

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАВЕДЕННОЙ АКТИВНОСТИ В ОБРАЗЦАХ АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

**Р.Ф. Ибрагимов, Я.А. Кокорев, А.П. Денисенко, Е.В. Рябева,
В.Т. Самосадный, Х. Хаснауи**

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
115409 Москва, Каширское шоссе, д. 31*



Представлены результаты экспериментального определения наведенной активности активационных детекторов на основе меди и алюминия при их облучении нейтронами с энергией порядка 14 МэВ. Детекторы представляли собой металлические пластины квадратной формы с толщиной от 1,0 до 1,5 мм и размером стороны квадрата около 5,0 см. Указанные размеры активационных детекторов значительно превышают размеры детекторов, которые используются в задачах исследования высокоинтенсивных нейтронных потоков. Детекторы, описанные в работе, могут использоваться для исследования потоков нейтронов небольшой интенсивности (с плотностью потока до 10^6 н/см²·с). Показано, что для работы с подобными детекторами может быть использована обычная методика расчета наведенной активности в тонких активационных детекторах с поправками, учитывающими возникающие особенности геометрии «источник нейтронов – активационный детектор» и «активационный детектор – детектор вторичного излучения», а также эффекты поглощения первичного и вторичного излучения веществом детектора. Описаны результаты использования инструментов Geant4 для расчета величин геометрических факторов и теоретического значения наведенной активности. Показана применимость подобных активационных детекторов для решения задачи определения выхода нейтронов с энергией 14 МэВ из мишени нейтронного генератора. Результаты проведенных экспериментов в пределах погрешностей совпадают с результатами моделирования, проведенного с использованием инструментов Geant4.

Ключевые слова: активационные детекторы, нейтронное излучение, наведенная активность, математическое моделирование, Geant4, геометрический фактор.

Активационные детекторы, подвергнутые облучению нейтронами, преимущественно становятся излучателями гамма-квантов или бета-частиц (электронов или позитронов). Наиболее хорошо изученные методики регистрации нейтронов с использованием ак-

© Р.Ф. Ибрагимов, Я.А. Кокорев, А.П. Денисенко, Е.В. Рябева,
В.Т. Самосадный, Х. Хаснауи, 2020

тивационных детекторов применяются в приложениях, связанных с анализом характеристик поля нейтронов активной зоны реакторов или других ядерно-физических установок, способных обеспечить сравнимые по величине значения флюенса нейтронов [1 – 3]. При этом для данного метода исследования нейтронов оказывается достаточным использование детекторов малых размеров (до нескольких миллиметров в поперечнике и толщиной в доли миллиметров). Данная особенность метода позволяет при последующем анализе наведенной активности считать их точечными и пренебрегать поправками на самопоглощение в их веществе гамма-квантов или бета-частиц, а также не учитывать толщину образца с точки зрения вероятности нейтронов пролететь через детектор без взаимодействия [4, 5].

Активационные детекторы также могут использоваться для исследования полей нейтронов небольшой интенсивности, но для этого необходимо значительное увеличение толщины и площади детекторов. Задача определения активности в данном случае значительно усложняется, поскольку необходимо учесть поправку к значению геометрической эффективности регистрации гамма-детектора, поправку на самопоглощение гамма-квантов в активационном детекторе, влияние толщины детектора на концентрацию образующихся в материале новых изотопов под действием нейтронного излучения [6, 7].



Рис. 1. Внешний вид образца в позиции для облучения (перед торцом нейтронного генератора, слева), детектор в защитном домике (на фото открыт) и рабочее место, на котором проводилась запись спектров

К источникам нейтронов невысокой интенсивности можно отнести электрофизические устройства (нейтронные генераторы импульсного и непрерывного типа), радиоизотопные источники, исследовательские импульсные установки. Ключевыми преимуществами активационных детекторов в данном случае являются относительно небольшие размеры активируемых образцов (не вносят значительных искаже-

ний в нейтронное поле), принципиальная возможность получить информацию о интегральном выходе нейтронов даже за очень короткий импульс, а также отсутствие чувствительности к сопутствующему гамма-излучению [8]. Помимо непосредственной пользы в отношении изучения особенностей работы подобных нейтронных источников освоение практических навыков исследования параметров упомянутых нейтронных полей является весьма важной задачей с точки зрения сохранения знаний и возможности качественной подготовки молодых специалистов для атомной отрасли.

В данной работе приводятся результаты экспериментального определения значения наведенной активности в различных образцах активационных детекторов, описание методики, по которой производились вычисления, и сравнение результатов экспериментальных измерений с расчетными значениями. Показаны результаты экспериментального измерения значения выхода нейтронов из мишени нейтронного генератора. Активационные детекторы представляют собой металлические пластинки (Al, Cu) с природным изотопным составом, толщиной от 1 до 1,5 мм, прямоугольного и квадратного сечения со сторонами от 3 до 5 см. В качестве источника нейтронов использовался портативный нейтронный генератор ИНГ-07Т производства ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» [9] (рис. 1). Каждый из детекторов подвергался процедуре облучения в поле нейтронов, имеющих энергию порядка 14 МэВ, после чего осуществлялась регистрация наведенной активности. Наведенная активность в указанных детекторах измерялась посредством анализа зарегистрированного аппаратного спектра гамма-излучения от данных образцов после их облучения нейтронным потоком. Регистрация вторичных гамма-квантов осуществлялась с использованием коаксиального детектора из особо чистого германия (ОЧГ) модели Gem10P4 производства фирмы ORTEC (рис. 2).

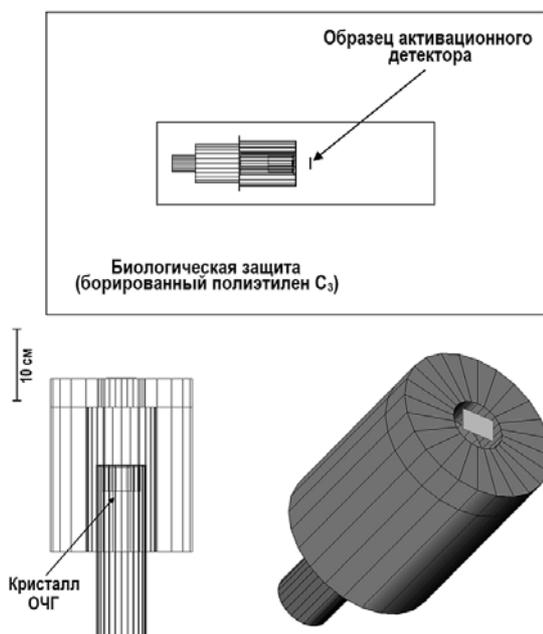


Рис. 2. Визуализация модели эксперимента по облучению (сверху) и регистрации наведенной активности (вычисления геометрического фактора)

Рассмотрим задачу определения наведенной активности на примере облучения образца из природной меди нейтронами с энергией порядка 14 МэВ. Данный образец состоит на 70% из изотопа ^{63}Cu и на 30% из изотопа ^{65}Cu . На данных изотопах, в основ-

ном, протекает реакция типа $(n,2n)$ с образованием изотопов ^{62}Cu и ^{64}Cu с периодами полураспада около 10 мин и 13 час соответственно. Оба изотопа претерпевают позитронный распад, приводящий к появлению в гамма-спектре линии с энергией 511 кэВ. В точке расположения образца во время облучения помимо быстрых нейтронов присутствуют рассеянные и замедлившиеся нейтроны. Это приводит к появлению небольшого количества конкурирующих ядерных реакций, например, реакция (n,γ) на изотопе ^{63}Cu , также приводящая к появлению изотопа ^{64}Cu . При регистрации спектра наведенной активности в первые десять – двадцать минут наличием вклада в пик 511 кэВ от изотопа ^{64}Cu можно пренебречь ввиду большого периода полураспада последнего, а также малого количества побочных реакций (n,γ) .

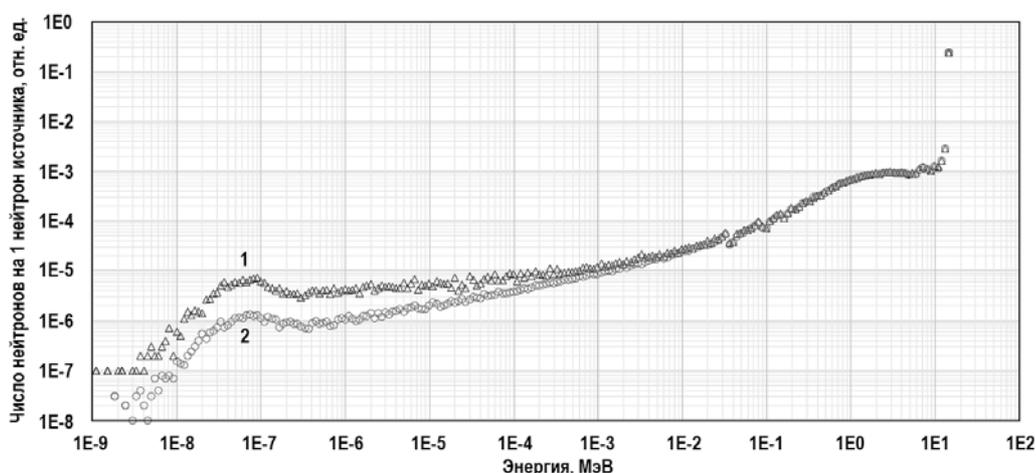


Рис. 3. Полученный с помощью Geant4 спектр нейтронов в точке расположения активационных детекторов от моноэнергетического точечного изотропного источника 14 МэВ нейтронов – мишени генератора: 1 – при наличии биологической защиты из борированного полиэтилена толщиной 50 см; 2 – при её отсутствии

На рисунке 3 показаны расчетные энергетические спектры нейтронов в точке расположения активационного детектора в момент облучения. Расчет осуществлялся с использованием инструментов пакета программ Geant4 [10], в качестве физического листа использовался готовый набор физики QGSP_BERT_HP, позволяющий осуществлять более точное моделирование поведения нейтронов с энергией в диапазоне от тепловых до 20 МэВ в различных веществах. Расчет осуществлялся для двух возможных конфигураций: наличие и отсутствие биологической защиты в виде 50 см борированного полиэтилена вокруг генератора нейтронов. На рисунке 2 показана визуализация модели эксперимента по облучению активационных детекторов нейтронами и по регистрации спектров вторичного гамма-излучения ОЧГ-детектором.

Количество тепловых нейтронов, появляющихся в точке расположения активационного детектора, очень мало по сравнению с количеством первичных нейтронов с энергией 14 МэВ (см. рис. 3). Именно поэтому можно пренебречь учетом как реакции захвата тепловых нейтронов изотопом ^{63}Cu , так и выгорания образующегося изотопа ^{62}Cu . Таким образом, задача определения наведенной активности в образце меди в данном случае сводится к определению активности изотопа ^{62}Cu абсолютным методом по количеству зарегистрированных аннигиляционных гамма-квантов. В качестве практического применения описанной методики вычисления наведенной активности в крупных активационных детекторах в работе приводится результат измерения значения выхода нейтронов из мишени нейтронного генератора. Результаты данного эксперимента демонстрируют применимость подобных детекторов для исследования слабоинтенсивных полей нейтронного излучения.

Активность точечного источника гамма-излучения, период полураспада которого значительно больше времени измерения активности, дается выражением

$$A = \frac{N_{\text{зарег}}}{\varepsilon_{\text{абс}} \cdot I \cdot t}, \quad (1)$$

где $N_{\text{зарег}}$ – число зарегистрированных гамма-квантов (интегральное число импульсов в пике полного поглощения (ППП)); I – квантовый выход исследуемой линии гамма-излучения в относительных единицах; t – время записи спектра; $\varepsilon_{\text{абс}}$ – абсолютная эффективность регистрации детектора, определяемая в относительных единицах выражением

$$\varepsilon_{\text{абс}} = \frac{N_{\text{зарег}}}{N_{\text{испуска}}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{испуска}}$ – число гамма-квантов данной энергии, испущенных источником в полный телесный угол за время измерения активности. Зависимость абсолютной эффективности от энергии гамма-квантов зависит как от характеристик детектора, так и от геометрии измерения (при приближении источника к детектору число зарегистрированных частиц увеличится, в то время как число испущенных останется прежним). Спектрометр с ОЧГ-детектором подвергался калибровке по эффективности регистрации с помощью набора ОСГИ, в который входили следующие изотопы: ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{22}Na . Исходя из вышесказанного можно сделать вывод о том, что вычислить активность какого-либо изотопа абсолютным методом (по числу зарегистрированных квантов), можно только зная значение абсолютной эффективности детектора для квантов данной энергии. Однако в случае, если исследуемый образец отличается в геометрическом отношении от эталонного, активность таким образом вычислить не получится (абсолютные эффективности пластинки и точечного источника будут отличаться). В связи с этим в спектрометрии гамма-излучения вводится понятие геометрической эффективности [11] как отношение числа зарегистрированных частиц к числу попавших в объем детектора:

$$\varepsilon_{\text{геом}} = \frac{N_{\text{зарег}}}{N_{\text{попавш}}}. \quad (3)$$

Данный параметр определяет уже только свойство самого вещества детектора к регистрации гамма-квантов определенной энергии и связан с величиной абсолютной эффективности следующим выражением:

$$\varepsilon_{\text{геом}} = \frac{N_{\text{зарег}}}{N_{\text{попавш}}} = \frac{N_{\text{зарег}}}{N_{\text{испуска}} \cdot G_r} = \frac{\varepsilon_{\text{абс}}}{G_r}, \quad (4)$$

где G_r – геометрический фактор, представляющий собой часть телесного угла, под которым детектор виден из точки расположения источника. С учетом вышесказанного, активность некоторого образца, геометрия которого отличается от эталонного, а период полураспада целевого изотопа значительно больше времени измерения, может быть вычислена с помощью следующей формулы:

$$A = \frac{N_{\text{зарег}}}{G_r \cdot \varepsilon_{\text{геом}} \cdot I \cdot t}. \quad (5)$$

В случае, если период полураспада рассматриваемого изотопа сравним по величине с временем измерения, формула (5) принимает вид

$$A_{\text{н.и.}} = \frac{N_{\text{зарег}}}{I \cdot G_r \cdot \varepsilon_{\text{геом}} \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot t))}, \quad (6)$$

где $A_{н.и.}$ – активность целевого изотопа на момент начала записи спектра гамма-излучения; λ – постоянная распада целевого изотопа. В то же время активность на момент начала измерения связана с активностью на момент конца облучения $A_{к.о.}$ через закон радиоактивного распада с учетом времени, прошедшего между окончанием облучения и началом измерения $t_{в\text{ьд}}$:

$$A_{к.о.} = A_{н.и.} \cdot \exp(\lambda \cdot t_{в\text{ьд}}). \quad (7)$$

Данная величина может быть привязана к количеству нейтронов Φ определенной энергии, вылетающих из источника (из мишени нейтронного генератора) в единицу времени:

$$A_{к.о.} = \Phi \cdot G_n \cdot [1 - \exp(-\rho \cdot N_A \cdot \sigma \cdot c \cdot d / M)] \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot t_{обл})]. \quad (8)$$

В данном выражении N_A – число Авогадро; G_n – геометрический фактор «источник нейтронов – активационный детектор», который, будучи умноженным на значение выхода нейтронов из источника Φ (нейтрон/с), дает число нейтронов, попавших на образец; ρ – плотность образца, г/см³; σ – микроскопическое сечение рассматриваемой реакции, см²; c – концентрация рассматриваемого изотопа в образце, отн. ед.; d – толщина образца, см; $t_{обл}$ – время облучения; M – молярная масса, г/моль. Величина в первых квадратных скобках учитывает то, что образец имеет некоторую конечную толщину, и в нашем случае не является тонким. В большинстве приложений, в которых используются активационные детекторы, работа осуществляется в интенсивных полях нейтронов, в которых для получения необходимой активности в образце достаточно использовать тонкие фольги. В таком случае выражение (7) упрощается (вместо первых скобок остается множитель, являющийся положительным показателем экспоненты). Отметим, что точность значения G_n определяется подробностью информации о строении мишенного блока трубки нейтронного генератора, и в данной работе параметр G_n мог быть определен только со значительной погрешностью, так как характеристики конструкции генератора являются коммерческой тайной производителя.

Объединяя (6) – (8), получаем выражение для определения значения выхода нейтронов из мишени нейтронного генератора

$$\Phi = \frac{\lambda N_{зарег} \exp(\lambda t_{в\text{ьд}})}{I G_r \varepsilon_{геом} [1 - \exp(-\lambda t_{изм})] \cdot G_n [1 - \exp(-\rho N_A \sigma c d / M)] \cdot [1 - \exp(-\lambda t_{обл})]}. \quad (9)$$

Единственными величинами, вычисления которых могут вызывать некоторые сложности, остаются геометрические факторы. Их значения могут быть вычислены различными способами. Например, в случае точечной геометрии «активационный детектор – детектор вторичного излучения», G_r может вычисляться с использованием следующего выражения:

$$G_r = \frac{1}{2} \int_0^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{1}{2} (1 - \cos \theta_2) = \frac{1}{2} (1 - h / \sqrt{h^2 + r^2}). \quad (10)$$

Рисунок 4 поясняет величины, приведенные в выражении (10).

Заштрихованная область на рисунке представляет собой чувствительный объем детектора, выполненного в виде цилиндра высотой d и радиусом r . Расстояние между верхним торцом детектора и точкой расположения источника равно h . Выражение (10) справедливо при вычислении геометрического фактора для точечных источников (источники могут считаться таковыми, если их линейные размеры более чем в несколько раз меньше характерных размеров детектора и расстояния до него). Вычисленный таким образом геометрический фактор для конфигурации эксперимента с эталонными источниками ОСГИ составил значение $(1,07 \pm 0,02) \cdot 10^{-3}$.

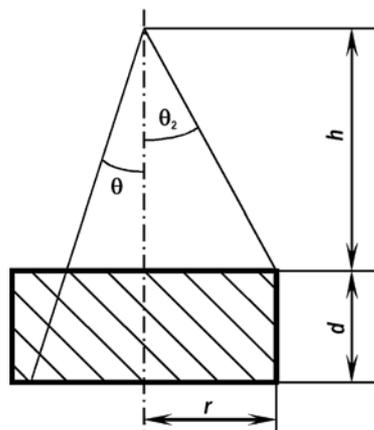


Рис. 4. Чертёж для определения величины геометрического фактора G_r в точечной геометрии

Помимо данного аналитического метода для вычисления геометрического фактора можно использовать также метод Монте-Карло – разыгрывая случайным образом направления испускания лучей из каждой точки источника и фиксируя число попаданий данных лучей в поверхность детектора. Значение G_r , посчитанное с помощью Geant4, моделирование в котором основано на методе Монте-Карло, оказалось равным $(1,06 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$. Современные средства моделирования процессов взаимодействия ионизирующих излучений с веществом позволяют произвести не просто расчет геометрических факторов G_r и $G_{r'}$, но и сделать это с учетом возможного поглощения или другого ослабления как гамма-, так и нейтронного излучения в конструкционных материалах (корпус детектора или нейтронного генератора, само вещество активационного детектора и т.д.). Для этого необходимо как можно более точно задать состав материалов. В связи с этим в уравнениях (7) и (9) отсутствуют поправочные коэффициенты, которые должны учитывать данные процессы. Кроме того, Geant4 позволяет вычислить теоретическое значение активности облученного образца (или скорости наработки целевого изотопа) на основании имеющейся информации о параметрах проведенного эксперимента по облучению образцов нейтронами.

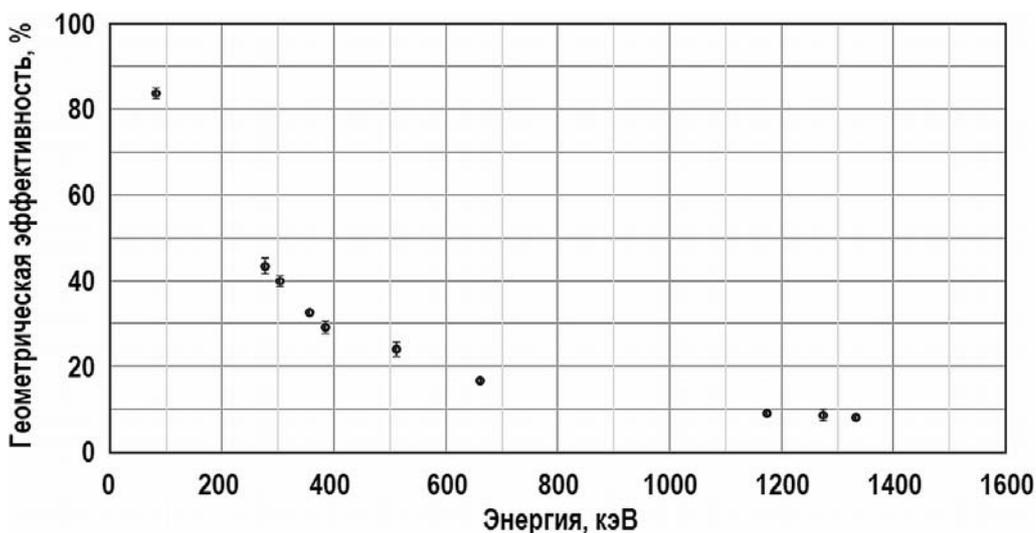


Рис. 5. Зависимость геометрической эффективности регистрации гамма-квантов от их энергии для ОЧГ-детектора из состава экспериментального стенда

Поскольку исследуемые активационные детекторы геометрически сильно отли-

чаются от точечных эталонных источников, с помощью которых проводилась калибровка спектрометра гамма-излучения по эффективности, необходимо было перейти от абсолютной эффективности к геометрической. Переход осуществлялся по формуле (4) с использованием значений G_r вычисленных с помощью инструментов Geant4.

Следует отметить точку на полученной зависимости (рис. 5), которая связана с регистрацией линии гамма-квантов с энергией 511 кэВ, испускаемых изотопом ^{22}Na . Эти гамма-кванты формируются в результате актов аннигиляции позитронов, источником которых является данный изотоп. В обычном виде источник ОСГИ, представляя собой активное вещество, заключенное между двумя тонкими полиамидными пленками, не препятствует вылету позитронов, которые аннигилируют только на некотором расстоянии от активного вещества. Таким образом, данный источник уже не может считаться точечным. Можно считать, что гамма-кванты вылетают из некоторой сферы с радиусом, равным наиболее вероятному пробегу позитронов в воздухе. Чтобы источник можно было рассматривать как точечный при регистрации гамма-квантов с энергией 511 кэВ, необходимо расположить под и над источником тонкий слой металлической фольги, в которой и будет происходить аннигиляция.

Нейтронное облучение образца из Al проводилось в течение 20 мин, образца из Cu в течение 10 мин. Контрольные данные о выходе нейтронов из мишени генератора во время облучения брались из программы управления ИНГ-07Т. Каждый из образцов облучался при контрольном значении выхода $\Phi_{\text{контр}} = 1,5 \cdot 10^8$ н/с, что с учетом геометрии эксперимента формировало значение плотности потока быстрых нейтронов в точке расположения активационных детекторов порядка 10^6 н/см²·с, что является небольшой величиной по сравнению со значениями плотностей потоков в большинстве экспериментов с активационными детекторами. В результате обработки спектров гамма-излучения, полученных после облучения исследуемых детекторов, получены значения активности накопленных нуклидов на момент начала записи гамма-спектра. С помощью Geant4 также вычислялось теоретическое значение активности для описанных параметров эксперимента. В таблице 1 приведена сводка полученных результатов.

Таблица 1

Значения G_r и G_n , найденные с помощью Geant4, и сравнение величины наведенной активности, полученной в эксперименте $A_{\text{эксп}}$ и вычисленной в модели $A_{\text{модель}}$

Образец	G_r , отн. ед.	G_n , отн. ед.	$A_{\text{эксп}}$, БК	$A_{\text{модель}}$, БК
Cu	$(1,21 \pm 0,02) \cdot 10^{-2}$	$(0,221 \pm 0,011) \cdot 10^{-2}$	$(5,1 \pm 0,1) \cdot 10^2$	$(5,4 \pm 0,1) \cdot 10^2$
Al	$(1,15 \pm 0,02) \cdot 10^{-2}$	$(0,267 \pm 0,014) \cdot 10^{-2}$	$(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^2$	$(1,4 \pm 0,3) \cdot 10^2$

Из значений активности можно получить значения выхода нейтронов из источника. Для вычисления значения выхода нейтронов из мишени генератора необходимо сделать предположение о том, что нам известна наиболее вероятная энергия регистрируемых нейтронов. С учетом значения ускоряющего напряжения, установленного на генераторе нейтронов в ходе проведения эксперимента по облучению образца, можно считать, что наиболее вероятная энергия нейтронов, вылетающих из мишени, составляла величину порядка 14 МэВ. Отметим, что в этом случае разброс возможных значений сечения упомянутой реакции составляет от 450 до 500 мбарн. В таблице 2 приведена сводка результатов по определению значения выхода нейтронов из мишени ИНГ-07Т с помощью различных активационных детекторов с учетом погрешностей. Основной вклад в погрешность величины выхода нейтронов, которая вычислялась по формуле (9), вносят следующие параметры (в скобках ука-

зан относительный вклад каждого параметра в итоговую относительную погрешность):

- значение сечения рассматриваемой реакции для нейтронов данной энергии (~ 50%);
- геометрический фактор «источник нейтронов – активационный детектор» (~ 20%);
- число отсчетов в пике полного поглощения гамма-линии изотопа, образовавшегося под воздействием нейтронов в рассматриваемом активационном детекторе (~ 15%);
- эффективность регистрации рассматриваемой линии гамма-излучения (~ 15%).

Остальные величины имеют малые погрешности, так как являются либо табличными, либо измеренными с хорошей точностью в ходе эксперимента (период полураспада, молярная масса, содержание изотопа в образце, размеры образца и т.д.).

Таблица 2

Результаты измерения значения выхода нейтронов

Детектор	Реакция	Выход экспериментальный, н/с	Выход по показаниям программы, н/с
Cu	$^{63}\text{Cu} (n, 2n) ^{62}\text{Cu}$	$(1,45 \pm 0,15) \cdot 10^8$	1,5 · 10 ⁸
Al	$^{27}\text{Al} (n, p) ^{27}\text{Mg}$	$(1,33 \pm 0,13) \cdot 10^8$	

Считаем важным еще раз отметить, что полученные результаты получились близки друг к другу и к данным программы управления ИНГ только благодаря предположению о энергетическом спектре на выходе из генератора. В случае, если неизвестно хотя бы ориентировочное распределение нейтронов по энергии в точке их регистрации, то в качестве значения сечения придется брать некоторую усредненную величину, что приведет к разбросу значений выхода нейтронов из мишени в десятки и сотни процентов.

Анализ полученных результатов показывает хорошую согласованность расчетных и экспериментальных данных, что подтверждает правомерность использования Geant4 для расчета геометрических факторов в задачах определения активности образцов со сложной геометрией (отличной от точечной). К основным источникам формирования ошибки при вычислении наведенной активности в эксперименте или с помощью Geant4 можно отнести неточность информации о геометрии эксперимента, а также оцененных ядерно-физических данных, которые использует при вычислении Geant4.

Благодарность

Авторы выражают благодарность ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» за предоставленную возможность проведения экспериментов с портативным нейтронным генератором ИНГ-07Т.

Литература

1. Андрухович С.К., Марцынкевич Б.А., Хильманович А.М. Использование короткоживущих радионуклидов для восстановления в режиме реального времени спектра нейтронов ядерно-физических установок // Вестник Национальной академии наук Белоруссии. – 2010. – №3. – С. 110-118.
2. Jungmin Jo. Initial result of neutron energy spectrum reconstruction using multi-foil activation method in KSTAR. // Fusion Engineering and Design. – 2018. – No. 136. – PP. 793-796. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.04.010 .
3. Uddin M.S., Zulquarnain M.A., Qaim S.M. Fast neutron spectrum unfolding of a TRIGA Mark

II reactor and measurement of spectrum-averaged cross sections. // *Radiochimica Acta*. – 2013. – No. 101. – PP. 613-620. DOI: 10.1524/ract.2013.2073 .

4. *Pierre C., Gilles G., Guillaume Rousseau, Xavier Jacquet, Nicolas Authier*. Characterization of the CALIBAN Critical Assembly Neutron Spectra using Several Adjustment Methods Based on Activation Foils Measurement. // *EPJ Web of Conferences*. – 2016. – No. 106. – PP. 1-8. DOI: 10.1051/epjconf/201610607005 .

5. *Noba C.R.* Neutron spectrum unfolding for the development of a novel neutron detector for fusion. // *Fusion Engineering and Design*. – 2019. – No. 146. – PP. 2658-2662. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.04.074 .

6. *Medkour Ishak-Boushaki G.* Fast neutron spectrometry using thick threshold detectors. // *EPJ Web of Conferences*. – 2012. – No. 24. – PP. 1-9. DOI: 10.1051/epjconf/20122407009 .

7. *Lebaron-Jacobs Laurence, Gaillard-Lecanu E., Briot F.* Dosimetric management during a criticality accident. // *Nuclear Technology*. – 2008. – No. 161. – PP. 27-34.

8. *Vagena E.* Thick-foils activation technique for neutron spectrum unfolding with the MINUIT routine – Comparison with GEANT4 simulations. // *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*. – 2018. – No. 887. – PP. 64-69. DOI: 10.1016/j.nima.2018.01.025 .

9. Нейтронные генераторы для элементного анализа веществ и материалов. Электронный ресурс: http://www.vniia.ru/production/incl/prospekt_element.pdf (дата обращения 15.01.2020).

10. *Allison J. (Geant4 Collaboration) et al.* Recent developments in Geant4. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2016. – No. 835. – PP. 186-225. DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125 .

11. *Бушуев А.В., Кожин А.Ф., Алеева Т.Б.* Практическая спектрометрия ядерных излучений. Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2016. – 260 с.

Поступила в редакцию 20.01.2020 г.

Рекомендована к публикации оргкомитетом
XV Международной молодежной научно-практической конференции
«Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2019»

Авторы

Ибрагимов Ренат Фаридович, ассистент

E-mail: ribragimov@mephi.ru

Кокорев Яков Александрович, инженер

E-mail: yakokorev@mephi.ru

Денисенко Анастасия Павловна, магистр

E-mail: ardenistnko@mephi.ru

Рябева Елена Васильевна, доцент, кандидат физико-математических наук

E-mail: evryabeva@mephi.ru

Самосадный Валерий Трофимович, профессор, доктор технических наук

E-mail: vpsamosadny@mephi.ru

Хаснауи Хамза, аспирант

E-mail: hhasnaoui@mephi.ru

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE INDUCED ACTIVITY IN ACTIVATION DETECTORS OF A COMPLEX GEOMETRIC SHAPE

Ibragimov R.F., Kokorev Ya.A., Denisenko A.P., Ryabeva E.V., Samosadny V.T., Hasnaoui H.

National Research Nuclear University MEPHI
31 Kashirskoe shosse, 115409 Moscow, Russia

ABSTRACT

The paper presents the results of experimental determination of the induced activity in copper-/aluminum-based activation detectors when irradiated with neutrons with energy of about 14 MeV. The activation detectors were square-shaped metal plates with a thickness from 1.0 to 1.5 mm and a side size about 5.0 cm. Such samples require a specific method for measuring the induced activity, which will take into account large sizes of the plate relate to the size of gamma-detector or neutron source. The detectors described in this work can be used to study low-intensity neutron fluxes (with a flux density of up to 10^6 n/cm²·s). It is shown that, when working with such detectors, the usual methods for calculating the induced activity in thin activation detectors are applicable, with corrections that take into account the emerging features of the “neutron source – activation detector” and “activation detector – secondary radiation detector” geometries. The effects of absorption of primary and secondary radiation by the detector substance are also revealed.

The Geant4 tools were used to calculate the geometric factors and theoretical induced activity value. The study confirms the applicability of such activation detectors for solving the problem of determining the yield of neutrons with energy of about 14 MeV from a neutron generator target. The results of the experiments coincide, within the margin of error, with the results of simulations performed using the Geant4 tools.

Key words: activation detectors, neutron radiation, induced activity, mathematical simulation, Geant4, geometric factor.

REFERENCES

1. Andrukhovich S.K., Marcinkevich B.A., Hilmanovich A.M. The use of short-lived radionuclides for real-time reconstruction of the neutron spectrum of nuclear physics facilities *Vestnik Nacionalnoy Akademii Nauk Belorussii*. 2010, no. 3, pp. 110-118 (in Russian).
2. Jungmin Jo. Initial result of neutron energy spectrum reconstruction using multi-foil activation method in KSTAR. *Fusion Engineering and Design*. 2018, no. 136, pp. 793–796. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.04.010 .
3. Uddin M.S., Zulquarnain M.A., Qaim S.M. Fast neutron spectrum unfolding of a TRIGA Mark II reactor and measurement of spectrum-averaged cross sections. *Radiochimica Acta*. 2013, no. 101, pp. 613-620. DOI: 10.1524/ract.2013.2073 .
4. Pierre C., Gilles G., Guillaume Rousseau, Xavier Jacquet, Nicolas Authier. Characterization of the CALIBAN Critical Assembly Neutron Spectra using Several Adjustment Methods Based on Activation Foils Measurement *EPJ Web of Conferences*. 2016, no. 106, pp 1-8. DOI: 10.1051/epjconf/201610607005 .
5. Noba C.R. Neutron spectrum unfolding for the development of a novel neutron detector for fusion. *Fusion Engineering and Design*. 2019, no. 146, pp. 2658-2662. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.04.074 .
6. Medkour Ishak-Boushaki G. et al. Fast neutron spectrometry using thick threshold detectors. *EPJ Web of Conferences*. 2012, no. 24, pp. 1-9. DOI: 10.1051/epjconf/

20122407009.

7. Lebaron-Jacobs Laurence, Gaillard-Lecanu E., Briot F. Dosimetric management during a criticality accident. *Nuclear Technology*. 2008, no. 161, pp. 27-34.

8. Vagena E. Thick-foils activation technique for neutron spectrum unfolding with the MINUIT routine – Comparison with GEANT4 simulations. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*. 2018, no. 887, pp. 64-69. DOI: 10.1016/j.nima.2018.01.025

9. Neutron generators for elemental analysis of substances and materials. Available at: http://www.vniia.ru/production/incl/prospekt_element.pdf (accessed Jan 15, 2020).

10. Allison J. (Geant4 Collaboration) et al. Recent developments in Geant4 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2016, no. 835, pp. 186-225. DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125.

11. Bushuev A.V., Kozshin A.F., Aleeva T.B. *Practical spectrometry of nuclear radiation. Tutorial*. Moscow. NRNU MEPhI Publ., 2016. 260 p. (in Russian).

Authors

Ibragimov Renat Faridovich, Assistant,

E-mail: rbragimov@mephi.ru

Kokorev Yakov Aleksandrovich, Engineer

E-mail: yakokorev@mephi.ru

Denisenko Anastasiya Pavlovna, Master Student

E-mail: apdenistnko@mephi.ru

Ryabeva Elena Vasilevna, Assistant Professor, Cand. Sci (Phys.-Math.)

E-mail: evryabeva@mephi.ru

Samosadny Valery Trofimovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: vpsamosadny@mephi.ru

Hasnaoui Hamza, PhD Student

E-mail: hhasnaoui@mephi.ru