

Формирование и расчет спектральных характеристик сцинтилляционных нейтронных детекторов*

Кратко изложена концепция создания многодетекторного нейтронного спектрометра реального времени. Показано, что основной проблемой ее реализации является отсутствие нейтронных детекторов с разнообразными и точно известными спектральными характеристиками в диапазоне энергий нейтронов от 0,001 эВ до 20 МэВ. Предложено использовать для этих целей сцинтилляционные полистирольные нейтронные детекторы, и описано четыре способа формирования разнообразных спектральных характеристик таких детекторов. Обоснован метод расчета спектральных характеристик с использованием микроскопического подхода. Приведены результаты расчета спектральных характеристик таких детекторов с использованием всех четырех предложенных способов их формирования.

Ключевые слова:

нейтронный спектрометр, сцинтилляционные нейтронные детекторы, спектральные характеристики, методы расчета, микроскопический подход.

**В.Э.Дрейзин, Д.И.Логвинов,
А.А.Гримов, А.П.Кузьменко**

(Юго-Западный государственный университет,
г. Курск)

Измерение нейтронного излучения является наиболее сложной задачей техники измерений ионизирующих излучений. Это связано с тем, что в отличие от гамма-излучения и потоков заряженных частиц нейтронное излучение является косвенно ионизирующим, поскольку электрически нейтральные нейтроны не взаимодействуют с электронными оболочками атомов, взаимодействуя только с их ядрами, выбивая из них заряженные частицы, которые и приводят к ионизации окружающих атомов. Причем типы этих взаимодействий могут быть различными, а их вероятности зависят от энергии нейтронов. Это приводит к существенной зависимости чувствительности нейтронных детекторов от энергии нейтронов и отсутствию

*Данная публикация открывает цикл статей, посвященных разработке многодетекторного нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени.

однозначной зависимости между энергией нейтронов и амплитудой выходных импульсов детектора. Для контроля технологических процессов на предприятиях атомной отрасли и проведения дозиметрии персонала необходимо измерять не только интегральную плотность нейтронных потоков, но и их энергетический спектр, ширина которого для реальных нейтронных потоков в атомной энергетике простирается более, чем на 10 порядков (от 0,001 эВ до 20 МэВ). В настоящее время не существует приборов, в полной мере решающих эту задачу. Использование для этих целей приборов, основанных на радиометрическом методе, в силу указанных причин неправомерно, хотя на практике широко применяется, поскольку промышленных нейтронных спектрометров-дозиметров до сих пор не существует, хотя предпринимались многочисленные попытки их разработки. В настоящее время известно два основных подхода к построению нейтронных спектрометров: многошаровые нейтронные спектрометры Боннера и однокристалльные нейтронные спектрометры на основе сцинтилляционного детектора.

Многошаровые спектрометры Боннера основаны на трансформации спектра нейтронного излучения при прохождении через замедлитель нейтронов (водородсодержащее вещество) различной толщины. Измерения нейтронного потока проводятся последовательно одним и тем же детектором, помещаемым в сферы из замедлителя нейтронов с различной толщиной стенок. Результаты этих измерений обрабатываются на ЭВМ по специальным программам, позволяющим восстанавливать исходный энергетический спектр измеряемого потока. В комплект таких спектрометров входят от 6 до 12 сфер-замедлителей нейтронов диаметром от 50 до 500 мм. Процедура измерений занимает не менее нескольких часов. Фактически это лабораторный метод, пригодный лишь для

измерения постоянных во времени нейтронных потоков.

Однокристалльные спектрометры со стильбеновым детектором основаны на дифференцировании огибающей амплитудного распределения выходных импульсов детектора с введением многочисленных и недостаточно физически обоснованных поправок и характеризуются низкой разрешающей способностью и существенным влиянием гамма-фона, а их энергетический диапазон ограничен и снизу, и сверху (0,2–10 МэВ). Кроме того, используемые методы восстановления спектра пока еще несовершенны и могут давать недостоверные результаты. Таким образом, проблема приборной реализации нейтронной спектрометрии до настоящего времени не решена, хотя важность ее решения для контроля технологических процессов в ядерной энергетике и обеспечения безопасности персонала (нейтронная дозиметрия) трудно переоценить.

В [1,2] был предложен многодетекторный метод измерения энергетических спектров произвольных нейтронных потоков в реальном времени. Он основан на одновременном измерении исследуемого нейтронного потока несколькими детекторами с различными спектральными характеристиками с последующим вычислительным восстановлением энергетического спектра исследуемого потока по их откликам с использованием заранее обученной на обширной обучающей выборке спектров нейтронных потоков разнообразной формы. Однако его реализация наталкивается на сложность подбора детекторов с достаточно разнообразными и точно известными спектральными характеристиками. Дело в том, что в настоящее время ни нейтронные детекторы, ни готовые блоки детектирования не аттестуются по спектральным характеристикам, поскольку измерить их нечем, а точный их расчет достаточно сложен. Но без знания их спектральных характеристик невозможно

не только измерить спектральный состав произвольных нейтронных потоков, но и достоверно определить их интегральную плотность, а тем более дозовые характеристики.

Постановка задачи

Из всех типов нейтронных детекторов наибольшими возможностями по воздействию на их спектральные характеристики обладают сцинтилляционные детекторы на основе полистирола, и именно они обладают наиболее высоким быстродействием и наилучшими техническими и эксплуатационными характеристиками. На практике используются три способа таких воздействий:

- путем варьирования геометрических размеров (толщины) сцинтиллятора (при этом изменяется эффективность детектора к нейтронам высоких энергий);
- путем погружения детектора в замедлитель нейтронов на различную глубину (используется в многошаровых спектрометрах Боннера и различных устройствах спектрометрии нейтронного излучения);
- путем добавления в состав сцинтиллятора бора-10 или лития-6, активно поглощающих нейтроны низких энергий с вылетом альфа-частиц, вызывающих при торможении в веществе сцинтиллятора яркие вспышки.

Наиболее широко (в частности, в многошаровых спектрометрах Боннера) применяется второй способ – погружение детекторов в замедлитель нейтронов (обычно используется полиэтилен). Однако этот способ при попытках параллельного включения нескольких детекторов с различными спектральными характеристиками приводит к недопустимому для переносных приборов росту их массогабаритных характеристик. Таким образом, применительно к многодетекторному нейтронному спектрометру этот способ использовать нельзя.

К оставшимся двум способам можно добавить еще два. Первый – использование

фильтрующих покрытий для детекторов, чувствительных к низкоэнергетическим нейтронам. Применительно к сцинтилляционным детекторам – это детекторы, в сцинтиллятор которых добавлен бор-10 или литий-6, а сами покрытия должны состоять из веществ, активно поглощающих нейтроны низких энергий (кадмий, бор, гадолиний). При этом не требуются толстые покрытия, вполне достаточно покрытий толщиной в 1–3 мм.

Второй предлагаемый способ – многопороговая амплитудная дискриминация выходных импульсов детектора. Этот способ основан на том, что в сцинтилляционных нейтронных детекторах, особенно в детекторах с небольшой толщиной сцинтилляторов, нейтронам одной и той же энергии соответствуют выходные импульсы разной амплитуды, причем разброс их амплитуд весьма широк. В данном случае этот недостаток обращен в пользу. Поскольку при разных порогах амплитудной дискриминации будут регистрироваться не все выходные импульсы детектора, а импульсы от нейтронов разных энергий, амплитуда которых превышает данный порог дискриминации, то различным порогам амплитудной дискриминации будут соответствовать различные спектральные характеристики детектора. Этот способ замечателен тем, что с одним и тем же детектором можно получить несколько параллельно работающих измерительных каналов с различными спектральными характеристиками. В принципе он приложим к любым типам нейтронных детекторов, но наиболее эффективен для детекторов с добавлением в состав сцинтиллятора бора-10 или лития-6, т. к. в этом случае происходят изменения вида спектральной характеристики и в области низких, и в области высоких энергий нейтронов.

Для существенного воздействия на спектральные характеристики детектора пороги дискриминации должны быть много выше уровня шумов детектора, чтобы исключать

регистрацию существенной доли импульсов, порождаемых измеряемыми частицами. Ранее для целенаправленного воздействия на спектральные характеристики детекторов этот способ не применялся, что позволило направить соответствующую заявку на изобретение [3].

Итого получаем 4 способа воздействия на спектральные характеристики сцинтилляционных полистирольных нейтронных детекторов.

Однако необходимо еще точно определять спектральные характеристики получаемых этими способами нейтронных детекторов. Если бы существовала возможность получения моноэнергетических нейтронов с регулируемой энергией во всем указанном диапазоне (0,001 эВ ÷ 20 МэВ), то это можно было бы сделать экспериментально. Однако такая возможность отсутствует. Поэтому остается лишь расчетный путь.

Расчет спектральных характеристик сцинтилляционных детекторов с использованием микроскопического подхода

В [4] была исследована возможность макроскопического подхода к проведению подобных расчетов. Она базируется на известном выражении, связывающем эффективность ϵ регистрации потока моноэнергетических нейтронов, падающего нормально на сцинтилляционный детектор толщиной δ , с энергией E :

$$\epsilon(E) = 1 - e^{-\sigma_s(E)N\delta},$$

где σ_s – макроскопическое сечение реакции нейтронов с веществом детектора.

Для полистирольных детекторов без добавления бора-10 учитывалось лишь сечение реакции взаимодействия нейтронов с ядрами атомов водорода, а для сцинтилляторов с добавлением бора-10 дополнительно учитывалось взаимодействие с ядрами атомов бора-10.

Однако такой подход не учитывает конечного результата взаимодействия, определяемо-

го возникновением сцинтилляций, мощность которых определяется количеством достигающих фотокатода ФЭУ фотонов, что приводит к грубым ошибкам (в частности, для детекторов без добавления бора-10 в сцинтиллятор эффективность для нейтронов тепловой энергии получалась максимальной, близкой к 100%, тогда как реально мощность сцинтилляционных вспышек лежала ниже уровня шумов ФЭУ, поскольку энергия протонов отдачи всегда ниже энергии нейтронов. Регистрируются такими детекторами лишь высокоэнергичные нейтроны, начиная с энергий в десятки кэВ. Более точным является микроскопический подход, базирующийся на имитационном моделировании взаимодействия каждого нейтрона заданной энергии с атомами вещества сцинтиллятора с прослеживанием результатов каждого столкновения, вплоть до возникновения сцинтилляций, включая прохождение возникших световых фотонов до торцевой поверхности сцинтиллятора, прилегающей к фотокатоду ФЭУ. Такой расчет возможен с использованием программных комплексов, применяемых для ядерно-физических расчетов. В данном случае использовалась библиотека программ GEANT-4.

Расчет спектральных характеристик сцинтилляционных нейтронных детекторов с помощью библиотеки программ GEANT-4 проводился для случая мононаправленного излучения, перпендикулярного торцевой поверхности детектора. Диаметр сцинтилляторов был выбран равным 25 мм, поскольку предполагается использовать ФЭУ с диаметром фотокатода 25 мм. Расчет проводился для толщин 5, 10, 20 и 30 мм для полистирольных сцинтилляторов без добавок бора-10 и с добавкой бора-10 в вещество сцинтиллятора, а также для сцинтилляторов с добавкой бора-10 с покрытием сцинтиллятора фильтрами из бора, активно поглощающего тепловые нейтроны. Весь энергетический диапазон нейтро-

нов от 0,001 эВ до 20 МэВ в расчетном спектре разделялся на 1024 интервала, равномерно распределенных в логарифмической шкале энергий. Для каждого энергетического интервала в моделирующей системе запускалось по 1000 нейтронов с энергией, равной средней энергии этого интервала. Фиксировалось количество нейтронов, вызвавших сцинтилляции в детекторе, и определялось количество фотонов, порождаемых каждым нейтроном. Хотя при моделировании запускалось более миллиона нейтронов, из-за статистического характера взаимодействия нейтронов с активным веществом детектора графики спектров получились заметно изрезанными. Для уменьшения влияния статистического шума проводилось усреднение по 5 соседним энергетическим интервалам методом скользящего среднего, а далее по полученным точкам зависимость аппроксимировалась сплайном Акимы.

На рис. 1 представлены спектральные характеристики детекторов без добавления бора-10 в сцинтиллятор.

Как видно из рис. 1, чувствительность указанных детекторов к нейтронам с низкой энергией (вплоть до десятков кэВ) лежит на уровне шумов детектора. Для объяснения наличия смещения порогов энергии нейтронов с увеличением толщины сцинтиллятора, начиная с которой происходит резкий рост количества сцинтилляций, была проведена распечатка трассировки процессов, происходящих в сцинтилляторе при попадании в него нейтронов разных энергий. Оказалось, что нейтроны низких энергий в результате последовательных столкновений с ядрами атомов водорода выбивают некоторое количество протонов отдачи, которые, тормозясь в веществе сцинтиллятора, могут приводить к ионизации и возбуждению атомов углерода, сопровождаемому сцинтилляциями (излучением фотонов видимого диапазона). Но количество испускаемых фотонов при этом мало (не превышает двух–трех сотен на один нейтрон, тогда как уровень шумовых импульсов детектора достигает 500–600 фотонов). Свободные электроны

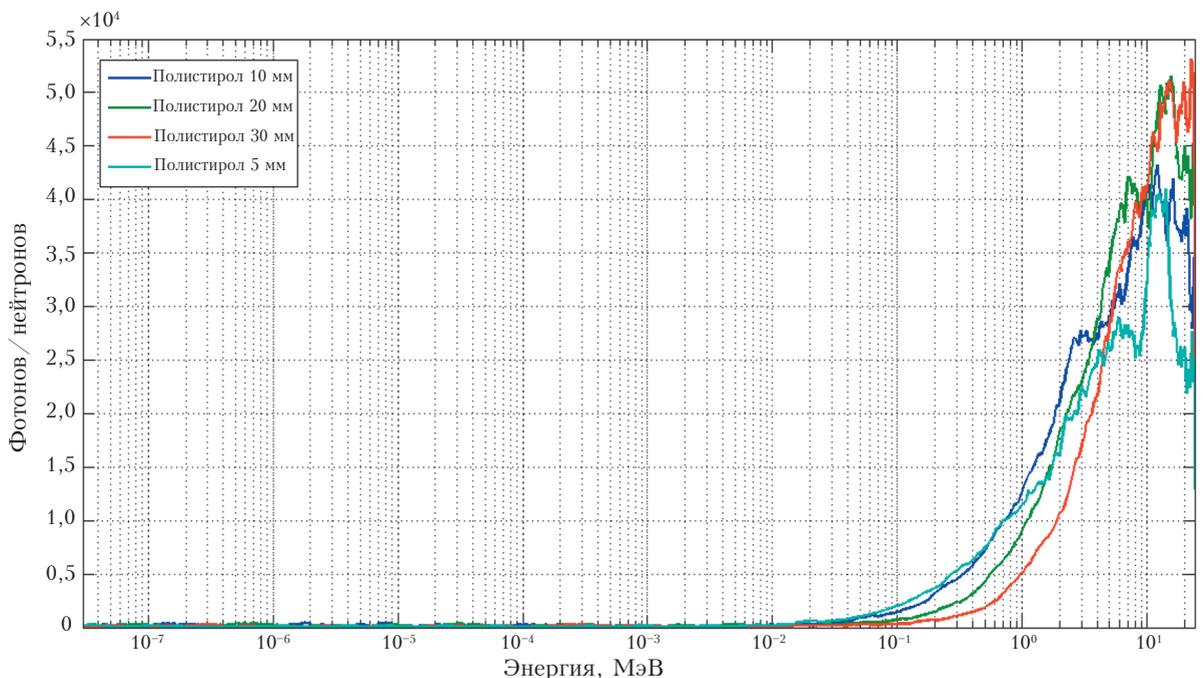


Рис. 1. Спектральные характеристики детекторов с полистирольными сцинтилляторами толщиной 5, 10, 20 и 30 мм без добавления бора-10 в сцинтиллятор.

(из атомов водорода, ядра которых выбиты нейтронами) имеют почти нулевую кинетическую энергию и захватываются атомами углерода, образуя отрицательные ионы. Сцинтилляций при этом не возникает. Соответственно, сцинтилляции в данном интервале энергий нейтронов порождаются только протонами отдачи при возбуждении ими атомов углерода. Просчитанная зависимость среднего количества выбиваемых каждым нейтроном протонов отдачи от энергии нейтрона показывает, что с ростом энергии нейтронов от тепловой до 10 кэВ оно медленно убывает (от 3,7 до 3,0 на 1 нейтрон), что связано с плавным уменьшением эффективности детектора, поскольку сечение взаимодействия нейтронов с ядрами атомов водорода на этом участке энергий практически постоянно). А далее с ростом энергии нейтронов количество протонов отдачи уменьшается более круто и при энергии нейтронов в 1 МэВ падает до 0,9, а при 10 МэВ до 0,2 (что определяется снижением сечения взаимодействия нейтронов с ядрами атомов водорода). Следовательно, резкий рост количества порождаемых фотонов на рис.1 не может происходить за счет роста

количества протонов отдачи. Причина состоит в росте их энергии. Анализ трассировки процессов, происходящих в сцинтилляторе в этой области энергий, показал, что при энергиях протонов отдачи свыше 50–100 кэВ начинается ионизация нейтральных атомов углерода с образованием высокоэнергичных электронов (с кинетической энергией свыше 10 кэВ), которые и вызывают возбуждение атомов и дополнительные сцинтилляции. С ростом энергии протонов отдачи число таких высокоэнергичных электронов и их энергии быстро растут. Поэтому, несмотря на уменьшение количества порождаемых протонов отдачи, суммарное количество сцинтилляций, порождаемых протонами отдачи и высокоэнергичными электронами, быстро растет.

Однако это не объясняет сдвига пороговой энергии нейтронов, при которой начинается резкий рост количества сцинтилляций, с увеличением толщины сцинтиллятора. Это может объясняться ухудшением светосбора при возрастании толщины сцинтиллятора. Для проверки этого предположения была рассчитана зависимость величины светосбора (отно-

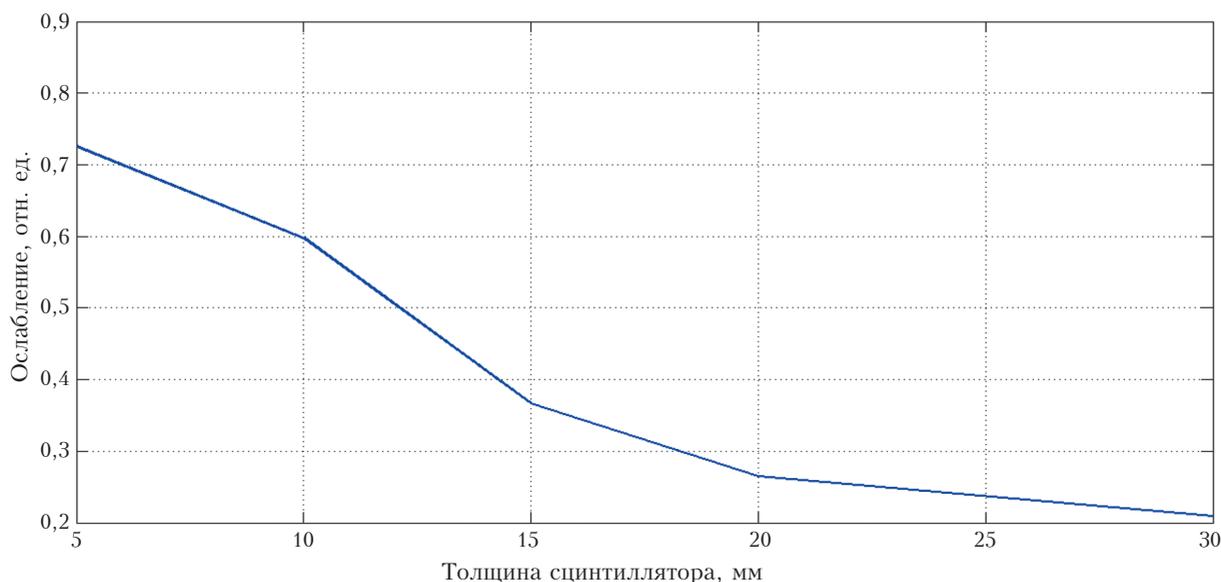


Рис.2. Зависимость величины светосбора от толщины сцинтиллятора.

шения числа фотонов, дошедших до заднего торца сцинтиллятора, вплотную прилегающего к фотокатоду ФЭУ, к числу образующихся фотонов от нейтронов различных энергий). Эта зависимость (в линеаризованном виде), подсчитанная для толщин сцинтиллятора 5, 10, 20 и 30 мм, представлена на рис.2.

Действительно, с ростом толщины сцинтиллятора светосбор ухудшается (при увеличении толщины сцинтиллятора от 5 до 30 мм более чем в три раза), что и приводит к сдвигу пороговой энергии нейтронов, с которой начинается крутой рост числа регистрируемых нейтронов с ростом толщины сцинтиллятора.

Результаты расчета спектральных характеристик детекторов с добавлением бора-10 в сцинтиллятор (с удельной концентрацией по массе 5%) толщиной 5, 10, 20 и 30 мм представлены на рис.3.

Из рис.3 следует, что с увеличением толщины сцинтиллятора чувствительность де-

текторов к тепловым нейтронам падает. Но для нейтронов с энергией выше 3 эВ чувствительность детектора с толщиной сцинтиллятора 10 мм уже превышает чувствительность детектора с толщиной сцинтиллятора 5 мм. Для детектора с толщиной сцинтиллятора 20 мм такое превышение начинается с энергий нейтронов 20–30 кэВ. Это связано, с одной стороны, с возрастанием эффективности детектора с ростом толщины сцинтиллятора, а с другой стороны, с уменьшением светосбора при возрастании толщины сцинтиллятора. Отсюда следует, что путем изменения порога амплитудной дискриминации (с учетом пропорциональной зависимости амплитуды выходных импульсов детектора от мощности сцинтилляционной вспышки) можно регулировать спектральную характеристику соответствующего измерительного канала. Следовательно используя несколько порогов амплитудной дискриминации, можно получить

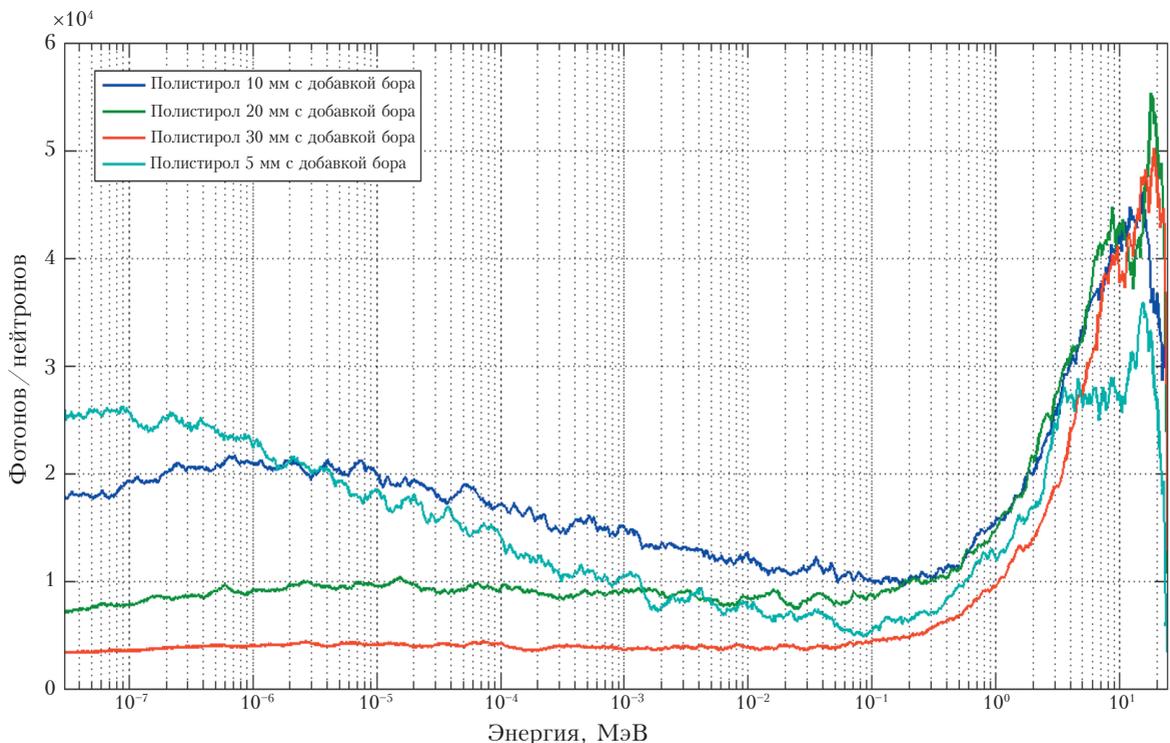


Рис.3. Спектральные характеристики полистирольных детекторов с добавлением в сцинтиллятор бора-10 для разных толщин сцинтиллятора.

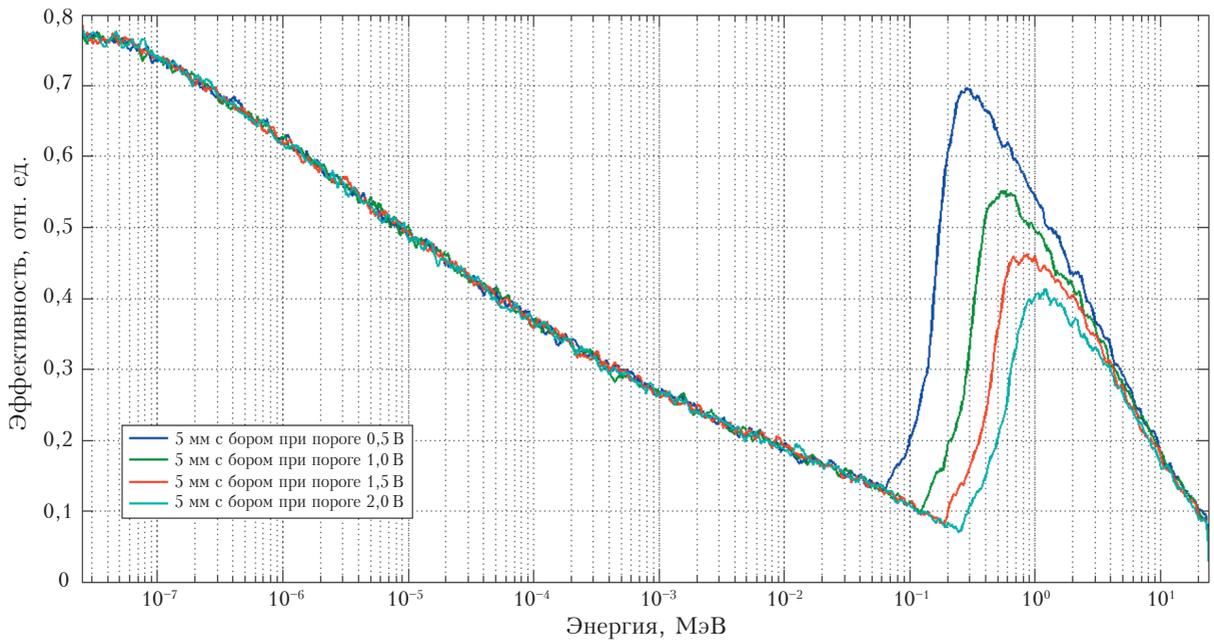


Рис.4. Спектральные характеристики детектора с добавлением бора-10 в сцинтиллятор толщиной 5 мм при порогах амплитудной дискриминации $0,1U_m$, $0,2U_m$, $0,3U_m$ и $0,4U_m$.

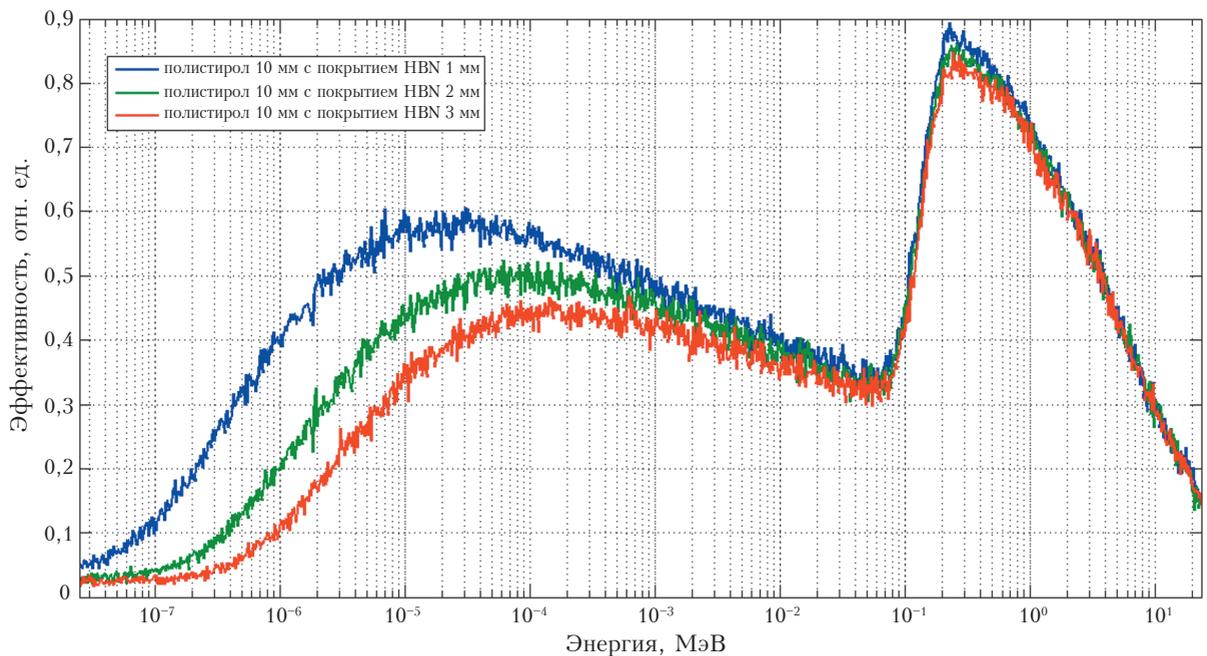


Рис.5. Спектральные характеристики сцинтилляционных детекторов на основе полистирола с добавкой бора-10 с толщиной сцинтиллятора 10 мм и фильтрующими покрытиями из нитрида бора различной толщины.

от одного детектора несколько параллельно работающих измерительных каналов с различными спектральными характеристиками.

Для подтверждения этого были проведены расчеты спектральных характеристик детекторов со сцинтилляторами с добавлением в них бора-10 различной толщины. Для примера на рис.4 приведены спектральные характеристики измерительных каналов, полученные от детектора со сцинтиллятором толщиной 5 мм для 4-х порогов амплитудной дискриминации, соответствующих $0,1U_m$, $0,2U_m$, $0,3U_m$ и $0,4U_m$, где U_m – максимальная амплитуда выходных импульсов данного детектора (соответствующая примерно мощности сцинтилляционной вспышки в 50000 фотонов).

Из рис.4 следует, что существенное влияние на вид спектральной характеристики детектора изменение порога амплитудной дискриминации выходных импульсов оказывает лишь в области высоких энергий нейтронов.

Дальнейшего повышения разнообразия спектральных характеристик сцинтилляцион-

ных нейтронных детекторов можно достичь, покрывая сцинтилляторы с добавкой бора-10 материалами, активно поглощающими тепловые нейтроны. Такими материалами являются кадмий, бор-10 и гадолиний. Толщины колпачка из кадмия в 1 мм, надеваемого на сцинтиллятор, вполне достаточно для практически полного поглощения тепловых нейтронов, содержащихся в потоке. Кадмий и гадолиний имеют зависимости сечения реакции поглощения нейтронов от их энергии с порогом резкого спада сечения реакции при энергии примерно 0,5 эВ. При этом и для кадмия, и для гадолиния в области энергий от 10 до 100 эВ на характеристике имеют место интенсивные резонансы, тогда как бор-10 имеет линейно падающую с ростом энергии нейтронов зависимость сечения реакции поглощения нейтронов от их энергии в диапазоне от 0,001 эВ до 10 МэВ. Поскольку в природном боре содержится примерно 20% изотопа бор-10, а технология обогащения бора изотопом бор-10 весьма сложна и дорога, то

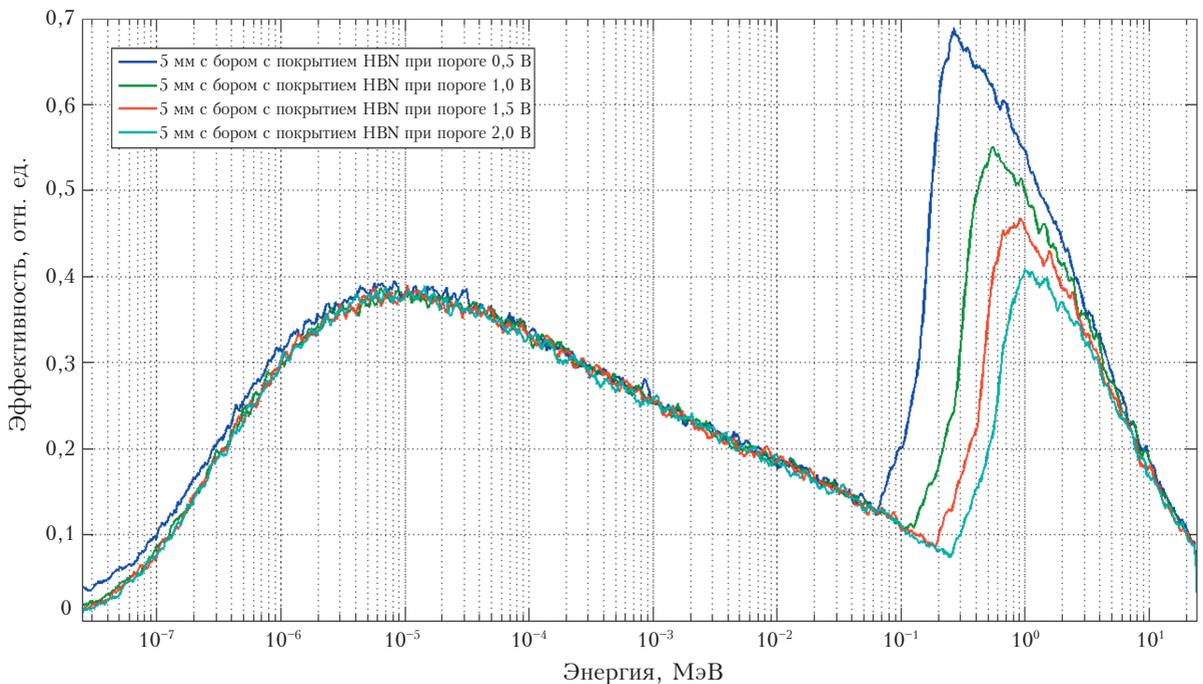


Рис.6. Спектральные характеристики полистирольного детектора с добавлением бора-10 в сцинтиллятор толщиной 5 мм с фильтрующим покрытием нитридом бора толщиной 1 мм.

для фильтрующего покрытия вполне можно использовать соединения природного бора, а нужного количества атомов бора-10 достичь увеличением толщины покрытия. В данном случае использовался порошкообразный нитрид бора, смешанный с эпоксидной смолой и после отверждения покрытия отшлифованный до получения нужной толщины слоя. Результаты расчета спектральных характеристик детекторов со сцинтилляторами с добавкой бора-10 толщиной 10 мм с фильтрующими покрытиями из нитрида бора различной толщины представлены на рис.5. С ростом толщины фильтрующего покрытия происходит сдвиг максимума чувствительности детектора в сторону возрастания энергии. В области быстрых нейтронов влияние покрытия становится существенным.

На рис.6 представлено использование фильтрующего покрытия совместно с многопороговой амплитудной дискриминацией выходных импульсов детектора.

Использовать фильтрующие покрытия для сцинтилляторов без добавки бора-10 нет смысла, поскольку они и так не чувствитель-

ны к тепловым и медленным нейтронам, а в области высоких энергий их характеристики подобны характеристикам аналогичных детекторов с добавлением бора-10 в сцинтиллятор.

Заключение

Таким образом, используя полистирольные сцинтилляторы различной толщины без добавки бора-10 и с добавкой бора-10, а в последнем случае дополнительно изменяя порог амплитудной дискриминации и применяя фильтрующие покрытия сцинтиллятора нитридом бора, можно получать детекторы (измерительные каналы) с весьма разнообразными спектральными характеристиками. Достижимое их разнообразие превышает достижимое разнообразие спектральных характеристик в многошаровом спектрометре Боннера.

Публикация подготовлена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашения N 075-15-2021-1155 и N 075-15-2021-1213)».

Литература

1. Способ и устройство для измерения спектральной и интегральной плотности потока нейтронов. Патент на изобретение N 2390800. Выдан 27.05.2010. Приоритет от 16.04.2008. Авторы: Дрейзин В.Э., Катыхин А.И., Полищук И.В. (ЮЗГУ), Овсянников Ю.А., Поляков В.Г. (завод «Маяк»).
2. Дрейзин В.Э. Нейтронная спектрометрия: концепция построения нейтронного спектрометра реально-го времени // АНРИ. 2010. N 4(63). С. 13-19.
3. Способ и устройство формирования спектральных характеристик измерительных каналов нейтронных детекторов. Заявка на изобретение, регистрационный N 2021136421. Дата рег. 10.12.2021.
4. Дрейзин В.Э., Логвинов Д.И., Гримов А.А. Подбор и оптимизация состава детекторов для многодетекторного спектрометра нейтронного излучения // АНРИ. 2011. N 2(65). С. 16-24.

Formation and Calculation of Spectral Characteristics Scintillation Neutron Detectors

Dreyzin Valeri, Logvinov Dmitri, Grimov Aleksandr, Kuzmenko Aleksandr (Southwestern State University, Kursk, Russia)

Abstract. The concept of creating a real-time multi-detector neutron spectrometer is briefly outlined. It is shown that the main problem of its implementation is the lack of neutron detectors with diverse and precisely known spectral characteristics in the neutron energy range from 0.001 eV to 20 MeV. It is proposed to use scintillation polystyrene neutron detectors for these purposes, and four methods for forming various spectral characteristics of such detectors are described. A method for calculating spectral characteristics using a microscopic approach is substantiated. The results of calculating the spectral characteristics of such detectors using all four proposed methods for their formation are presented.

Key words: *neutron spectrometer, scintillation neutron detectors, spectral characteristics, calculation methods, microscopic approach.*

В.Э.Дрейзин (профессор, д.т.н., дирек.), Д.И.Логвинов (инж.), А.А.Гримов (к.т.н., ст.преп.), А.П.Кузьменко (профессор, д.ф.-м.н., г.н.с.) – Юго-Западный государственный университет, г. Курск.

Контакты: тел. +7 (4712) 51-00-89, e-mail: dreyzin-ve@yandex.ru.