

УДК 539.1

**РАСЧЕТ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО  
ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ**

**Д.В. Постоварова**

Для регистрации нейтронов и высокоэнергетичных гамма-квантов деления предлагается создать новое устройство – низкофоновый спектрометрический позиционно-чувствительный детектор нейтронов, представляющий собой счетчик тепловых нейтронов, окруженный сцинтиллятором, выступающим и в роли замедлителя нейтронов. Приводятся предварительные результаты моделирования регистрации нейтронов с различными спектрами предлагаемым детектором.

**Ключевые слова:** спектроскопический позиционно-чувствительный детектор нейтронов, математическое моделирование.

**Введение**

В связи с возросшей террористической опасностью в последнее время в мире развиваются новые методы досмотра коммерческих грузов с целью обнаружения в них незаконно перевозимых ядерных материалов (ЯМ), которые могут быть использованы для создания самодельного ядерного взрывного устройства или в качестве компонента «грязной бомбы». Основным средством обнаружения ЯМ служат радиационные порталы, регистрирующие их собственное нейтронное или гамма-излучение. Однако собственное гамма-излучение многих ЯМ имеет низкую энергию, в значительной степени поглощается в

окружающем веществе, и не всегда может быть обнаружено в присутствии природного фона гамма-излучения. Собственное нейтронное излучение спонтанного деления ЯМ является гораздо более надежным индикатором наличия ЯМ, так как природный нейтронный фон значительно ниже, чем фон гамма-квантов. Тем не менее, природный нейтронный фон ограничивает чувствительность метода [1, 2].

Спонтанное нейтронное излучение присутствует не у всех ЯМ. В связи с этим в мире развиваются системы, основанные на активных ядерных методах [3]. В активных методах в качестве зондирующего излучения используется, как правило, нейтронное излучение, а регистрируются вторичные излучения вынужденного деления: нейтроны и гамма-кванты. При этом работающий источник зондирующего излучения создает значительный собственный фон нейтронного и гамма-излучения, затрудняющий регистрацию нейтронов и гамма-квантов деления. Поэтому одной из главных задач детектирующей системы становится способность отличать интересующие нейтроны вынужденного деления от гамма-квантов, фоновых и зондирующих нейтронов. Для этого нужно измерять энергии нейтронов и направление на их источник.

Существующие детекторы нейтронов делительного спектра основаны, как правило, на органических сцинтилляторах, или на комбинации замедлителя нейтронов с детектором тепловых нейтронов на основе  $^3\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$  или Gd. Ни один из этих детекторов не обладает одновременно достаточной степенью нейтрон/гамма разделения, способностью измерять энергетический спектр нейтронов и направление на их источник (позиционной чувствительностью).

### Устройство детектора

Для регистрации нейтронов и высокоэнергетичных гамма-квантов деления предлагается создать новое устройство – низкофоновый спектрометрический позиционно-чувствительный детектор нейтронов. Детектор представляет собой комбинацию из детектора тепловых нейтронов на основе газа  $^3\text{He}$  либо стекла, допированного  $^6\text{Li}$ , и сцинтилляционного детектора, служащего одновременно замедлителем нейтронов.

Детекторы на основе  $^3\text{He}$  (или  $^6\text{Li}$ ) обладают высокой эффективностью регистрации тепловых нейтронов ( $E \ll 1$  эВ), но почти не чувствительны к нейтронам делительного спектра, средняя энергия которых составляет около 2 МэВ. Сцинтилляционные детекторы, напротив, имеют достаточно высокую (50%) эффективность регистрации быстрых нейтронов, но не чувствительны к тепловым нейтронам. При попадании быстрого нейтрона в органический сцинтиллятор в течение примерно 50 мкс он теряет всю свою энергию в столкновениях с ядрами водорода и углерода, после чего с высокой вероятностью регистрируется детектором тепловых нейтронов (рис. 1). Амплитуда всплеск света, возникающих при потере нейтроном энергии в сцинтилляторе, измеряется при помощи фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Поскольку детектор тепловых нейтронов регистрирует только нейтроны, оставившие в сцинтилляторе всю свою энергию, измеренная амплитуда сцинтилляции соответствует полной энергии нейтрона. По нашим предварительным расчетам использование информации об энергии нейтронов позволит в 3–5 раз подавить регистрацию нейтронов природного фона, энергетический спектр которых отличается от делительного, благодаря чему удается существенно улучшить соотношение эффект-фон при регистрации нейтронов спонтанного или вынужденного деления ЯМ. Кроме того, использование сцинтиллятора с разделением нейтронов и гамма-квантов по форме импульса позволит независимо регистрировать тем же детектором и гамма-кванты деления.

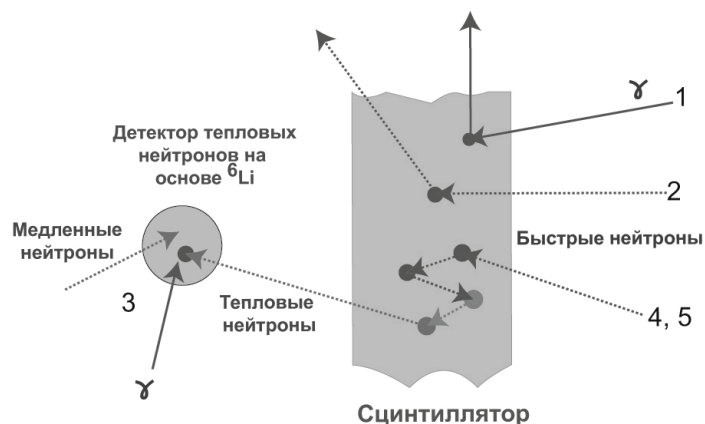


Рис. 1. Принцип действия спектрометрического детектора нейтронов: 1 –  $\gamma$ -квант; 2 – нейтрон, теряющий часть энергии в сцинтилляторе и покидающий объем детектора; 3 – нейтрон с энергией меньше пороговой (0,5 МэВ) или  $\gamma$ -квант; 4, 5 – нейтроны с энергиями, характерными для деления (0,5–5,0 МэВ и более)

По сути, предлагаемый детектор представляет четыре независимых детектора:

1. детектор быстрых и тепловых нейтронов ( $^3\text{He}$  + замедлитель);
2. сцинтилляционный детектор быстрых нейтронов (сцинтиллятор);
3. сцинтилляционный детектор гамма-квантов (сцинтиллятор);
4. спектрометрический детектор быстрых нейтронов ( $^3\text{He}$  в совпадении со сцинтиллятором, работающим и в качестве замедлителя нейтронов).

### Математическое моделирование

Первым этапом в разработке предлагаемого детектора является его математическое моделирование с целью подбора оптимальной геометрии и материалов детектора. Ниже представлены первые результаты такого моделирования.

Моделирование проводилось с помощью существующего модуля MCNP-PoliMi (MCNP – General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, LA-UR-03-1987), позволяющего записывать треки нейтронов и фотонов в заданной геометрии и с заданным нейтронным источником. Моделирование проводилось для двух источников нейтронов: изотопа  $^{252}\text{Cf}$ , испускающего нейтроны делительного спектра, и нейтронного дейтерий-третиевого генератора, испускающего нейтроны с энергией 14 МэВ. Расстояние от источника нейтронов до центра детектора везде предполагалось равным 1 м. Также моделирование проводилось для различных пороговых значений энергии регистрации нейтрона в сцинтилляторе.

### Взаимное расположение компонентов детектора

Эффективность замедления быстрого нейтрона до тепловых энергий и его последующей регистрации детектором тепловых нейтронов зависит от взаимного расположения компонентов детектирующей системы.

Были смоделированы две геометрии. В первом случае сцинтиллятор имел форму параллелепипеда и располагался перед детектором тепловых нейтронов на основе допированного  $^6\text{Li}$  стекла. Во втором случае сцинтиллятор имел форму цилиндра, внутри которого помещался детектор тепловых нейтронов. В расчетах определялась зависимость количества тепловых нейтронов, прореагировавших с атомами  $^6\text{Li}$ , от толщины сцинтиллятора (рис. 2).

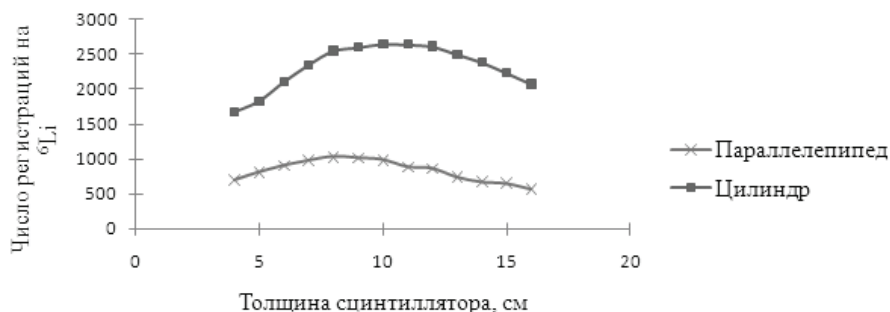


Рис. 2. Сравнение эффективности двух различных геометрий сцинтиллятора

Из полученных зависимостей видно, что в случае цилиндрического сцинтиллятора эффективность регистрации тепловых нейтронов примерно в 2,5 раза выше, чем в случае плоского. Поэтому все дальнейшие расчеты проводились для сцинтиллятора цилиндрической формы.

### Позиционная чувствительность

Разрабатываемый детектор предполагается сделать позиционно-чувствительным. Для этого предлагается использовать в его конструкции два или три различных сцинтиллятора-замедлителя (рис. 3), регистрация света с которых осуществляется независимо (либо разными ФЭУ, либо ФЭУ с позиционно-чувствительным анодом, либо за счет разделения по форме импульса). Чувствительность к направлению, с которого прилетел быстрый нейтрон, достигается требованием того, чтобы его взаимодействие в сцинтилляторе №2 произошло раньше, чем в сцинтилляторе № 1 (рис. 3). Для выбранной ориентации детектора (рис. 3) это условие будет выполняться в основном для нейтронов, прилетевших сверху, в то время как нейтроны, прилетевшие сбоку или снизу, с большой вероятностью сначала будут зарегистрированы сцинтилляторами № 1 или № 3.

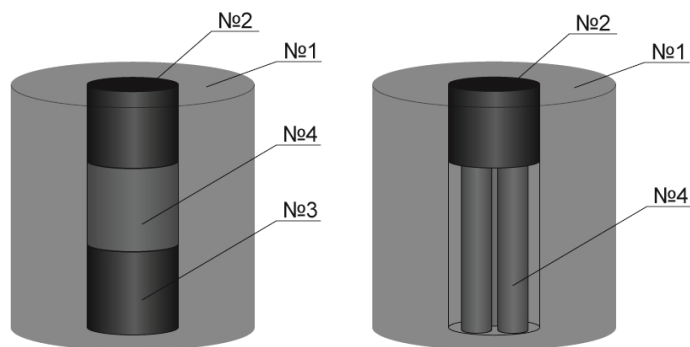


Рис. 3. Варианты геометрии детектора с использованием допированного  ${}^6\text{Li}$  стекла (слева) и газонаполненных счетчиков на основе  ${}^3\text{He}$  (справа): 1, 2, 3 – сцинтилляционные детекторы быстрых нейтронов с разделным светосбором; 4 – детекторы тепловых нейтронов

В качестве детектора тепловых нейтронов использовалось допированное  ${}^6\text{Li}$  стекло (цилиндр диаметром 3" и высотой 3"). Отбирались только события, в которых прилетевший нейтрон сначала регистрировался в сцинтилляторе № 2, затем, возможно, в других сцинтилляторах, и в итоге, замедлившись, в детекторе тепловых нейтронов. Определялось число таких событий в зависимости от толщины сцинтиллятора № 1 (рис. 4).

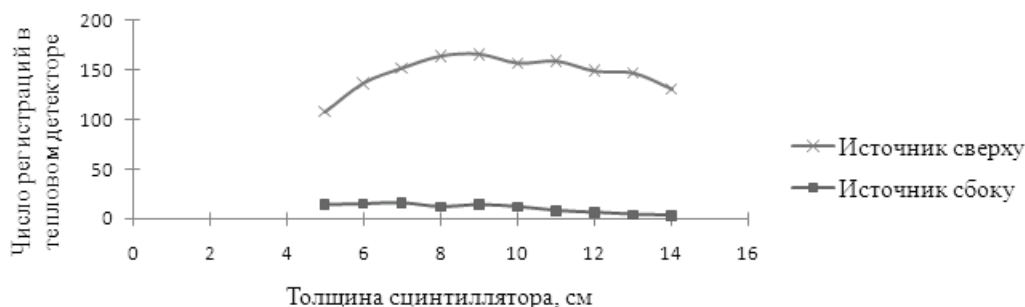


Рис. 4. Число зарегистрированных нейтронов в зависимости от толщины слоя сцинтиллятора № 1 для различных положений источника нейтронов деления

Из рисунка видно, что для выбранной геометрии вероятность регистрация нейтронов, прилетевших сбоку, составляет около 10% от вероятности регистрации нейтронов, прилетевших сверху. Такая позиционная чувствительность позволит отсекал большую часть нейтронов, пришедших не из досматриваемой области пространства.

Чтобы изучить работу предложенного нейтронного детектора в активном режиме (с включенным нейтронным генератором), было проведено моделирование регистрации нейтронов с энергией 14 МэВ, производимых нейтронным генератором. Эти результаты сравнивались с результатами моделирования для источника нейтронов делительного спектра ( ${}^{252}\text{Cf}$ ). Источники располагались в 1 м сверху над детектором. Моделирование проводилось для различных значений порогов регистрации нейтронов сцинтилляторами (пороги брались одинаковыми для всех сцинтилляторов). Строились зависимости числа зарегистрированных нейтронов от толщины слоя сцинтиллятора № 1 (рис. 5).

Из зависимостей видно, что величина порога мало влияет на регистрацию нейтронов с энергией 14 МэВ, но сильно влияет на регистрацию нейтронов делительного спектра. Для эффективной работы детектора необходимо как можно лучше регистрировать нейтроны делительного спектра, и как можно меньше регистрировать нейтроны с энергией 14 МэВ от нейтронного генератора. Следовательно, желательно иметь низкий энергетический порог регистрации нейтронов сцинтилляторами. Оптимальная толщина слоя сцинтиллятора № 1, при которой нейтроны делительного спектра регистрируются с максимальной вероятностью, а нейтроны с энергией 14 МэВ – не с максимальной, составляет около 8 см (для органического сцинтиллятора с формулой  $(\text{CH})_n$  и с плотностью около  $1 \text{ г/см}^3$ ).

Дополнительное подавление нейтронов от нейтронного генератора может быть достигнуто путем расположения детектора так, чтобы эти нейтроны попадали в детектор сбоку, а нейтроны от ЯМ – со стороны сцинтиллятора № 2.

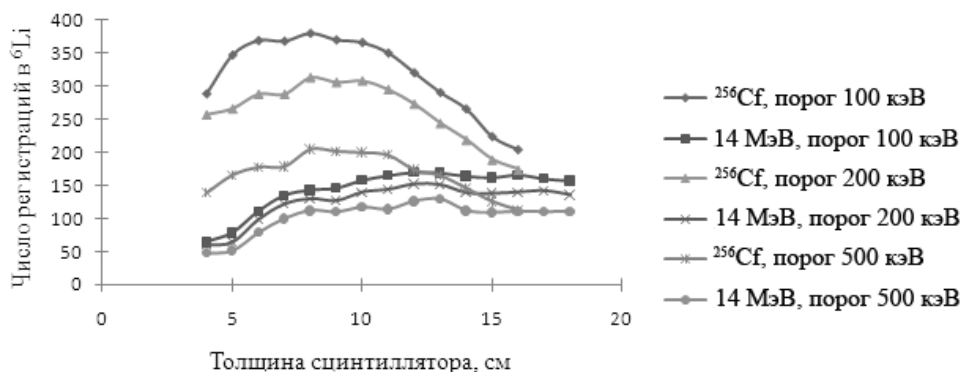


Рис. 5. Зависимости числа зарегистрированных нейтронов от толщины слоя сцинтиллятора № 1 для различных источников нейтронов и различных энергетических порогов регистрации нейтронов в сцинтилляторах

### Выбор типа детектора тепловых нейтронов

На сегодняшний день в мире ощущается острый дефицит  $^3\text{He}$  (в течение последних нескольких лет цены на  $^3\text{He}$  сильно подскочили). По предварительным оценкам спрос на  $^3\text{He}$  составляет около 65000 литров в год, а общее производство (в основном сосредоточенное в США и России) составляет всего около 20000 литров в год. В США этот дефицит называют «национальным кризисом», и сообщают о нем даже в общедоступной печати [4]. В связи с этим предлагается в качестве детектора тепловых нейтронов использовать коммерчески доступные стекла, допированные изотопом  $^6\text{Li}$ . Было проведено моделирование, в котором сравнивались эффективности регистрации нейтронов в  $^3\text{He}$  и  $^6\text{Li}$ . Результаты (рис. 6) свидетельствуют о том, что детектор на основе  $^6\text{Li}$  (цилиндр диаметром 3" и высотой 3") примерно вдвое превосходит по эффективности три стандартные трубки с  $^3\text{He}$ , которые можно разместить в том же объеме (рис. 3).

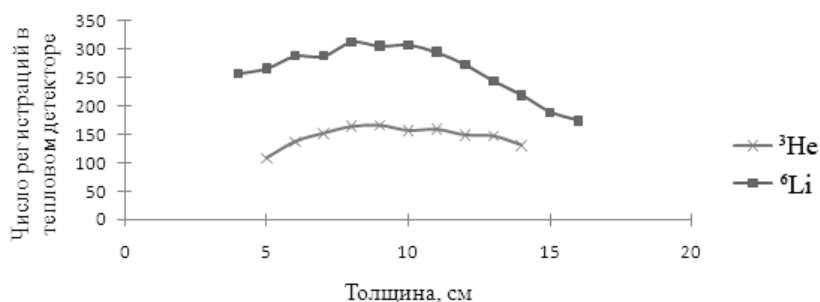


Рис. 6. Сравнение детекторов тепловых нейтронов на основе газа  $^3\text{He}$  и стекла, допированного  $^6\text{Li}$  (6%)

### Дальнейшее развитие модели

Представленные результаты получены в упрощенной модели, не учитывающей процесс преобразования выделенной в сцинтилляторах энергии в электрические сигналы, с которыми далее имеет дело система обработки данных. Для корректного учета этого преобразования в существующую модель будут добавлены модули по расчету преобразования выделенной энергии в фотоны (световыход), распространения света в системе сцинтилляторов и его сбора на фотокатодах ФЭУ (светосбор), и преобразование собранного света в электрические импульсы на выходе ФЭУ. В рамках этой расширенной модели существующий модуль MCNP-PoliMi будет определять для каждого события координаты и времени взаимодействия нейтрона со сцинтилляторами, и выделяемую в каждом из этих взаимодействий энергию.

### Заключение

Приведены результаты математического моделирования низкофонового позиционно-чувствительного детектора. На основе этих результатов предложена цилиндрическая форма внешнего сцинтиллятора с толщиной стенки порядка 8 см. Предложенная геометрия детектора позволит определять направление на источник нейтронов и подавлять фоновые нейтроны, приходящие с других направлений.

**Литература**

1. The Black Sea Experiment, science and global security. – 1990. – V. 1. – № 3–4. – P. 323–333.
2. Gordon M.S., Goldhagen P., Rodbell K.P., Zabel T.H., Tang H.H.K., Clem J.M., Bailey P. Measurement of the flux and energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons on the ground // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2004. – V. 51. – Is. 6. – P. 3427–3434.
3. Gozani T. The role of neutron based inspection techniques in the post 9/11/01 era // 5th Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement Applications. NIM B. – 2004. – V. 213. – P. 460–463.
4. Wald M.L. Shortage Slows a Program to Detect Nuclear Bombs // The New York Times. – 2009, November 22.

*Постоварова Дарья Владимировна* – Радиевый институт им. В.Г. Хлопина, младший научный сотрудник, darya.bayandina@gmail.com