быть понижена до  $\approx 80$  кэВ.*

## Нейтронный спектрометр на базе пропорционального счетчика

Во ВНИИЭФ был разработан нейтронный спектрометр с пропорциональным газовым счетчиком протонов отдачи, который в течение ряда лет использовался в нейтронных измерениях [1, 2]. Основные параметры счетчика: длина 1 м; диаметр 75 мм; наполнение: метан 3 атм с небольшой добавкой  $^3\text{He}$ ; относительное энергетическое разрешение  $\eta \approx 3,7\%$ ; нижний предел энергии для спектрометра равен 50 кэВ, верхний предел  $\approx 8$  МэВ; эффективность регистрации нейтронов для источника нейтронов спонтанного деления  $^{252}\text{Cf} \approx 13,9\%$ .

Пропорциональные газовые счетчики, практически как и все другие детекторы нейтронов, чувствительны к  $\gamma$ -квантам, которые в нейтронных измерениях являются сопутствующим фоном. По этой причине измерения нейтронных спектров в области низких энергий затруднены, так как в экспериментальный аппаратный спектр вносятся искажения, которые приводят к получению некорректных восстановленных спектров нейтронов. Значение энергии, ниже которой сказывается влияние  $\gamma$ -фона, зависит от материала и геометрии счетчика, а также от состава и давления рабочего газа. Для используемого в настоящей работе счетчика эта энергия без применения каких-либо способов дискриминации составляет  $\approx 0,5$  МэВ.

## Методы дискриминации $\gamma$ -фона

Уменьшить влияние  $\gamma$ -фона можно различными способами, например путем физического экранирования  $\gamma$ -излучения или расчетным методом. Физическое экранирование позволяет суще-



ственно уменьшить  $\gamma$ -фон, но при этом возникают проблемы, связанные с искажением измеряемого нейтронного спектра. Расчетный метод учета  $\gamma$ -фона весьма сложен и обладает невысокой точностью.

Наилучшим методом дискриминации  $\gamma$ -фона является использование электронных средств, которые позволяют различать импульсы от протонов отдачи и электронов по их форме. Техническая реализация дискриминаторов по форме импульса для пропорциональных счетчиков базируется на методах "деления" и "времени нарастания" [3]. Электронные схемы  $\gamma$ -дискриминаторов для пропорциональных газовых счетчиков, основанные на этих методах и описанные в литературе, достаточно сложны [3–6]. Поэтому, прежде чем проводить разработку схем дискриминации  $\gamma$ -фона для нашего нейтронного спектрометра, следовало изучить особенности формы импульсов при регистрации нейтронов и  $\gamma$ -квантов нашим пропорциональным счетчиком, выбрать метод разделения и путем математической обработки полученных данных оценить качество разделения и порог дискриминации  $\gamma$ -фона.

### Эксперименты по исследованию возможности дискриминации $\gamma$ -фона

Для проведения этих исследований нейтронный спектрометр был дополнен каналом регистрации формы импульса (рис. 1), который включал быстрый усилитель (БУ) модели 2111 (фирма "Canberra") и цифровой осциллограф (ЦО) типа TDS-3034В (фирма "Tektronix"), подключенный к персональному компьютеру (ПК) через интерфейс RS-232.

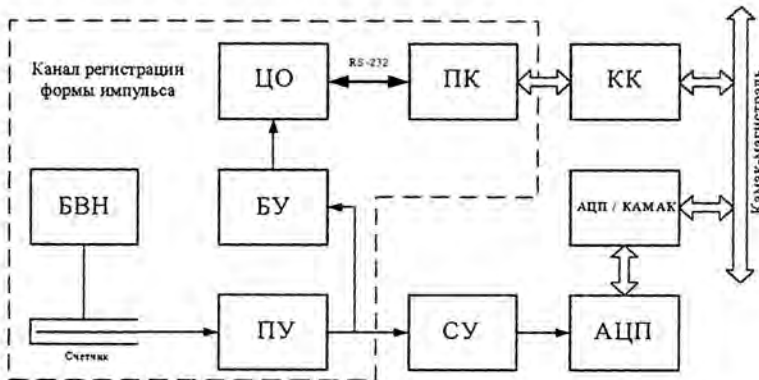


Рис. 1. Нейтронный спектрометр с каналом регистрации формы импульса

Минимальная длительность фронта импульса со счетчика при регистрации нейтронов и гамма-квантов составляет 500 нс. Зарядочувствительный предусилитель (ПУ) 1105А имеет собственное время нарастания около 10 нс, что позволяет регистрировать форму переднего фронта выходного импульса практически без искажений. Время спада этого предусилителя фиксировано и составляет 50 мкс, что может приводить к наложениям импульсов. Полоса частот быстрого усилителя лежит в пределах от 1 кГц до 45 МГц. Запоминающий цифровой осциллограф TDS-3034В позволяет проводить оцифровку входного сигнала с частотой выборок до 100 МГц. Рабочее напряжение счетчика, снимаемое с блока высокого напряжения (БВН), было выбрано равным 3,2 кВ. Относительно величины энергетического разрешения счетчика самым оптимальным является напряжение 2,7 кВ, однако коэффициент газового усиления при напряжении 3,2 кВ в  $\approx 2,5$  раза больше, чем при напряжении 2,7 кВ. Это позволяло работать с лучшим значением отношения сигнал/шум.



Спектрометрический канал, включающий спектрометрический усилитель (СУ) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП), использовался для настройки рабочего режима – измерения относительного энергетического разрешения счетчика в поле тепловых нейтронов и проведения энергетической калибровки шкалы анализатора. Доступ к данным, зарегистрированным аналого-цифровым преобразователем со стороны КАМАК-магистральной крейта, обеспечивался интерфейсным модулем АЦП/КАМАК. Для связи КАМАК-крейта с персональным компьютером использовался крейт-контроллер (КК).

Для управления цифровым осциллографом и сбора данных была разработана специальная программа на базе программного пакета CRW-DAQ [7, 8]. Программа обеспечивала дистанционное управление осциллографом и позволяла в автоматическом режиме читать данные из памяти осциллографа и записывать осциллограммы импульсов на жесткий диск персонального компьютера. Для передачи каждой осциллограммы требовалось  $\approx 5$  с. Данные записывались в файл в виде текстовой таблицы время – амплитуда.

При изучении формы импульсов осциллограф работал в режиме запуска входным сигналом, уровень запуска был выбран 30 мВ, что соответствует энергии  $\approx 0,05$  МэВ. Для получения хорошего временного разрешения была выбрана длительность развертки 5 мкс, при этом регистрировалась предыстория за время, равное 8 % от выбранной развертки. Это позволяло достоверно определять нулевой уровень сигнала. Частота оцифровки составляла 50 МГц и соответственно в память осциллографа записывались координаты 2500 точек.

Измерения в смешанных полях нейтронного и  $\gamma$ -излучения проводились с источником из  $^{252}\text{Cf}$ , который располагался на расстоянии  $\approx 1,5$  м от торца счетчика на его оси симметрии. Источником  $\gamma$ -квантов служил комплект СОСГИ-М. В состав комплекта входят шесть источников (в скобках указана энергия наиболее интенсивных  $\gamma$ -линий):  $^{56}\text{Co}(0,511 \text{ МэВ})$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}(0,658 \text{ МэВ})$ ,  $^{133}\text{Ba}(0,081 \text{ МэВ})$ ,  $^{152}\text{Eu}(0,122 \text{ МэВ})$ ,  $^{182}\text{Ta}(1,122 \text{ МэВ})$ ,  $^{192}\text{Ir}(0,316 \text{ МэВ})$ . Кроме указанных линий в спектре излучения входящих в комплект изотопов присутствует большое число линий меньшей интенсивности. Если к тому же учесть наличие подложки в энергетических спектрах изотопов, то можно утверждать, что используемые  $\gamma$ -источники в совокупности охватывают широкий энергетический диапазон и испускают непрерывный спектр  $\gamma$ -квантов.

Кроме измерений на быстрых нейтронах и  $\gamma$ -квантах были выполнены измерения на тепловых нейтронах, что позволило прокалибровать записываемые данные в единицах энергии по пику реакции  $^3\text{He}(n, p)\text{T}$ . В качестве источника тепловых нейтронов использовался  $^{252}\text{Cf}$ , помещенный в полиэтиленовый замедлитель.

## Результаты измерений

В процессе проведения исследований регистрируемые от нейтронов и  $\gamma$ -квантов импульсы оцифровывались с помощью ЦО (см. рис. 1), т. е. каждый регистрируемый импульс представлялся в виде таблицы из 2500 пар чисел, первым из которых являлось значение текущего времени, а вторым – значение огибающей напряжения импульса в данный момент времени. В результате проведенных измерений было накоплено большое количество файлов данных (порядка 60000 осциллограмм). Процесс обработки каждой осциллограммы достаточно сложен. Требуется выполнить фильтрацию шумов, исключить импульсы большой амплитуды, выходящие за пределы диапазона регистрации, обнаружить и исключить импульсы с наложениями, а для кондиционных сигналов определить те или иные параметры формы.

В пакете CRW-DAQ [7] с использованием встроенного языка программирования Daq Pascal было написано специальное программное обеспечение, которое позволяло проводить обработку полученных данных в ручном и автоматическом режимах. Графический интерфейс программы



обработки включает в себя панель управления, графическое окно для отображения текущей осциллограммы и два спектрометрических окна для отображения полученных промежуточных величин. Панель управления позволяет задавать списки файлов, подлежащих обработке. В ручном режиме можно просмотреть осциллограмму импульса, провести визуальный анализ и решить, пропускать ее на дальнейшую обработку или нет. Ручной режим удобен в тех случаях, когда необходимо просмотреть и обработать небольшое количество зарегистрированных сигналов. В автоматическом режиме все графические окна сворачиваются (для увеличения быстродействия), и пользователь не может наблюдать за процессом обработки.

При обработке осциллограмм производилось сглаживание путем вычисления взвешенного среднего интегрального значения с переменной шириной окна. Чем ближе точка к фронту, тем меньше ширина окна сглаживания. В процессе дальнейшей обработки выполнялись следующие операции:

- отсшивались импульсы неправильной формы, искаженные наводками;
- выполнялась привязка к положению фронта импульса;
- определялась максимальная амплитуда сглаженного импульса  $U_{\max}$ ;
- определялась длительность фронта  $t_f$  на интервале от 0,1 до 0,9 от максимальной амплитуды;
- вычислялся максимум производной по времени  $\dot{U}_{\max}$  на переднем фронте импульса.

В результате обработки массива осциллограмм, полученных в калибровочных измерениях, построено распределение импульсов по максимальной амплитуде, в котором наблюдается пик, обусловленный реакцией  ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$ . По положению этого пика была выполнена энергетическая калибровка измерительного канала  $E(U)$ . С учетом результата энергетической калибровки параметр  $U_{\max}$  был перенормирован в параметр  $E$ .

По этим данным были построены двумерные распределения событий по параметрам  $t_f - E$  и  $\dot{U}_{\max} - E$  как для источника смешанного нейтронного и  $\gamma$ -излучения, так и для источника  $\gamma$ -излучения. В распределении по параметрам  $\dot{U}_{\max} - E$ , полученном с источником  ${}^{252}\text{Cf}$ , четко выделяются две группы событий, связанных с регистрацией нейтронов и  $\gamma$ -квантов. При уменьшении энергии эти области частично перекрываются, что собственно и определяет порог дискриминации  $\gamma$ -фона. Соответствующее распределение, полученное по результатам измерений с источником  $\gamma$ -квантов, подтверждает правильность идентификации этих групп.

В соответствии с методом деления было получено более удобное для анализа двумерное распределение событий в координатах  $\dot{U}_{\max}/U_{\max} - E$ . Параметр  $\dot{U}_{\max}/U_{\max}$  по своему смыслу обратно пропорционален длительности электронной лавины в пропорциональном счетчике. Для источника  ${}^{252}\text{Cf}$  группы событий, связанных с нейтронами и  $\gamma$ -квантами, хорошо разделены (рис. 2,а). Распределение, полученное для источника  $\gamma$ -квантов (рис. 2,б), согласуется с  $\gamma$ -компонентой на рис. 2,а. Из полученных данных можно сделать вывод, что события, связанные с регистрацией нейтронов и  $\gamma$ -квантов, достаточно хорошо разделены, и их дискриминацию легко осуществить по параметру  $\dot{U}_{\max}/U_{\max}$ . При этом очевидно, что качество дискриминации зависит от энергии, и уровень дискриминации должен устанавливаться исходя из компромисса между нижним пределом измерений и коэффициентом подавления  $\gamma$ -фона.

Для более корректного сравнения спектральных характеристик  $\gamma$ -излучения источника из  ${}^{252}\text{Cf}$  и набора  $\gamma$ -источников СОСГИ-М были получены распределения числа импульсов по параметру  $\dot{U}_{\max}/U_{\max}$  для всего исследуемого энергетического диапазона 0,05–0,5 МэВ (рис. 3). При этом данные для СОСГИ-М были перенормированы из условий равенства площадей под  $\gamma$ -распределением. Видно, что распределения для импульсов, обусловленных  $\gamma$ -квантами, в обоих случаях практически одинаковы по форме.

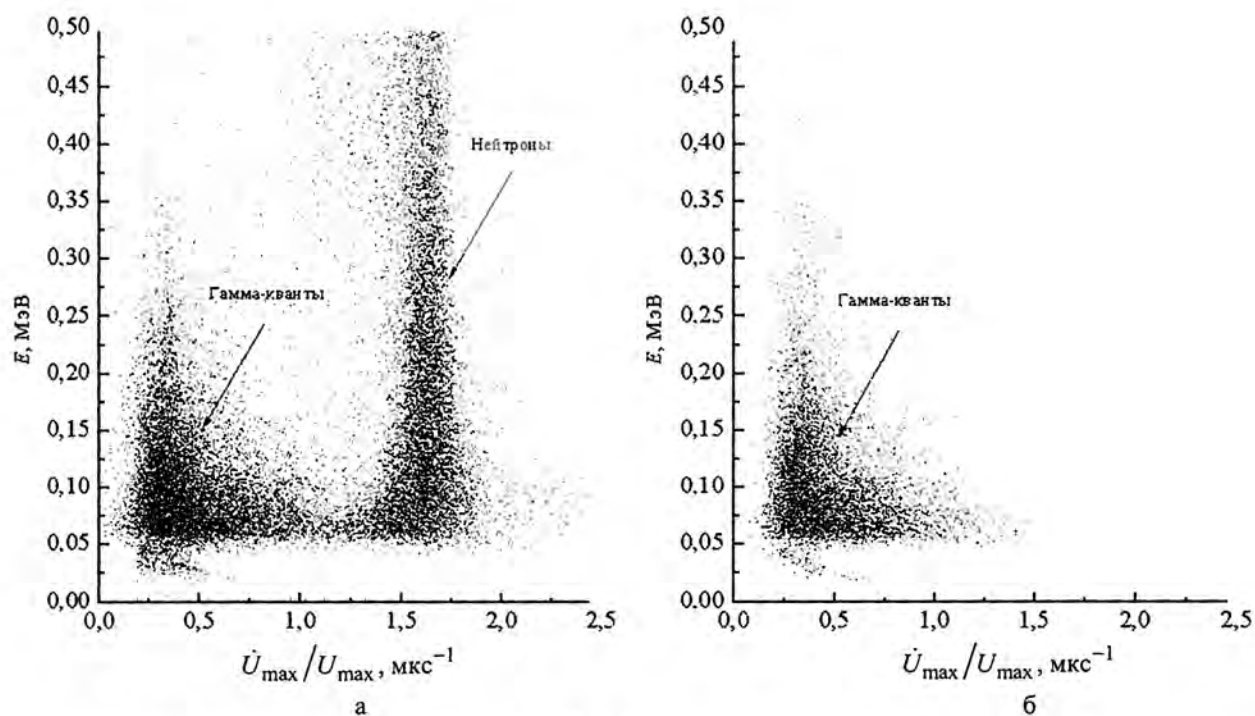


Рис. 2. Двумерные распределения для событий, полученных с источником  $n$ -,  $\gamma$ -излучения (а) и с набором источников  $\gamma$ -излучения (б)

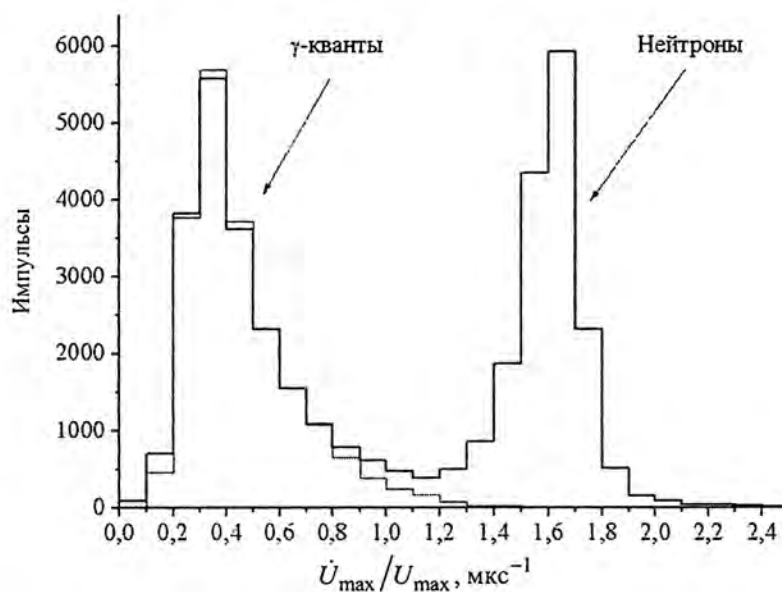


Рис. 3. Распределение импульсов по параметру  $\dot{U}_{\max}/U_{\max}$  для диапазона энергии от 0,05 до 0,5 МэВ: — — данные для источника смешанного нейтронного и  $\gamma$ -излучения; — — данные для набора источников  $\gamma$ -излучения



Для предварительной оценки нижнего диапазона энергии, при котором еще возможно надежное разделение импульсов от протонов отдачи и электронов, был выбран критерий 5 %-ного ( $P = 0,95$ ) перекрытия распределений, никак не связанный с порогом дискриминации. Это означает, что если для данной энергии отношение площади перекрытия распределений к площади распределения для протонов отдачи оказывается меньше 5 %, то именно эту энергию следует считать нижним пределом измерений. Для получения такой оценки экспериментальные данные аппроксимировались суммой двух (для нейтронов и  $\gamma$ -квантов) логнормальных распределений.

Была выполнена аппроксимация данных, полученных для  $^{252}\text{Cf}$  на интервалах шириной 0,01 МэВ в диапазоне от 0,05 до 0,1 МэВ, и вычислены отношения площади перекрытия кривых  $\Delta S_{\text{общ}}$  к площади под нейтронной кривой  $S_n$ . Полученная зависимость  $\Delta S_{\text{общ}}/S_n$  от энергии представлена на рис. 4. Видно, что кривая для  $^{252}\text{Cf}$  пересекает 5 %-ный уровень при энергии  $\approx 0,084$  МэВ. Это значение энергии можно считать нижним энергетическим порогом спектрометра с  $n$ -,  $\gamma$ -разделением при измерении спектра нейтронов спонтанного деления источника  $^{252}\text{Cf}$  при описанных ранее режимах работы пропорционального счетчика.

Для  $^{252}\text{Cf}$  соотношение между количеством вылетающих из источника  $\gamma$ -квантов и нейтронов ( $N_\gamma/N_n$ ) составляет  $\approx 2,5$ . Известно, что для многих других источников это соотношение существенно меньше. Поэтому можно предположить, что порог регистрации для таких источников будет ниже.

Для гипотетических источников с функциями распределения для нейтронов и  $\gamma$ -квантов, подобными функциям распределения для  $^{252}\text{Cf}$ , путем перенормировки функций в соответствии с отношениями ( $N_\gamma/N_n$ ) были выполнены расчеты  $\Delta S_{\text{общ}}/S_n$  от энергии. Полученные результаты для значений  $N_\gamma/N_n = 0,2; 0,3; 0,7$  представлены на рис. 4. Расчетные энергетические пороги составили 0,061; 0,067 и 0,077 МэВ соответственно.

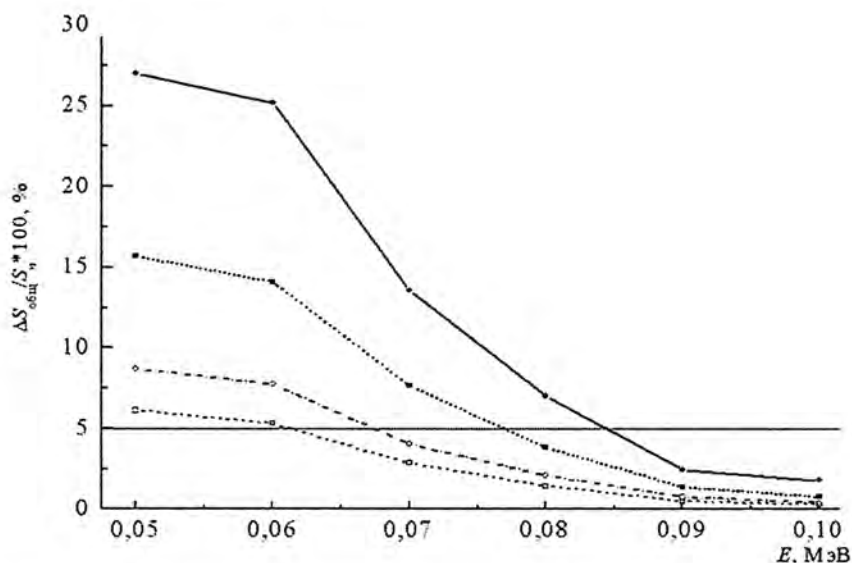


Рис. 4. Зависимости от энергии относительного перекрытия площадей распределений  $\dot{U}_{\text{max}}/U_{\text{max}}$  для нейтронов и  $\gamma$ -квантов для разных соотношений  $N_\gamma/N_n$ :  $\bullet$  — 2,5 ( $^{252}\text{Cf}$ );  $\blacksquare$  — 0,7;  $\circ$  — 0,3;  $\square$  — 0,2; — — 5 %-ный допустимый порог перекрытия площадей

### Заключение

Выполненные исследования показали, что спектрометр нейтронов на базе пропорционального счетчика протонов отдачи может быть дополнен средствами дискриминации  $\gamma$ -фона, которые позволят различать импульсы от протонов отдачи и электронов по их форме. Качество дискриминации зависит от энергии протонов и электронов, и уровень дискриминации должен устанавливаться исходя из компромисса между нижним пределом измерений и коэффициентом подавления  $\gamma$ -фона. Так, для  $^{252}\text{Cf}$  нижний энергетический порог разделения импульсов от нейтронов и  $\gamma$ -квантов составляет  $\approx 80$  кэВ. Дальнейшим развитием этой работы будет создание аппаратурно-программного комплекса спектрометра, обеспечивающего разделение импульсов от нейтронов и  $\gamma$ -квантов за счет регистрации их амплитуды и максимума первой производной по времени для переднего фронта.

### Список литературы

1. Shvetsov A. M., Egorov V. P., Fomushkin E. F. et al. Measurements of leakage neutrons spectra for spherical assemblies of  $^{235}\text{U}$ (90 %),  $^{235}\text{U}$ (36 %), and  $^{239}\text{Pu}$ (98 %) // Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste: Italian Phis. Soc. Inc., 1997. Part 2. P. 1359.
2. Марковский Д. В., Чувилин Д. Ю., Загрядский В. А. и др. Оценка и тестирование ядерных данных ванадия в интегральных бенчмарк-экспериментах на 14-МэВ нейтронах // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2003. Вып. 4. С. 126.
3. Obu M., Ichimori T., Shirakata K. Gamma-Ray Discrimination in a Proton-Recoil Spectrometer for a Fast Reactor Spectrum Measurement // Nuclear Instruments and Methods. 1970. Vol. 89. P. 131.
4. Bennett E. F. Proportional Counter Proton-Recoil Spectrometer with Gamma Discrimination // Review of Scientific Instruments. 1962. Vol. 33, N 11. P. 1153.
5. Kinbara S., Kumahara T. General Purpose Pulse Shape Discriminating Circuit // Nuclear Instruments and Methods. 1969. Vol. 70, N 2. P. 173.
6. Vehar D. W., Clikeman F. M. Neutron Spectrum Measurements Using Miniature Proton Recoil Proportional Spectrometers // Nuclear Instruments and Methods. 1981. Vol. 190. P. 351.
7. Курякин А. В., Виноградов Ю. И. Программное обеспечение для автоматизации исследовательских установок // Сборник докл. Второго международного семинара "Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-04". Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2005. С. 411.
8. Курякин А. В., Виноградов Ю. И. Программа для автоматизации физических измерений и экспериментальных установок. Реестр программ для ЭВМ РФ. 2006 г. Свидетельство о регистрации № 2006612848.



## Feasibility of $\gamma$ -Background Discrimination in Neutron Spectrometer with the Proportional Counter of Recoil Protons

Yu. I. Vinogradov, O. P. Vikhlyantsev, A. V. Kuryakin, A. M. Shvetsov

*Feasibility to broaden the measuring range of the neutron spectrometer with the proportional recoil protons counter in the region of low energies, when operating within the fields of the mixed  $n$ - $\gamma$  radiation, by separating the pulses, generated by recoil protons and  $\gamma$ -radiation-induced electrons was examined. Using a digital oscilloscope the data array on the form of the counter pulses under irradiation in the mixed  $n$ - $\gamma$  field ( $^{252}\text{Cf}$ ) and in  $\gamma$ -quanta field (SOSGI-M complex) was recorded. With the data processed in place it was demonstrated that the pulses can be discriminated from recoil protons and electrons. Here-with the lower boundary of the operating range of the neutron spectrometer for  $^{252}\text{Cf}$  source can be downscaled to  $\approx 80$  keV.*