

Заключение. Предложенный метод оптимизации параметров прямоугольного каскада позволяет избежать поиска начальных приближений для концентрации компонентов разделяемой смеси в выходящих потоках. Сравнение предложенного метода с другими, а также с параметрами модельного *R*-каскада показало возможность его использования для оптимизации параметров прямоугольного каскада при разделении смесей с произвольным числом компонентов.

Метод может быть обобщен на случай каскадов из участков прямоугольного профиля потока (прямоугольно-секционированных каскадов), а также применен для расчета оптимальных параметров прямоугольных каскадов независимо от метода разделения. В частности, он может быть использован для оптимизации параметров разделительных аппаратов колонного типа.

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда (проект № 18-79-00249).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orlov A.A., Ushakov A.A., Sovach V.P., Mymrina D.F. Modeling of nonstationary processes during separation of multicomponent isotope mixtures. — Sep. Sci. Technol., 2018, v. 53, № 5, p. 796—806.
2. Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей. Учебное пос. М., НИЯУ МИФИ, 2011. 368 с.
3. Aisen E.M., Borisevich V.D., Potapov D.V. e.a. Computing experiments for study of cadmium isotope separation by gas centrifuges. — Nucl. Instrum. Meth., 1998, v. 417, № 2—3, p. 428—433.
4. Zeng S., Ying C. A Method of separating a middle component in multicomponent isotope mixtures by gas centrifuge cascades. — In: Proc. 7th Workshop of Separation Phenomena in Liquids and Gases. Moscow, Russia, 2000, p. 100.
5. Потапов Д.В., Сулаберидзе Г.А., Холпанов Л.П. Расчет прямоугольно-секционированного каскада путем приближения фактора разделения. — Теорет. основы хим. технологии, 2000, т. 34, № 2, с. 147—151.
6. Палкин В.А., Фролов Е.С. Расчет и свойства прямоугольного каскада с заданными внешними концентрациями по целевому изотопу. — В сб.: VII Всерос. (международная) научная конф. «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». Звенигород, 2002 г., с. 124—129.
7. Sulaberidze G.A., Mustafin A.R., Smirnov A.Yu. e.a. Optimization of cascades with variable overall separation factors by various efficiency criteria. — J. Phys.: Conf. Ser., 2018, v. 1099, p. 012009.
8. Холпанов Л.П., Цюаньсинь Се, Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д. Расчет прямоугольного каскада с потерями рабочего вещества на ступенях и в коммуникациях при разделении многокомпонентных изотопных смесей. — Атомная энергия, 2008, т. 104, вып. 1, с. 17—23. // Kholpanov L.P., Tsyuan'sin' Se, Sulaberidze G.A., Borisevich V.D. Calculation of a Square Cascade with Losses of the Working Material in the Steps and Pipelines during Separation of Multicomponent Isotopic Mixtures. — Atomic Energy, 2008, v. 104, № 1, p. 23—32.
9. Xie Q., Yikun C. An efficient method for calculating multicomponent square cascades. — In: Proc. 11th Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases. Saint-Petersburg, 13—18 June, 2010, p. 114—121.
10. Brent R. Algorithms for Minimization without Derivatives. Englewood Cliffs, NY: Prentice-Hall, 1973. Ch. 3—4.
11. De la Garza A., Garrett G., Murphy J. Multicomponent isotope separation in cascades. — Chem. Engng Sci., 1961, v. 15, p. 188—209.

Поступила в Редакцию 10.03.20

УДК 539.125.52:621.384.654

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ С ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ ТИПА ЧАСТИЦ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ НЕЙТРОННЫХ И ГАММА-ИСТОЧНИКОВ В СМЕШАННЫХ ПОЛЯХ

Прокуронов М.В., Севастьянов В.Д., Янушевич А.В., Шибяев Р.М. (ВНИИФТРИ, Менделеево)
e-mail: n10381@yandex.ru

Актуальной проблемой в современной ядерной физике, ядерной энергетике и ядерной медицине является измерение спектральных и временных характеристик смешанных нейтронных и гамма-полей [1, 2]. Наибольшую информацию в таких экспериментах можно получить, используя детекторы, которые позволяют избирательно регистрировать электроны и протоны.

К ним относятся сцинтилляционные детекторы с цифровой идентификацией частиц по форме импульса и черенковские, которые регистрируют релятивистские частицы при превышении ими световой скорости, в том числе в импульсном режиме [3].

В общем случае наиболее полную информацию об ионизирующем излучении можно получить посредством измерения пространственно-временной, энергетической и угловой плотности потока частиц $f(r, t, e, \gamma)$ [4]. Эта функция задает распределение частиц (квантов) в пространстве r , времени t и по энергии e , т.е. определяет, сколько частиц, квантов, с какой энергией и в каком направлении γ приходят в любую точку среды (пространства) в каждый момент времени. Следовательно, и детектирующее устройство в идеальном случае должно измерять функцию $f(r, t, e, \gamma)$. Интроскоп при регистрации нейтронных и гамма-источников измеряет направление прихода γ -кванта, энергию, время, т.е. позволяет измерять функцию $f(r, t, e, \gamma)$. Это дает возможность определить положение источников ионизирующего излучения на поверхности и в пространстве.

Поэтому, помимо измерения спектральных и временных характеристик в смешанных полях, целесообразно рассмотреть возможность регистрации нейтронного и гамма-изображения их источников. Причем для такой регистрации следует проанализировать возможность использования интроскопов с кодированной апертурой [5—7]. Под радиационной интроскопией понимается совокупность методов изучения процессов, протекающих в различных средах, с помощью регистрации ионизирующего излучения [5]. Такой интроскоп состоит из коллиматора с кодированной апертурой, защиты от фонового излучения и позиционно-чувствительного детектора [8]. В коллиматоре имеются определенным образом расположенные отверстия, каждое из которых строит изображение на поверхности детектора подобно камере-обскуре и таким образом формируется теневое изображение. По массиву токов разрешающих элементов позиционно-чувствительного детектора декодируется и восстанавливается изображение гамма-источников. Это высокочувствительный метод с большим соотношением сигнал/фон. Конструкция коллиматора определяет поле зрения и угловое разрешение, а также оптимальное с минимальным искажением теневое изображение [6]. Детектор определяет чувствительность интроскопа к нейтронному и γ -излучению, спектрально-временные характеристики и возможность идентификации типа регистрируемых частиц. Для отдельной регистрации нейтронного и γ -изо-

бражения в таком интроскопе могут также использоваться детекторы, которые обладают избирательной регистрацией электронов и протонов. Они могут быть разработаны на основе сцинтилляционных детекторов с цифровой идентификацией частиц по форме импульса и черенковских. Интроскоп с кодированной апертурой и таким позиционно-чувствительным детектором позволяет измерять в эксперименте отдельно нейтронное и γ -изображение источников смешанного излучения. Такие интроскопы при выборе соответствующего детектора могут обладать временным разрешением до 1 нс и регистрировать изображение импульсных процессов [9].

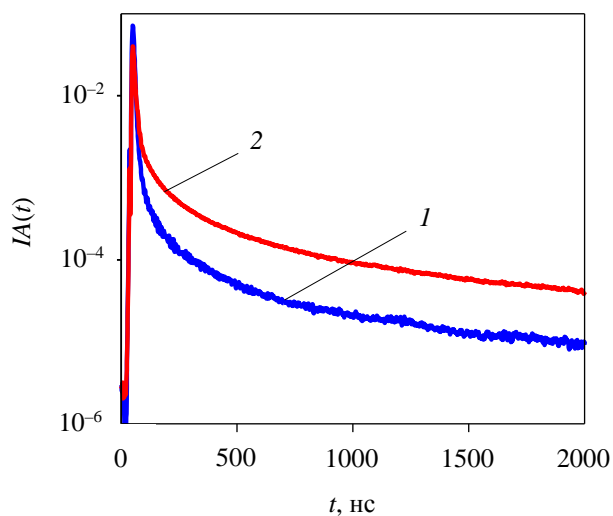
Следует отметить, что характеристики таких интроскопов в значительной мере определяются свойствами позиционно-чувствительного детектора. Поэтому далее рассмотрим построение и характеристики позиционно-чувствительных детекторов для регистрации смешанного нейтронного и γ -излучения.

Позиционно-чувствительные детекторы для регистрации смешанного нейтронного и γ -излучения. Основными характеристиками сцинтилляционных позиционно-чувствительных детекторов для регистрации γ -излучения являются чувствительность, пространственное и энергетическое разрешение, однородность и линейность изображения, временное разрешение. Этими характеристиками также должны обладать позиционно-чувствительные детекторы, идентифицирующие тип зарегистрированных частиц и изображение источников этих частиц. При регистрации в таких детекторах нейтрона или γ -кванта должны определяться пространственные координаты и время, энергия, выделенная частицей при взаимодействии с детектором, в сцинтилляционном детекторе — тип частицы. Также должна учитываться возможность высокой эффективности регистрации нейтронов и γ -квантов и максимального соотношения сигнал/фон, в том числе и за счет избирательной регистрации электронов и протонов и режекции наложенных импульсов.

Вариантов построения позиционно-чувствительных детекторов два. В первом — вариант гамма-камеры детектор состоит из монолитного сцинтиллятора, просматриваемого определенным множеством ФЭУ [8], во втором — модульный принцип построения, он является мат-

рицей отдельных детекторов. В модульном варианте регистрация импульсов отдельных детекторов, их преобразование в цифровую форму и обработка могут проводиться одновременно, параллельно и независимо один от другого. Это является оптимальным для повышения быстродействия, увеличения загрузки детекторов, т.е. регистрации максимальной плотности потока излучения. Поэтому модульный вариант является оптимальным для использования в интроскопах с кодированной апертурой. В этом случае основные параметры позиционно-чувствительного детектора будут определяться характеристиками отдельных модулей детекторов и их числом. Такой вариант применяется в медицинских томографах.

Сцинтилляционные детекторы с цифровой идентификацией нейтронов и γ -квантов по форме импульса. Подобные детекторы строятся на основе органических монокристаллов стильбена, паратерфинила и некоторых жидких сцинтилляторов. В них сцинтилляционный импульс имеет короткий фронт ~ 1 нс, спад характеризуется наличием быстрого $\tau_1 \sim 5$ нс и медленного компонента $\tau_2 \sim 300$ нс. Форма и интенсивность медленной составляющей существенно зависят от удельных ионизационных потерь. При этом соотношение между зарядом от быстрой составляющей и полного заряда равно 0,5—0,6 для протонов и 0,8—0,85 для электронов. На этом различии и разрабатываются методы идентификации частиц по форме импульса (рис. 1).



Р и с. 1. Временная зависимость тока импульса детектора на основе стильбена и ФЭУ Hamamatsu R6095, полученная при регистрации γ -квантов ^{137}Cs (1) и нейтронов ^{252}Cf (2) в энергетическом диапазоне 30—800 кэВ

Для регистрации светового излучения сцинтилляторов используются ФЭУ Hamamatsu R6095 (Япония) с временным $\tau_{0,5} \sim 4,5$ нс, $\tau_{\phi} \sim 4$ нс и энергетическим разрешением $< 9\%$ по γ -излучению источника ^{57}Co , сцинтиллятор NaI(Tl). Такой тип ФЭУ был выбран, исходя из постоянного быстрого компонента высвечивания сцинтиллятора ~ 5 нс. Использование этого ФЭУ позволяет получить высокое временное и энергетическое разрешение детектора и обеспечить высокие параметры идентификации нейтронов и γ -квантов [10, 11]. Для преобразования аналоговых сигналов детектора с длительностью фронта $\tau_{\phi} \sim 4$ нс в цифровую форму используются АЦП с частотой дискретизации 1 ГГц, полосой пропускания 300 МГц [12].

В цифровом методе оптимального фильтра зарегистрированным нейтрону и γ -кванту сопоставляется случайная величина S (S_{γ}, S_n):

$$S = \sum_{i=1}^N p_{oi} q_{i\gamma(\text{in})}, \text{ где } q_{i\gamma(\text{in})} \text{ — компоненты заряда,}$$

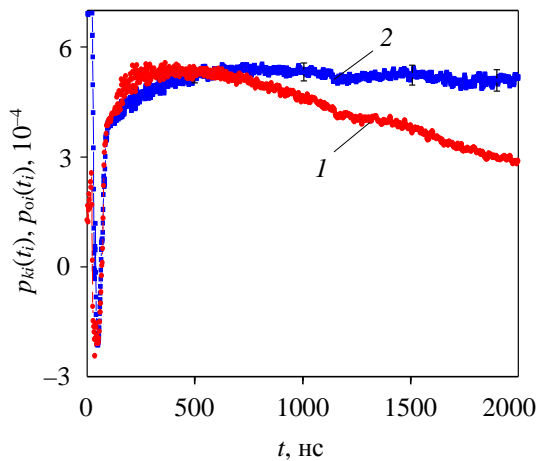
создаваемые в анодной цепи ФЭУ за время $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ при регистрации нейтрона q_{in} и γ -кванта $q_{i\gamma}$ [13]. Они являются независимыми случайными величинами с дисперсией, пропорциональной заряду $\sim q_{i\gamma(\text{in})}$. Вводится критерий

$$K1: K1 = (DS_n + DS_{\gamma}) / (\overline{S_{\gamma}} - S_n)^2. \text{ Из минимума}$$

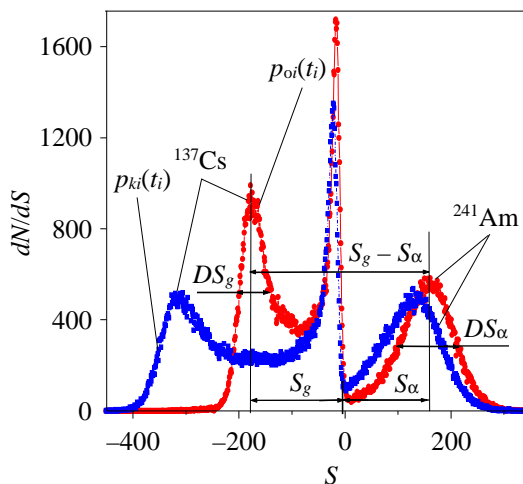
$K1$ находятся коэффициенты оптимального фильтра $p_{oi} = (\overline{q_{i\gamma}} - \overline{q_{in}}) / (\overline{q_{i\gamma}} + \overline{q_{in}})$. Здесь $\overline{q_{i\gamma}}$, $\overline{q_{in}}$ — средние компоненты заряда, полученные при регистрации нейтронов и γ -квантов. При определении типа зарегистрированной частицы анализируется сумма зарядов q_i , вызванных регистрацией данной частицы: $S = \sum_{i=1}^N p_{oi} q_i$. Если $S > 0$, зарегистрированная частица идентифицируется как нейтрон, если $S < 0$ — как γ -квант. Совокупность максимальных коэффициента блокировки $K_{\text{БЛ}} = NS_{\gamma} / NS_n$ и эффективности идентификации $\epsilon_N = NS_n / (NS_{\gamma} + NS_n)$, где NS_n , NS_{γ} — число импульсов в нейтронном и гамма-канале, достигается при коэффициентах оптимального фильтра, т.е. при минимуме критерия $K1$.

Помимо критерия $K1$, можно сформулировать другие условия экстремума, которые позволяют находить коэффициенты p_{ki} в сумме

$S = \sum_{i=1}^N p_{oi} q_i$, соответствующие максимальному коэффициенту блокировки, при заданной эффективности идентификации [10, 11]. Так, задавая минимальную эффективность идентификации, что эквивалентно неравенству $DS_n/\bar{S}_n^2 < \alpha$, коэффициенты p_{ki} , которые соответствуют максимальному коэффициенту блокировки, находятся из условия минимума относительной дисперсии $K2 = DS_\gamma/\bar{S}_\gamma^2$ при ограничении $DS_n/\bar{S}_n^2 < \alpha$, $\bar{S}_\gamma < 0$, $\bar{S}_n > 0$ (рис. 2, 3). При регистрации и идентификации нейтронов и γ -квантов коэффициенты $p_{ki}(t_i)$ обеспечивают немного меньшую эффективность идентификации нейтронов и больший коэффициент



Р и с. 2. Временная зависимость коэффициентов, соответствующих максимальному коэффициенту блокировки γ -квантов $p_{ki}(t_i)$ (1), и оптимального фильтра $p_{oi}(t_i)$ (2), полученные при регистрации детектором на основе стильбена γ -квантов ^{137}Cs и нейтронов ^{252}Cf



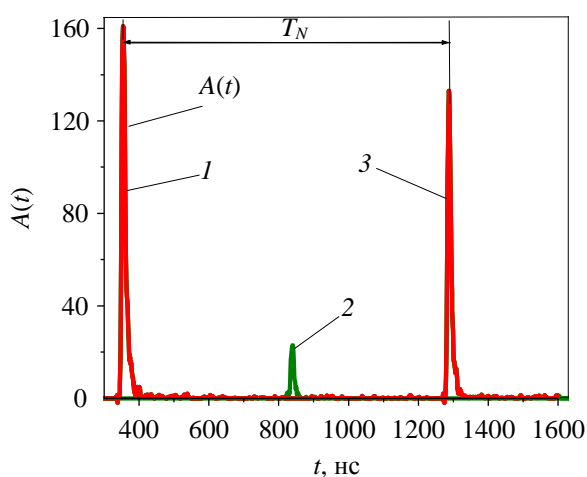
Р и с. 3. Дифференциальное распределение случайных величин S_γ и S_α при регистрации γ -квантов и α -частиц с использованием коэффициентов $p_{oi}(t_i)$ и $p_{ki}(t_i)$

блокировки γ -квантов, чем при использовании коэффициентов p_{oi} , что и показано на рис. 3 в виде смещения кривых. Коэффициенты блокировки γ -квантов и эффективность идентификации нейтронов могут быть оптимизированы путем расчета коэффициентов p_{ki} для уменьшения искажений теневых нейтронных и γ -изображений при регистрации смешанного излучения.

Для цифровой идентификации нейтронов и γ -квантов, т.е. вычисления суммы $S = \sum_{i=1}^N p_i q_i$

необходимо провести поиск максимумов импульсов детекторов. По времени, соответствующему максимуму функции $A(t_i)$, устанавливается соответствие временной зависимости импульса тока детектора $A(t_i)$ и коэффициентов $p_i(t_i)$. Поиск и определение максимумов (экстремумов) временной зависимости тока детектора $A(t_i)$ проводили цифровой корреляционной фильтрацией. В качестве фильтра применяли функцию Гаусса. При составлении суммы S , помимо определения коэффициентов $p_{ki,oi}(t_i)$, необходимо выбрать оптимальный временной интервал T_N , на котором выполняется идентификация. Есть несколько вариантов оптимизации T_N , но при этом должно выполняться условие $200 \leq T_N \leq 2000$ нс. Если длительность между импульсами меньше 500 нс, принимается $T_N = 500$ нс и выполняется режекция импульсов. Алгоритм режекции предполагает, что только первый максимум в интервале $T_N = 500$ нс вызван регистрацией частицы, остальные являются фоновыми и могут привести к ложной идентификации. Поэтому экстремумы временной зависимости тока детектора $A(t_i)$, начиная со второго, заменяются нулевыми значениями. Скорректированная функция тока детектора $A(t_i)$ используется для идентификации типа частицы. Без этой процедуры импульс 1 идентифицируется как импульс от нейтрона (рис. 4, экстремумы 1 и 2 временной зависимости тока детектора).

Разрядность АЦП для преобразования аналоговых сигналов детектора и цифровой идентификации определяется соотношением между амплитудой импульса ФЭУ от быстрого компонента сцинтилляционного импульса и амплитудой одноэлектронного импульса, а также динамическим диапазоном энергии регистрируемого излучения. В диапазоне энергии по комптоновским электронам E_e 10—500 кэВ для цифровой



Р и с. 4. Импульс тока детектора γ -квантов ^{137}Cs с тремя экстремумами (1, 2, 3) (при идентификации второй наложенный импульс заменен нулевым значением)

идентификации необходим АЦП с частотой дискретизации 1 ГГц и разрядностью 12 бит. Можно использовать два АЦП с частотой дискретизации 1 ГГц и разрешением 8 бит [14]. Для увеличения динамического диапазона регистрации амплитуды входного сигнала импульс детектора подается одновременно на два канала устройства с разной чувствительностью и дальнейшим объединением цифровых сигналов первого и второго каналов в один [11, 12].

Таким образом, цифровая идентификация частиц состоит из следующих операций:

поиск и определение максимумов (экстремумов) временной зависимости тока детектора $A(t_i)$;

определение временного интервала для идентификации типа частицы, устранение наложения импульсов (режекция импульсов);

вычисление сумм $S = \sum_{i=1}^N A(t_i) p_{oi(ki)}(t_i)$ и

$Q = \sum_{i=1}^N A(t_i)$. Если $S > 0$, то частица нейтрон, если $S < 0$ — γ -квант.

Позиционно-чувствительный детектор на основе сцинтилляционных модулей с цифровой идентификацией нейтронов и γ -квантов в смешанных полях по форме импульса может иметь следующие характеристики: энергетический диапазон регистрации и измерения нейтронов 0,2—15 МэВ, γ -квантов — 0,015—7 МэВ, коэффициент блокировки γ -квантов в энергетическом диапазоне 15—600 кэВ равен 10^4 — 10^3 при загрузке $(1,5$ — $5) \cdot 10^5$ имп./с, эффективность идентификации нейтронов — 0,9 при загрузке

до 10^6 имп./с, при энергии ~ 10 кэВ — 300 и 0,75 соответственно, эффективность регистрации нейтронов детектором на основе стиблена толщиной 4 см 0,6—0,15 в диапазоне 0,5—10 МэВ, энергетическое разрешение по энергии γ -излучения 0,662 МэВ (^{137}Cs) не хуже 9%.

Однако более совершенные аппаратные и программные средства не решают полностью проблем уменьшения коэффициента блокировки γ -квантов и эффективности идентификации нейтронов из-за уменьшения числа фотоэлектронов при регистрации нейтронов в области энергии 0,3—0,5 МэВ. Поэтому для уменьшения нижнего порога и расширения энергетического диапазона регистрации нейтронного излучения можно дополнительно использовать газовый водородный детектор нейтронов, работающий в режиме пропорционального счетчика [1]. Дискриминация γ -квантов осуществляется по форме импульсов вследствие разной длины пробега протонов отдачи и комптоновских электронов в газе. Диапазон энергии нейтронов, измеряемой водородными детекторами, может составлять от 10—20 до 500—700 кэВ, энергетическое разрешение меньше 10 и 15—20% для энергии 80—140 и 24 кэВ соответственно.

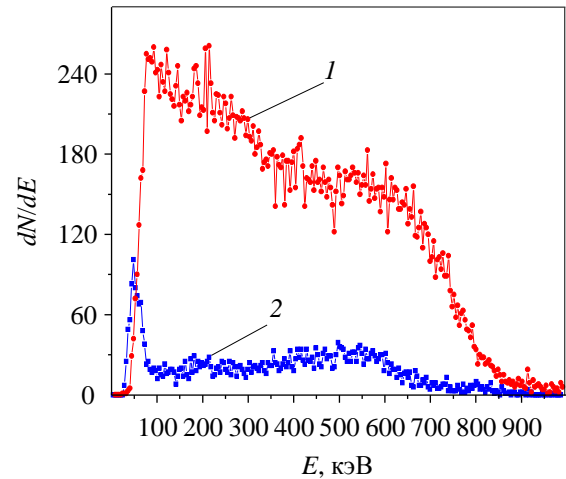
Сцинтилляционные и черенковские детекторы с наносекундным временным разрешением. Для измерения спектральных и временных характеристик в импульсных смешанных нейтронных и гамма-полях с регистрацией и разрешением во времени отдельно нейтронов и γ -квантов при загрузке до $2 \cdot 10^8$ имп./с можно использовать два детектора с предельно высоким временным разрешением $\tau_{0,5} = 1$ —2,5 нс. Их можно определить как быстрые импульсные детекторы. Один из них — на основе пластмассового сцинтиллятора для регистрации нейтронов и γ -квантов, другой — для избирательной регистрации γ -квантов и дискриминации нейтронов на основе черенковского радиатора [2, 3]. В экспериментальных исследованиях [15] для получения минимального временного разрешения $\tau_{0,5} < 1,5$ нс использовался сцинтилляционный детектор на основе цилиндрического полированного пластмассового сцинтиллятора Б-18 ($\tau_{0,5} < 1$ нс) диаметром 50 мм, высотой 100 мм и ФЭУ СНФТ-18 с временным разрешением не хуже 1 нс.

Важными особенностями черенковских детекторов являются высокое временное разреше-

ние и пороговая энергия частицы, с которой начинается ее регистрация. В черенковских детекторах используются неорганические и органические радиаторы, наиболее часто из оргстекла. Пороговая энергия для комптоновских электронов в радиаторе из оргстекла составляет 178 кэВ, что обеспечивает возможность эффективной регистрации γ -квантов при энергии больше несколько сот кэВ. Нейтронное излучение регистрируется с энергии протонов 326 МэВ [3]. В экспериментальных исследованиях черенковский детектор состоял из окрашенного цилиндрического радиатора из оргстекла диаметром 50 мм, высотой 100 мм и ФЭУ Hamamatsu R1828-0 (Япония) с 12 диодами и большим коэффициентом усиления. Временное разрешение детектора составляет $\tau_{0,5} = 2,5$ нс и определяется импульсными характеристиками радиатора ($\tau_{0,5} \leq 1$ нс) и ФЭУ ($\tau_{0,5} = 2,5$ нс). Особенностью черенковского радиатора является малый световыход, до 100 раз меньше, чем в пластмассовом сцинтилляторе. Соответственно черенковские детекторы имеют низкое энергетическое разрешение, их энергетическая калибровка проводится измерением токовой чувствительности при $E_\gamma \geq 0,5$ МэВ [3].

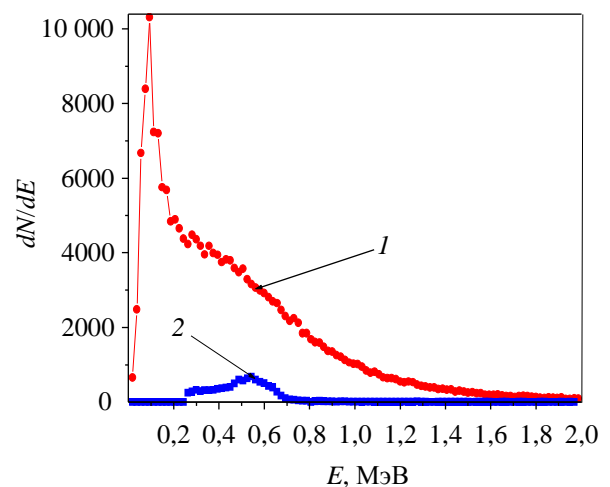
Исследование спектрально-временных параметров смешанных нейтронных и гамма-полей. Сцинтилляционные детекторы с цифровой идентификацией частиц по форме импульса, а также быстрые сцинтилляционные и черенковские детекторы применяли для исследований спектрально-временных параметров смешанных полей нейтронного и γ -излучения. С помощью этих детекторов регистрировали излучение импульсных нейтронных генераторов энергией 2,5 и 14,5 МэВ, измеряли временные характеристики, плотность потока, оценивали энергетическое распределение нейтронов и γ -квантов.

Детектором на основе стильбена было идентифицировано как нейтроны $\sim 90\%$ зарегистрированных импульсов от генератора нейтронов энергией 2,5 МэВ в энергетическом диапазоне 30—800 кэВ по энергии комптоновских электронов при загрузке $1,1 \cdot 10^6$ имп./с, остальные 10% — как γ -кванты (рис. 5). Коэффициент блокировки γ -квантов составил $\sim 10^4$ — 10^3 при загрузке $(1,5$ — $5) \cdot 10^5$ имп./с, эффективность идентификации нейтронов $\sim 0,9$. При регистрации



Р и с. 5. Амплитудное распределение импульсов в нейтронном (1) и гамма-канале (2) при регистрации детектором на основе стильбена излучения импульсного нейтронного генератора энергией 2,5 МэВ при загрузке $1,1 \cdot 10^6$ имп./с

быстрым сцинтилляционным и черенковским детекторами излучения импульса генератора нейтронов энергией 2,5 МэВ их средняя загрузка составила $1,2 \cdot 10^8$ и $1,5 \cdot 10^7$ имп./с соответственно (рис. 6). Амплитудное распределение импульсов сцинтилляционного детектора, обусловленное регистрацией только нейтронов, находили как разность распределения сцинтилляционного и черенковского детектора. При этом эффективность регистрации γ -излучения обоих детекторов предполагалась равной, различие их энергетического разрешения не учитывали. По энергетической шкале E_e было определено, что половине максимума края амплитудного распределения протонов отдачи соответствует энергия 0,7 МэВ. Из анализа ампли-



Р и с. 6. Амплитудное распределение импульсов сцинтилляционного (1) и черенковского детектора (2), полученное при регистрации излучения импульсного нейтронного генератора энергией 2,5 МэВ

тудных спектров было получено, что отношение числа зарегистрированных в сцинтилляционном детекторе γ -квантов к числу нейтронов составляет 5—10%. Такое совпадение соотношения в разных экспериментах подтверждает возможность использования системы из быстрых сцинтилляционного и черенковского детекторов для измерения спектрально-временных параметров смешанных полей нейтронного и γ -излучения при загрузке до $2 \cdot 10^8$ имп./с.

Построение позиционно-чувствительных детекторов для регистрации изображения нейтронных и гамма-источников в смешанных полях методом кодированной апертуры. Разработка позиционно-чувствительных детекторов, построенных в виде матрицы модульных сцинтилляционных с идентификацией частиц, или черенковских стала возможной в связи с развитием цифровых электронных систем. Регистрируются импульсы параллельно и независимо АЦП с высокой частотой дискретизации ≥ 1 ГГц [5]. Разрешение современных АЦП гигагерцевого диапазона варьируется от 7 бит, например, ADC07D1520 с двумя синхронными каналами с частотой дискретизации 1,5 ГГц до 14 бит, например, ADC32RF45 с двумя синхронными каналами с частотой дискретизации 3 ГГц. Еще более высокими темпами развиваются современные программируемые интегральные схемы, которые позволяют обрабатывать сигналы в реальном режиме времени и выпускаются по технологии 16 нм. Например, фирма Xilinx (США) освоила выпуск программируемых интегральных схем по технологии 16 нм. Одновременно с ростом вычислительной мощности повышается и пропускная способность систем ввода-вывода. Так, разработаны программируемые интегральные схемы, которые имеют свыше 128 приемопередатчиков с пропускной способностью 33 Гбит/с. Такие системы могут быть использованы в сцинтилляционном и черенковском позиционно-чувствительных детекторах для регистрации нейтронных и гамма-изображений.

В полученных цифровых массивах импульсов модульных детекторов с помощью программируемых интегральных схем выполняется поиск и определяются максимум (экстремум) временной зависимости тока детектора и режекция импульсов. Затем проводится амплитудно-

временной анализ цифровых массивов импульсов модульных детекторов. При этом регистрируются и идентифицируются нейтроны и γ -кванты при загрузке модульного сцинтилляционного детектора до 10^6 имп./с, модульного черенковского — до $2 \cdot 10^8$ имп./с с сохранением остальных характеристик. Черенковский позиционно-чувствительный детектор может использоваться для регистрации импульсного излучения.

Сцинтилляционные позиционно-чувствительные детекторы могут обеспечивать высокую эффективность регистрации нейтронов, в основном, за счет упругого рассеяния быстрых нейтронов на водороде, который входит в состав сцинтилляционных модулей. По протонам отдачи идентифицируются нейтроны. Эти процессы повышают характеристики детекторов, однако может также происходить многократное рассеяние нейтронов и γ -квантов в разных детекторных модулях, что приводит к искажению теневого нейтронного и гамма-изображения. Искажения могут быть также обусловлены краевыми эффектами взаимодействия излучения с коллиматором и детекторными модулями [9]. Их можно уменьшить за счет снижения толщины детекторного модуля по сравнению с его линейными размерами.

Искажение теневого изображения можно уменьшить, если применять детекторы, в которых, помимо рассеяния, происходит поглощение излучения. Для γ -квантов это комптоновское рассеяние и поглощение за счет фотоэффекта. Для регистрации изображения источников тепловых нейтронов используется интроскоп с кодированной апертурой, в котором используется коллиматор из кадмия и позиционно-чувствительный детектор в виде пропорциональной камеры ^3He . В ней тепловые нейтроны поглощаются с образованием α -частиц.

Быстрые нейтроны также могут поглощаться в реакциях с образованием α -частиц. Такими свойствами обладают алмазные детекторы, применяемые в термоядерных исследованиях. В них импульс γ -квантов за счет размеров детектора ограничен по амплитуде и его можно дискриминировать. На основе алмазных позиционно-чувствительных детекторов можно исследовать возможность построения интроскопов с кодированной апертурой для регистрации изображения нейтронных источников с высокой плотностью потока быстрых нейтронов.

Для устранения искажений в восстановленном изображении используются и развиваются математические методы. Такую задачу по устранению искажений можно считать обратной некорректной задачей [9].

Рассмотренные принципы построения и характеристики позиционно-чувствительного детектора на основе модульных детекторов являются основанием для дальнейших исследований расширения областей применения интроскопов с кодированной апертурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Колеватов Ю.И., Семенов В.П., Трыков Л.А.** Спектрометрия нейтронов и гамма-излучения в радиационной физике. М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. **Веретенников А.И., Горбачев В.М., Предени Б.А.** Методы исследований импульсных излучений. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. **Альбинов З.А., Веретенников А.И., Козлов О.В.** Детекторы импульсного излучения. М.: Энергоатомиздат, 1978.
4. **Гусев Н.Г., Машкович В.П., Суворов А.П.** Физические основы защиты от излучений. М.: Атомиздат, 1980.
5. **Федоров Г.А.** Радиационная интроскопия. Кодирование информации и оптимизация эксперимента. М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. **Fenimore E., Cannon T.** Coded aperture imaging with redundant arrays. — *Appl. Opt.*, 1978, v. 17, № 22, p. 3562.
7. **Busboom A., Elders-Boll H., Schotten H.** Uniformly redundant arrays. — *Experim. Astronomy*, 1998, № 8, p. 97—123.
8. **Калашников С.Д.** Физические основы проектирования сцинтилляционных гамма-камер. М.: Энергоатомиздат, 1985.
9. **Прокуронов М.В., Севастьянов В.Д., Шибасев Р.М.** Оценка методов построения высокочувствительных интроскопов с кодированной апертурой для регистрации изображения источников гамма-излучения и смешанного ионизирующего излучения. — В сб.: Альманах современной метрологии, 2018, № 16, с. 33—53.
10. **Прокуронов М.В., Голубев А.А., Демидов В.С. и др.** Цифровая идентификация частиц по форме импульса. — *Приборы и техника эксперимента*, 2006, № 1, с. 1—17.
11. **Прокуронов М.В., Шаболин А.Н.** Цифровая идентификация нейтронов и гамма-квантов по форме импульса при высокой загрузке детектора и низкой энергии регистрируемого излучения. — Там же, 2007, № 3, с. 1—15.
12. **Прокуронов М.В., Руднев П.И.** Идентификация нейтронов и гамма-квантов на основе цифровых методов. — *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2009, № 1, с. 96—101.
13. **Gatti E., Martini F.** A new linear method of discrimination between elementary particles in scintillation counters. — *Nucl. Electronics*, 1962, № 2, p. 265—276.
14. **Прокуронов М.В., Руднев П.И., Севастьянов В.Д.** Спектрометр нейтронного и гамма-излучения на основе цифровых методов регистрации и обработки сигналов. — *Современная электроника*, 2011, № 8, p. 38—41.
15. **Прокуронов М.В., Голубев А.А., Демидов В.С. и др.** Метод измерения спектральных и временных характеристик смешанных полей сцинтилляционным и черенковским детекторами с наносекундным временным разрешением. — *Приборы и техника эксперимента*, № 4, 2008, с. 1—15.

Поступила в Редакцию 26.03.19

УДК 519.713.5:504.3.054

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ РАССЕЯНИЯ ПРИМЕСИ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Панченко С.В., Припачкин Д.А. (ИБРАЭ РАН, г. Москва),

Крышев А.И., Каткова М.Н. (НПО «Тайфун», г. Обнинск)

e-mail: panch@ibrae.ar.ru

Для сравнительных оценок риска на населенные выбросов стационарных источников моделируют рассеяние от каждой отдельной вентиляционной трубы. Приземная концентрация веществ, вызывающих негативные для здоровья населения эффекты, затем с помощью зависимости доза—эффект при заданной экспозиции трансформируется в риск [1]. На следующем этапе анализа риск от разных примесей в отдельных точках городской территории суммируется с тем, чтобы определить места формиро-

вания наибольших значений. В этой расчетной схеме значительные неопределенности вносит уже первый этап — расчет приземной концентрации от отдельно взятого источника атмосферных выбросов. Трудности в оценке приземной концентрации состоят в том, что объемная архитектура городского поселения может вносить, как полагают многие специалисты, значительные локальные искажения в расчетные модели. Масштаб таких искажений можно оценить только экспериментально, но постановка экспе-