

# Моделирование и оптимизация состава детекторов в многодетекторном нейтронном спектрометре реального времени\*

Статья продолжает цикл статей, посвященных проблеме создания многодетекторного нейтронного спектрометра реального времени. В ней рассмотрена задача выбора оптимальной комбинации детекторов/измерительных каналов, обеспечивающей минимизацию ошибок восстановления спектральных составляющих измеряемого потока при минимальном количестве используемых детекторов. Для ее решения разработана система моделирования такого спектрометра с различными комбинациями используемых измерительных каналов с оценкой ошибок восстановления спектральных составляющих обширной выборки нейтронных потоков с разнообразной формой энергетического спектра.

## **Ключевые слова:**

*нейтронный спектрометр, блок детектирования, моделирование, обучающая выборка, комбинации детекторов, погрешности.*

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

(Юго-Западный государственный университет,  
г. Курск)

В данной статье продолжено рассмотрение основных проблем, связанных с разработкой многодетекторного нейтронного спектрометра реального времени, начатое в [1-3]. В [1] было показано, что с использованием четырех описанных в ней способов воздействия на спектральные характеристики сцинтилляционных полистирольных нейтронных детекторов можно получить множество измерительных каналов с различными спектральными характеристиками, а также изложен метод и приведены результаты расчетов спектральных характеристик таких детекторов с использованием всех рассмотренных способов их формирования. Разнообразие получаемых этими способами спектральных характеристик измерительных каналов получается даже выше, чем в многошаровых нейтронных спектрометрах Боннера. В [2] был предложен способ определения абсолютных

\* Данная публикация является четвертой статьей цикла, посвященного разработке многодетекторного нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени.

значений спектральных составляющих измеряемого нейтронного потока по нормированным на интегральную плотность потоков их значениям, получаемым по ответам нейронной сети, с помощью которой происходит восстановление спектра измеряемого потока по откликам измерительных каналов с различными спектральными характеристиками. Этот способ требует включения в состав блока детектирования спектрометра двух идентичных полистирольных детекторов, чувствительных к низкоэнергетическим нейтронам, на сцинтиллятор одного из которых надет кадмиевый экран, а на другом он отсутствует. И, наконец, в [3] был изложен способ отстройки от влияния сопутствующего гамма-излучения, который накладывает дополнительные ограничения на выбор детекторов и измерительных каналов, а именно, не должны использоваться детекторы с толщиной сцинтиллятора свыше 10 мм, а все измерительные каналы должны иметь порог амплитудной дискриминации выходных импульсов соответствующего детектора не ниже  $0,1U_m$ , где  $U_m$  – максимальная амплитуда импульсов данного детектора, соответствующая яркости сцинтилляционной вспышки примерно в 50000 фотонов.

Однако с учетом всех указанных ограничений остается еще множество вариантов состава детекторов в блоке детектирования спектрометра и формируемых на их основе измерительных каналов. Возникает задача выбора оптимальной комбинации детекторов/измерительных каналов, обеспечивающей максимальную точность восстановления значений спектральных составляющих измеряемого нейтронного потока при минимизации их количества. Она может быть корректно решена только путем математического моделирования нейтронного спектрометра с различными комбинациями детекторов (измерительных каналов) с оценкой погрешностей восстановления обширной выборки спектров измеряемых

нейтронных потоков самой разнообразной формы.

### **Разработка системы моделирования нейтронных спектрометров с различными комбинациями детекторов/измерительных каналов**

Как уже указывалось в [2], нейронная сеть, встраиваемая в спектрометр, должна обучаться по спектрам реализаций обучающей выборки, формируемой из спектров различных нейтронных источников, найденных в литературе, и из спектров потоков, получаемых экспериментально на испытательно-проверочном комплексе, позволяющем от одного первичного радиоизотопного источника нейтронов получать нейтронные потоки с различной формой энергетического спектра. Причем все эти спектры представлены в нормированном виде относительно интегральных плотностей соответствующих потоков. Соответственно, и восстановленные нейронной сетью спектры получаются в нормированном виде. Однако это не мешает оценивать погрешности восстановления спектральных составляющих, предъявляемых на входы нейронной сети спектров, поскольку истинные значения спектральных составляющих этих спектров, также заданные в нормированном виде, известны.

Разработанная для проведения моделирования многодетекторного спектрометра с различными комбинациями детекторов/измерительных каналов моделирующая система включает:

- численные модели всех базовых спектров, по которым должны формироваться модельные реализации обучающей и проверочной выборок;
- программу генерирования реализаций обучающей и проверочной выборок спектров нейтронного излучения на основе моделей базовых спектров;
- программу формирования модельных спектральных характеристик нейтронных

детекторов, включаемых в исследуемую комбинацию;

- программу получения откликов детекторов на каждую реализацию обучающей или проверочной выборки;
- программу определения ошибок восстановления спектра по всем энергетическим интервалам каждой реализации и выбора из них максимальной ошибки для данной реализации, а также среднеквадратичной ошибки по всем энергетическим интервалам всех реализаций как для обучающей, так и для проверочной выборок и среднеквадратичную величину максимальных ошибок всех реализаций обучающей выборки (последняя является критерием отбора наилучшей комбинации);
- программу обучения нейронной сети по откликам детекторов на каждую реализацию обучающей выборки;
- программу визуализации результатов моделирования в табличном и графическом виде.

### **Формирование базовых и модельных спектров нейтронных потоков разнообразной формы для обучения нейронной сети**

По различным зарубежным и отечественным литературным источникам [4-9] было отобрано 40 достоверно известных спектров нейтронных потоков разнообразной формы, включающих 4 группы: спектры потоков нейтронов от радиоизотопных источников (9 спектров); спектры потоков нейтронов утечки за границы активной зоны различных критических сборок (5 спектров); спектры потоков нейтронов утечки из защиты ядерных реакторов разных типов (8 спектров); спектры потоков нейтронов за биологической защитой реактора на рабочих местах персонала (18 базовых спектров). К ним было добавлено 30 наиболее разнообразных по форме экспериментальных спектров, получаемых на разрабатываемом испытательно-проверочном

комплексе. Всего на данном комплексе с использованием замедляющих дисков с суммарной толщиной от 0 до 180 мм, вставляемых в канал коллимирующей системы, и двух первичных радиоизотопных источников нейтронов (плутоний-бериллиевого и калифорниевого), а также при изменении расстояния между источником нейтронов и детектором, можно получить более 100 опорных нейтронных полей с различной формой спектров. Все эти спектры рассчитываются с использованием библиотеки программ GEANT-4 и представлены в нормированном виде относительно интегральной плотности соответствующего нейтронного потока. Для каждой конкретной геометрии измерений (толщины замедляющих дисков в полости коллимирующей системы и расстояния между источником и детектором) запускалось от 300 до 500 миллионов нейтронов, начальные скорости которых распределялись равномерно во все стороны, а энергия – в соответствии со спектром излучения данного источника. Далее прослеживались все его взаимодействия с встречающимися на его пути атомами от момента вылета из источника до его исчезновения. Учитывались также нейтроны, вышедшие за пределы коллиматора через его боковые стенки и рассеянные стенами, полом и потолком помещения, часть из которых достигает детектора. Столь огромное количество запускаемых при моделировании нейтронов необходимо для получения статистически значимого числа (не менее десятка тысяч) зарегистрированных детектором нейтронов, поскольку лишь ничтожная доля запущенных нейтронов достигает детектора и регистрируется им. Таким образом, расчет спектра каждого опорного поля требует огромных вычислительных ресурсов и занимает сотни часов машинного времени на современных ПК.

Из всех возможных спектров опорных нейтронных полей было отобрано 30 наиболее отличающихся по форме для расстояния

между источником и детектором в 1 м. Итого, с учетом спектров, взятых из литературы, получено 70 базовых спектров нейтронных потоков, по которым формируются обучающая и проверочная выборки модельных реализаций спектров. Для этого базовые спектры, заданные в непрерывной форме, преобразуются в ступенчатую форму путем вычисления среднеинтервальных значений спектральной плотности по заданным энергетическим интервалам. Количество и границы энергетических интервалов выбраны с учетом общепринятых границ между тепловыми, промежуточными и быстрыми нейтронами (0,5 эВ и 0,2 МэВ) при нижней границе всего измеряемого энергетического диапазона 0,001 эВ и верхней 20 МэВ. При этом, поскольку наибольшая вариабельность спектральной плотности наблюдается в области тепловых и эпитепловых нейтронов (от 0,001 до 2,0 эВ), а также в области быстрых нейтронов (0,2...20 МэВ), интервалы в этих областях энергий сужены. Кроме того, сужены интервалы в области от 10 до 200 кэВ, поскольку в этой области энергий имеют место наиболее сильные изменения конверсионных коэффициентов для перехода от измеренных значений спектральных плотностей к мощности эквивалентной дозы. Это связано с тем, что наиболее массовой сферой применения спектрометра является именно точное определение мощности дозы по измеренному спектру при дозиметрическом контроле рабочих мест персонала ядерных объектов. С учетом всего сказанного было принято 13 энергетических интервалов: 0,001–0,025 эВ; 0,025–0,1 эВ; 0,1–0,5 эВ; 0,5–2,0 эВ; 2,0–20 эВ; 20–500 эВ; 0,5–10 кэВ; 10–50 кэВ; 50–200 кэВ; 0,2–0,5 МэВ; 0,5–2 МэВ; 2–10 МэВ; 10–20 МэВ, три из которых соответствуют области тепловых нейтронов, четыре – области быстрых нейтронов и шесть – промежуточной области энергий нейтронов.

*Примечание: В большинстве публикаций по нейтронной спектрометрии нижней границей энергии нейтронных спектров считается энергия 0,025 эВ, а верхней 14 МэВ. Однако реально энергия нейтронов распределяется при равновесной температуре в достаточно широком интервале энергий и соответствует распределению Максвелла-Больцмана, а энергия 0,025 эВ определяет эффективную энергию тепловых нейтронов, находящихся в термодинамическом равновесии со средой при температуре 293 К. Выполненные нами расчеты спектров опорных нейтронных полей подтвердили, что реальная нижняя граница энергетических спектров соответствует 0,001 эВ, причем на интервал от 0,001 до 0,025 эВ приходится до 20–25 % всех тепловых нейтронов. К тому же и конверсионные коэффициенты для пересчета спектральной плотности нейтронных потоков в AMBIENT-ный эквивалент дозы  $H^*(10)$  заданы в диапазоне энергий от 0,001 эВ до 20 МэВ [10,11]. А верхняя граница в 14 МэВ указывалась, по-видимому, с учетом возможности метрологического обеспечения, поскольку существуют нейтронные генераторы, позволяющие получать близкий к моноэнергетическому поток нейтронов с энергией 14 МэВ.*

При синтезе модельных реализаций спектров для обучения нейронной сети к полученным среднеинтервальным значениям спектральной плотности добавлялась случайная величина со среднеквадратическим отклонением в 10%, что позволяет моделировать стохастический разброс энергий нейтронов и еще больше разнообразит формы спектров модельных реализаций. По каждому базовому спектру формируется 20 реализаций спектров обучающей выборки и 10 проверочной. В итоге объем обучающей выборки получается равным 1400 реализаций, а проверочной – 700, что обеспечивает хорошую статистическую достоверность получаемых по ним результатов моделирования.

## Определение исходного множества детекторов и измерительных каналов

Ввиду того, что всего может быть получено несколько десятков детекторов/измерительных каналов [1], из которых надо проводить отбор оптимальной их комбинации, а моделирование результатов измерений данным спектрометром с каждой из таких комбинаций требует больших вычислительных ресурсов, желательно сократить исходное множество детекторов/измерительных каналов до какого-то приемлемого минимума (в пределах двух–трех десятков). Отбор исходного множества детекторов/измерительных каналов должен проводиться по критерию максимального разнообразия их спектральных характеристик. Формализовать такой отбор достаточно сложно. Поэтому он был проведен путем визуальной оценки разнообразия форм их спектральных характеристик.

Коэффициенты передачи всех измерительных каналов должны настраиваться таким образом, чтобы максимальная амплитуда выходных импульсов каждого из них соответствовала мощности сцинтилляционной вспышки в 50000 фотонов и равнялась принятому значению  $U_m$  (в нашем случае она была принята равной 5 В). В этом случае максимальный уровень шумовых импульсов детекторов (при использовании отечественных электровакуум-

ных ФЭУ) не превысит 500 фотонов, т. е. их амплитуда не превысит 50 мВ. В связи с наложенным ограничением на минимальный порог амплитудной дискриминации выходных импульсов детектора [3] в  $0,1U_m$ , он будет соответствовать 0,5 В, что на порядок превышает уровень шумовых импульсов детектора и обеспечивает надежное устранение их влияния.

В итоге получаем исходное множество детекторов/измерительных каналов, представленное в табл.1.

Итого получили 9 различных детекторов при общем числе измерительных каналов 27.

## Стратегия и процедура отбора

Для проведения отбора наилучшей комбинации детекторов/измерительных каналов по каждой реализации и обучающей, и проверочной выборки для каждой комбинации детекторов рассчитывались ошибки восстановления спектральных плотностей на каждом энергетическом интервале в виде разностей между точно известными значениями среднеинтервальных спектральных плотностей данной реализации потока и их значений, определяемых по ответам нейронной сети (и те, и другие представлены нормированными на интегральную плотность потока значениями, т. е. и те, и другие заданы в процентах от интегральной плотности соответствующего потока). Из этих

**Табл.1.** Исходное множество детекторов/измерительных каналов.

№ детектора	Толщина сцинтиллятора, мм	V-10	Экран кадмий	Толщина покрытия, мм	Порог дискриминации, В
1	3	Да	Нет	Нет	0,5; 1,0; 1,5; 2,0
2	5	Да	Нет	Нет	0,5; 1,0; 1,5; 2,0
3	10	Да	Нет	Нет	0,5; 1,0; 1,5; 2,0
4	3	Да	Да	Нет	0,5; 1,0; 1,5; 2,0
5	5	Да	Да	Нет	0,5; 1,0; 1,5; 2,0
6	10	Да	Да	Нет	0,5; 1,0; 1,5; 2,0
7	5	Нет	Нет	Нет	0,5
8	10	Да	Нет	1	0,5
9	10	Да	Нет	3	0,5

ошибок выделялась максимальная ошибка для данной реализации (т. е. из 13 ошибок выбиралась одна – для того энергетического интервала, где она максимальна). Кроме того, для каждой реализации рассчитывались среднеквадратичные значения ошибок (СКО) по всем энергетическим интервалам каждой реализации. По всем реализациям обучающей выборки подсчитывалась средняя квадратичная величина максимальных ошибок, а также средняя квадратичная величина ошибок по всем энергетическим интервалам всех реализаций отдельно для обучающей и проверочной выборок. В качестве критерия отбора оптимальной комбинации использовалась минимизация среднеквадратичной величины максимальных ошибок всех реализаций обучающей выборки, поскольку для обеспечения безопасности персонала минимизация максимальных ошибок важнее, чем минимизация усредненных ошибок по всем энергетическим интервалам всех реализаций. Кроме того, на каждом шаге алгоритма по критерию Фишера оценивалась значимость улучшения критерия для наилучшей комбинации данного шага по сравнению с наилучшей комбинацией предыдущего шага. Отбор прекращался по незначимости улучшения (или ухудшению) критерия отбора при добавлении любого очередного измерительного канала.

Для восстановления спектров использовались трехслойные нейронные сети прямого распространения с сигмоидными передаточными функциями нейронов, поскольку при хорошей точности восстановления спектров они обеспечивали минимальное число настраиваемых коэффициентов нейронной сети, что важно, поскольку уже обученная нейронная сеть должна эмулироваться в встраиваемый в спектрометр микроконтроллер. Число нейронов во входном слое определялось количеством используемых в каждой комбинации измерительных каналов, а в выходном слое – ко-

личеством энергетических интервалов (всегда равным 13). Количество нейронов в промежуточном слое определялось как среднее между количеством нейронов во входном и выходном слоях.

Поскольку моделирование спектрометра с каждой комбинацией детекторов при столь значительном объеме обучающей выборки требует больших вычислительных ресурсов, сплошной перебор всех возможных комбинаций измерительных каналов будет непродуктивен. Поэтому использовалась более экономичная процедура перебора.

1. На первом шаге перебора безальтернативно выбирается один из трех детекторов без кадмиевого экрана на сцинтиляторе со всеми порогами амплитудной дискриминации.

2. На втором шаге перебора к нему добавляются поочередно каждый из измерительных каналов идентичного детектора, но с кадмиевым экраном на сцинтиляторе. Оставляется тот из них, который обеспечивает минимальное значение критерия отбора. Все остальные измерительные каналы (с другими порогами амплитудной дискриминации) исключаются из дальнейшего перебора. Таким образом, после второго шага мы имеем 2 детектора при 5 измерительных каналах. Подсчитывается критерий Фишера, определяющий значимость улучшения критерия отбора наилучшей комбинации данного шага по сравнению с предыдущим шагом.

3. На третьем шаге к этим 5 измерительным каналам добавляется поочередно каждый из оставшихся измерительных каналов (исключаются лишь оставшиеся измерительные каналы того детектора, который выбран на втором шаге), и выбирается наилучшая комбинация этого шага (получаем 3 детектора при 6 измерительных каналах).

4. На последующих шагах к наилучшей комбинации предыдущего шага добавляется поочередно один из оставшихся измерительных



каналов (кроме каналов детектора, выбранного на втором шаге) независимо от того, какому детектору он принадлежит.

5. Перебор останавливается по критерию Фишера, если при включении любого дополнительного измерительного канала критерий отбора не улучшается.

Недостатком этой стратегии является отсутствие гарантии отбора наилучшей комбинации, поскольку результаты отбора будут зависеть от того, какой из трех детекторов (без кадмиевых экранов на сцинтилляторе) с несколькими порогами амплитудной дискриминации выбран на первом шаге. Для его устранения рассчитывалось три альтернативных варианта с выбором на первом шаге каждого из этих детекторов.

## Результаты моделирования

### Вариант 1

На первом шаге данного варианта выбирается детектор с толщиной сцинтиллятора 3 мм с добавлением в него бора-10 без кадмиевого экрана и покрытия с порогами амплитудной дискриминации 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 В. Резуль-

таты первого шага моделирования по обучающей выборке приведены в табл.2. Из нее следует, что уже один этот детектор при четырех измерительных каналах обеспечивает неплохие результаты. В последнем столбце показана самая большая из всех максимальных ошибок всех реализаций обучающей выборки.

Ошибки восстановления реализаций проверочной выборки представлены в табл.3. Поскольку реализации проверочной выборки не участвуют в отборе наилучшей комбинации детекторов/измерительных каналов, то максимальные ошибки восстановления спектральных составляющих каждой модельной реализации спектра не рассчитывались и, соответственно, не рассчитывались значения критерия отбора, а СКО по каждому интервалу и по всем интервалам всех реализаций оказались примерно такими же, как и в обучающей выборке, что при столь больших объемах этих выборок закономерно.

На втором шаге безальтернативно выбирается идентичный детектор, но с кадмиевым экраном с поочередным включением измерительных каналов с порогами амплитудной

**Табл.2.** Ошибки восстановления реализаций обучающей выборки на первом шаге.

Энергетические интервалы	СКО ошибок по каждому интервалу, %	Значение критерия отбора, %	СКО по всем интервалам всех реализаций, %	Максим. ошибка, %
0,001–0,025 эВ	6,22	7,69	5,29	52,7
0,025–0,1 эВ	6,38			
0,1–0,5 эВ	6,40			
0,5–2,0 эВ	2,90			
2,0–20 эВ	1,76			
20–500 эВ	2,90			
0,5–10 кэВ	2,22			
10–50 кэВ	2,18			
50–200 кэВ	1,83			
0,2–0,5 МэВ	1,72			
0,5–2,0 МэВ	7,72			
2–10 МэВ	8,75			
10–20 МэВ	7,58			
Критерий Фишера	-	-	-	-

**Табл.3.** Ошибки восстановления реализаций проверочной выборки.

Энергетические интервалы	СКО ошибок по каждому интервалу, %	СКО по всем интервалам всех реализаций, %
0,001–0,025 эВ	3,35	5,29
0,025–0,1 эВ	5,32	
0,1–0,5 эВ	6,16	
0,5–2,0 эВ	2,48	
2,0–20 эВ	2,11	
20–500 эВ	2,41	
0,5–10 кэВ	4,11	
10–50 кэВ	2,43	
50–200 кэВ	2,14	
0,2–0,5 МэВ	2,06	
0,5–2,0 МэВ	2,19	
2–10 МэВ	7,90	
10–20 МэВ	5,15	

**Табл.4.** Процедура отбора оптимальной комбинации детекторов (первый вариант).

№ шага	Толщина сцинт., мм	В-10	Покрытие кадмий	Покрытие бор, мм	Порог дискриминации, В	Критерий, %	СКО, %	Макс. ошибка, %
1	3	Да	Нет	Нет	0,5; 1,0; 1,5; 2,0	7,69	5,29	52,7
2	3	Да	Да	Нет	1,0	7,13	4,80	44,3
3	5	Нет	Нет	Нет	0,5	3,30	1,90	26,2
4	10	Да	Нет	3	0,5	2,92	1,82	23,8
5	10	Да	Нет	Нет	1,0	2,67	1,62	20,8

дискриминации 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 В. Наилучшей оказалась комбинация с порогом амплитудной дискриминации 1,0 В. Оставляем этот канал, а остальные каналы этого детектора исключаем из дальнейшего перебора.

Поскольку таблицы ошибок по обучающей и проверочной выборкам достаточно громоздки, то приводить их по результатам второго и последующих шагов отбора (а их понадобилось 5) нецелесообразно. Поэтому сведем результаты всех шагов отбора для данного варианта в сводную табл.4.

Из табл.4 следует, что второй шаг с выбором детектора, идентичного выбранному на первом шаге, но с кадмиевым экраном, привел к не очень существенному улучшению точности восстановления спектральных составляющих. Но этот детектор выбирался

безальтернативно для обеспечения возможности восстановления абсолютных значений спектральных составляющих измеряемого потока [2]. Лишь перебор измерительных каналов этого детектора с различными порогами амплитудной дискриминации проводился по критерию.

Зато третий шаг более чем вдвое улучшил показатели точности. Четвертый и пятый шаги дали менее существенные улучшения.

Далее добавление любого из оставшихся измерительных каналов не приводило к улучшению критерия отбора и критерий Фишера при этом был меньше критического значения. Поэтому наилучшей является комбинация, полученная на пятом шаге и состоящая из пяти детекторов при восьми измерительных каналах.



**Табл.5.** Процедура отбора оптимальной комбинации детекторов (второй вариант).

№ шага	Толщина сцинт., мм	В-10	Покрытие кадмий	Покрытие бор	Порог дискриминации, В	Критерий, %	СКО, %	Макс. ошибка, %
1	5	Да	Нет	Нет	0,5; 1,0; 1,5; 2,0	7,70	5,01	48,2
2	5	Да	Да	Нет	0,5	7,63	4,68	47,9
3	5	Нет	Нет	Нет	0,5	3,86	2,38	29,7
4	10	Да	Нет	Нет	2,0	3,07	1,97	23,4
5	3	Да	Нет	Нет	0,5	2,90	1,89	20,1

**Табл.6.** Процедура отбора оптимальной комбинации детекторов (третий вариант).

№ шага	Толщина сцинт., мм	В-10	Покрытие кадмий	Покрытие бор, мм	Порог дискриминации, В	Критерий, %	СКО, %	Макс. ошибка, %
1	10	Да	Нет	Нет	0,5; 1,0; 1,5; 2,0	6,64	4,18	51,2
2	10	Да	Да	Нет	0,5	4,98	3,32	34,3
3	10	Да	Нет	1,0	0,5	4,62	3,09	35,4
4	5	Нет	Нет	Нет	0,5	3,53	2,36	24,8
5	10	Да	Нет	3,0	0,5	2,99	2,15	20,4

### Вариант 2

В этом варианте на первом шаге выбирается детектор с сцинтиллятором толщиной 5 мм с добавкой бора-10 без покрытия с порогами амплитудной дискриминации 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 В, а на втором шаге – идентичный детектор, но с кадмиевым экраном на сцинтилляторе с поочередным опробованием каждого из четырех возможных измерительных каналов с теми же порогами амплитудной дискриминации выходных импульсов детектора. Результаты этого и всех следующих шагов сведены в табл.5. Как и в первом варианте, получили наилучшую комбинацию из пяти детекторов при восьми измерительных каналах. При этом значения критерия и СКО получились несколько хуже, чем для первого варианта. Достоинством данного варианта является отсутствие в оптимальной комбинации детекторов с покрытием сцинтиллятора нитридом бора, что упрощает технологию их изготовления.

### Вариант 3

В этом варианте на первом шаге выбирается детектор с сцинтиллятором толщиной 10 мм

с добавкой бора-10 без покрытия с порогами амплитудной дискриминации 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 В. Процедура отбора наилучшей комбинации детекторов/измерительных каналов представлена в табл.6.

И в этом случае наилучшая комбинация состоит из пяти детекторов при восьми измерительных каналах, но ошибки восстановления спектров всех реализаций обучающей выборки несколько хуже, чем и у первого, и у второго вариантов оптимальной комбинации.

### Заключение

В статье проведен отбор оптимального состава детекторов/измерительных каналов многодетекторного нейтронного спектрометра-дозиметра из того множества детекторов/измерительных каналов с различными спектральными характеристиками, которое можно получить с использованием описанных в [1] способов формирования их спектральных характеристик. Для этого была разработана система моделирования многодетекторного нейтронного спектрометра с различными комбинациями детекторов/измерительных

каналов с оценкой ошибок восстановления спектральных составляющих нейтронных потоков с различными формами энергетических спектров с использованием встраиваемой в спектрометр заранее обученной на обширной выборке разнообразных спектров нейтронных потоков. При разработке этой моделирующей системы были отобраны из литературных источников 40 наиболее разнообразных по форме достоверно известных спектров различных нейтронных источников, и к ним добавлено 30 наиболее разнообразных спектров, получаемых на разрабатываемом испытательно-поверочном комплексе, позволяющем от одного первичного радиоизотопного источника нейтронов получать опорные нейтронные поля со спектрами различной формы. По этим базовым спектрам синтезировалась обширная выборка модельных спектров, по которой проводилось обучение нейронной сети с определением ошибок восстановления спектральных составляющих для всех модельных реализаций спектров. В связи с большими вычислите-

льными ресурсами, необходимыми для моделирования спектрометра с каждой комбинацией используемых детекторов/измерительных каналов, разработана экономичная процедура моделирования спектрометров с различными комбинациями детекторов/измерительных каналов с целью выбора оптимальной комбинации. Представленные результаты моделирования убедительно свидетельствуют о перспективности таких спектрометров, позволяющих измерять нейтронные потоки с разнообразной формой энергетического спектра в широком энергетическом диапазоне от 0,001 эВ до 20 МэВ с весьма высокой точностью измерения спектральных составляющих измеряемого потока по 13 энергетическим интервалам с весьма высокой точностью (не хуже 3 процентов от интегральной плотности измеряемого потока).

Публикация подготовлена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашения № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213).

## Литература

1. Дрейзин В.Э., Логвинов Д.И., Гримов А.А., Кузьменко А.П. Формирование и расчет спектральных характеристик сцинтилляционных нейтронных детекторов // АНРИ. 2022. N 3(110). С. 21-31.
2. Дрейзин В.Э., Логвинов Д.И., Гримов А.А., Кузьменко А.П. Восстановление абсолютных значений спектральных составляющих в многодетекторном нейтронном спектрометре // АНРИ. 2022. N 3(110). С. 32-36.
3. Дрейзин В.Э., Логвинов Д.И., Гримов А.А., Кузьменко А.П. Исследование и подавление чувствительности нейтронных сцинтилляционных детекторов к гамма-излучению // АНРИ. 2022. N 4(111). С. 22-32.
4. Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes. Technical report series no. 403. Supplement to Technical Reports Series no. 318. IAEA, Vienna, 276 p., 2001.
5. Севастьянов В.Д. Моделирующие опорные поля нейтронов для метрологического обеспечения нейтронных измерений на ядерно-физических установках РФ. Монография. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2015. 176 с.
6. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. Характеристики полей нейтронов. Источники мгновенных нейтронов деления, генераторы 14 МэВ нейтронов, исследовательские и энергетические реакторы, устройства, конвертирующие нейтронное излучение. Справочник в 2-х т. Том 1. Издание 2-е, переработанное и дополненное. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2014. 338 с.

7. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. Характеристики полей нейтронов. Источники мгновенных нейтронов деления, генераторы 14 МэВ нейтронов, исследовательские и энергетические реакторы, устройства, конвертирующие нейтронное излучение. Справочник в 2-х т. Том 2. Издание 2-е, переработанное и дополненное. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2014. 356 с.
8. Гозенбук В.Л., Кеирим-Маркус И.В., Савинский А.К., Чернов Е.Н. Дозовые нагрузки на человека в полях гамма-нейтронного излучения. М.: Атомиздат, 1978. 168 с.
9. Санников А.В., Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Кушцов С.И., Сухарев М.М. Многошаровый спектрометр нейтронов на основе серийного прибора РСУ-01//АНРИ. 2009. N 1(56). С. 62-69.
10. IEC 61005 – International standard «Radiation protection instrumentation – Neutron ambient dose equivalent (rate) meters».
11. МУ 2.6.5.052 -2017. Дозиметрия. Определение индивидуальной эффективной дозы нейтронного излучения. М., 2018. 105 с.

## Simulation and Optimization of the Composition of Detectors in a Real-Time Multidetector Neutron Spectrometer

The publication was prepared as part of the implementation of the strategic academic leadership program «Priority 2030» (Agreements No. 075-15-2021-1155 and No. 075-15-2021-1213).

Dreyzin Valeri, Logvinov Dmitri, Grimov Aleksandr, Kuzmenko Aleksandr  
(South-Western State University, Kursk, Russia)

**Abstract.** The article continues the series of articles devoted to the problem of creating a real-time multi-detector neutron spectrometer. It considers the problem of choosing the optimal combination of detectors/measuring channels, which ensures the minimization of errors in the reconstruction of the spectral components of the measured flow with a minimum number of detectors used. To solve it, a simulation system for such a spectrometer with various combinations of measurement channels used was developed, with an estimate of the errors in reconstructing the spectral components of an extensive sample of neutron fluxes with a variety of energy spectrum shapes.

**Key words:** *neutron spectrometer, detection block simulation, training set, detector combinations, errors.*

*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 гос. университет, г. Курск.*

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