

УДК 621.039.574.3+921.039

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ЭНЕРГИИ ГАММА-КВАНТОВ ВЫШЕ 6 МэВ

С.А. Каленик, В.И. Касилов, В.В. Кириченко, К.С. Кохнюк, Л.А. Махненко, В.И. Нога,
П.М. Рябка, А.А. Хомич

ИФВЭЯФ ННЦ ХФТИ

ул. Академическая 1, г. Харьков 61108 Украина, kalesha@kipt.kharkov.ua

Поступила в редакцию 29 февраля 2004г.

Пучки γ -квантов с энергией больше 6 МэВ (выше порога фотоделения урана) необходимы для реализации фотонного метода диагностики радиоактивных отходов. Их получение на линейных ускорителях электронов связано с использованием фотонных конверторов. Процесс конвертирования электронного пучка в фотонный хорошо описывается формулами Шиффа, но в случае с толстыми мишенями они не применимы. Для исследования углового распределения тормозных фотонов из толстой мишени в основном используется трудоёмкий метод наведенной активности. Предлагаемая методика измерения углового распределения тормозного излучения позволяет измерять угловое распределение γ -квантов с энергией больше 6 МэВ. Для реализации предлагаемого метода измерения углового распределения гамма-квантов на выходе ускорителя электронов ЛУЭ-300 был поставлен эксперимент. Аналогичный эксперимент моделировали с помощью разработанного в CERN программного пакета GEANT. Получено удовлетворительное согласие результатов математического моделирования и физического эксперимента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: делящиеся материалы, тормозное излучение, угловое распределение, эксперимент, диагностика, математическое моделирование, конвертор.

Пучки γ -квантов широко применяются в научных исследованиях и прикладных задачах в различных областях народного хозяйства. Их получение на линейных ускорителях электронов (ЛУЭ) связано с использованием фотонных конверторов (радиаторов). Процесс конвертирования электронного пучка в фотонный для тонкого радиатора ($\leq 0,1$ рад.длины) хорошо описывается формулами Шиффа. Однако с целью повышения интенсивности потока фотонов, часто используются в качестве радиаторов толстые (~ 1 рад. длины) мишени из тяжелого материала. В таких условиях становятся существенными нерадикационные потери энергии электронами, такие как ионизация, многократное рассеяние электронов. Идет процесс многократного излучения фотонов одним электроном, поглощение фотонов в радиаторе. Естественно, в таких случаях аналитические выражения Шиффа для описания спектра тормозных фотонов не могут быть применены. Поэтому в настоящее время популярны и широко используются расчеты спектров тормозного излучения с помощью Монте-Карло (МК) программ, которые обеспечивают решения задач практически любой сложности. Наиболее известные из МК программ – EGS, GEANT нескольких версий. Компьютерное моделирование с помощью этих программ позволяет получить спектральное и угловое распределение γ -квантов, вылетающих из радиаторов различных толщин и изотопного состава.

Для экспериментального исследования углового распределения тормозных фотонов с $E > 6$ МэВ из толстой мишени, в основном, используется трудоёмкий метод наведенной активности [1]. Применяемые для этих целей фотоядерные реакции, как правило, имеют довольно высокие (несколько МэВ) пороги активации, поэтому практически исследуется только высокоэнергетическая часть спектра.

В ННЦ ХФТИ разрабатывается комплексная программа по неразрушающему активационному анализу радиоактивных отходов на содержание в них делящегося материала [2-4]. Поскольку исследуемые образцы могут быть больших размеров, для активации используются глубоко проникающие в вещество потоки нейтронов, γ -квантов. Работы ведутся на пучках, полученных на линейном ускорителе электронов испытательного стенда ЛУЭ-300.

В работах [5-6] показано, что при определении содержания ^{238}U и ^{235}U в радиоактивных отходах использование процессов нейтронно-ядерного деления и фотоделения при одинаковых режимах работы ускорителя приводит к примерно одинаковым результатам по величине чувствительности анализа. Но поскольку измеряемой величиной в обоих случаях является выход нейтронов деления трансурановых элементов, то при работе с пучком фотонов уровень фона при измерениях несколько ниже, чем при облучении нейтронами. В связи с этим планируются эксперименты на пучках γ -квантов, для которых знание энергетических спектров и угловых распределений тормозного излучения является важной задачей [7]. Основная цель данной работы – разработка методики измерения интенсивности и угловых распределений пучка γ -квантов из толстого радиатора, проведение измерений и сопоставление данных с результатами, полученными методом компьютерного моделирования. Такие исследования нужны для выбора оптимальных условий проведения анализа.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

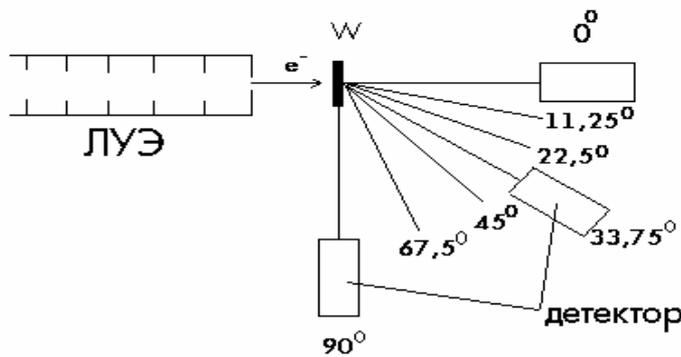


Рис.1. Схема эксперимента

Схема эксперимента показана на рис.1. Пучок электронов от ЛУЭ-300 с энергией $E_e=10$ и 13 МэВ, средним током 20 мкА и частотой 50 Гц направляется на вольфрамовую мишень толщиной 1 мм. Датчиком интенсивности пучка γ -квантов служил нейтронный детектор, который регистрировал запаздывающие нейтроны от реакции фотоделения ^{238}U . Детектор нейтронов располагался на расстоянии 1 м от тормозной мишени и поворачивался на необходимый угол относительно оси электронного пучка. Образец урана диаметром 10 мм размещался внутри

конструкции детектора с защитой от внешнего фона нейтронов, как показано на рис.2.

В опыте использовался счетчик нейтронов СНМ-11 с твердым покрытием — бором, обогащенным изотопом ^{10}B . Измерения проводились между импульсами ускорителя (продолжительность импульса $1,5$ мкс, период 20 мс.) с задержкой по отношению к концу токового импульса на 10 мс, что соответствовало оптимальному соотношению эффект-фон при измерениях.

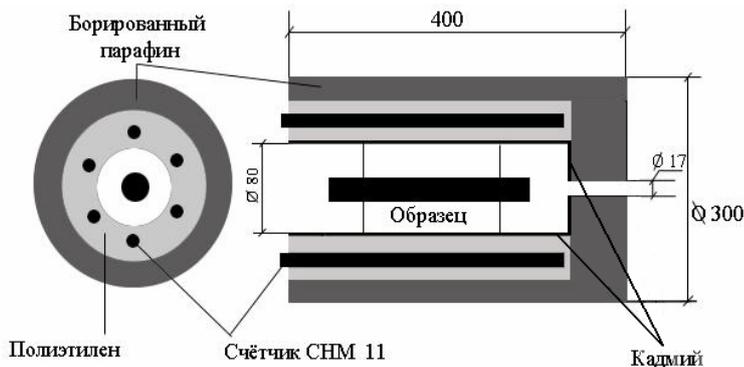


Рис.2. Нейтронный детектор

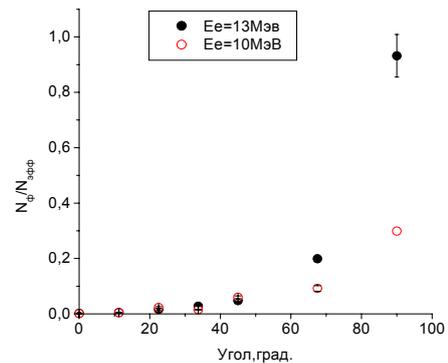


Рис.3. Соотношение фон-эффект в зависимости от положения детектора.

Так как порог фотоделения урана равен 6 МэВ, то детектор регистрировал запаздывающие нейтроны от деления урана, вызванного фотонами с энергией гамма-квантов более 6 МэВ. Поток электронов из вольфрама толщиной 1 мм на образец урана примерно на порядок меньше нежели поток фотонов, а с учётом сечения деления урана электронами, эффект от электронов будет незначительным. Количество нейтронов образующихся в вольфраме толщиной 1 мм на несколько порядков меньше, нежели фотонов, и образовавшиеся нейтроны имеют квазиизотропное распределение (в отличие от ярко выраженного направления вперёд у фотонов и электронов) и, следовательно, на мишень их попадёт незначительное количество. К тому же энергия у большей части образовавшихся нейтронов будет ниже порога деления урана. Поэтому эффект от попадания нейтронов на образец мы также можем не учитывать.

При проведении эксперимента в каждом из положений детектора проводились фоновые измерения, которые регистрировали отсчёты детектора при отсутствии в нем образца урана. Время измерения «фон» и «эффект+фон» в зависимости от статистики находилось в пределах $1,5$ - 41 мин.

На рис.3 показано соотношение фон-эффект в зависимости от угла регистрации фотонов. Под большими углами соотношение увеличивается в основном за счет уменьшения интенсивности потока фотонов.

РАССЧЁТЫ ПО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Расчеты спектра тормозных фотонов из толстой мишени проводились с использованием МК пакета программ GEANT3.21. Эти программы позволяют учесть все электронные, позитронные и фотонные взаимодействия в диапазоне энергий от 10 кэВ до 10 ТэВ. Экспериментальное оборудование при моделировании может быть представлено в различных базовых геометриях и содержать разные материалы. При расчетах заданная геометрия и оборудование воспроизводили условия выполняемого на ЛУЭ эксперимента. Они

включали выходное вакуумное окно ускорителя из титана толщиной 50 мкм, путь электронного пучка по воздуху 5 см, радиатор из вольфрама толщиной 1 мм. Соответственно экспериментальным данным предполагалось, что пучок на радиаторе имеет гауссово распределение с дисперсией 0,3см.

Расчеты проводились для энергий электронов 10 и 13 МэВ. В зависимости от угла измерения через установку проводилось от 10^6 до 10^7 электронов. Максимальная продолжительность расчётов была зафиксирована под углом 90° и равна 20 часам.

На рис. 4а и 4б представлены расчетные спектры $\Phi(E_\gamma)$ тормозных γ -квантов под различными углами наблюдения при использовании 1мм вольфрамового конвертора и энергии инжектируемых электронов $E_e=10$ МэВ и $E_e=13$ МэВ соответственно.

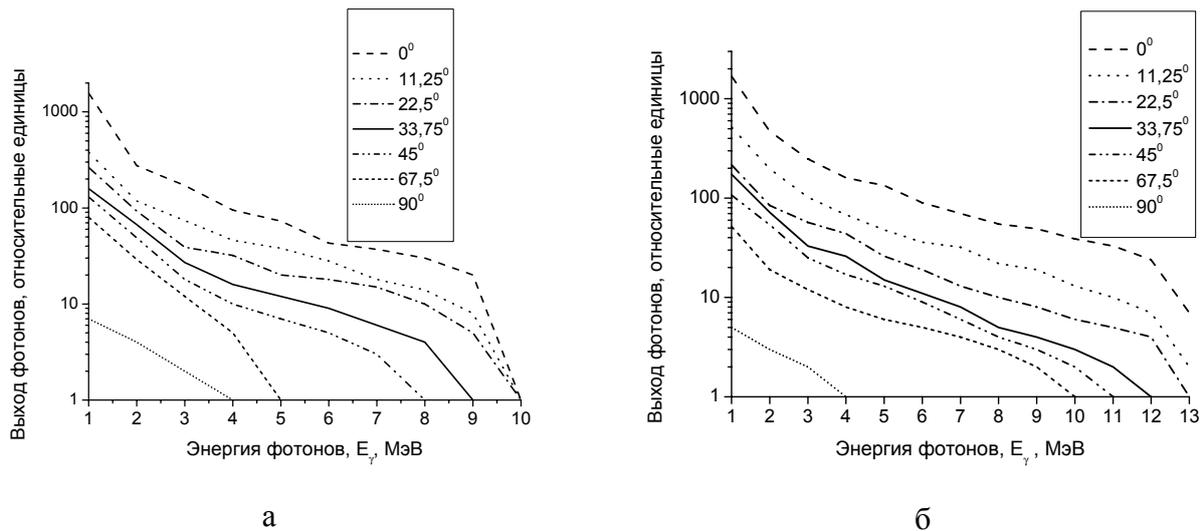


Рис.4. Спектры тормозных γ -квантов под различными углами наблюдения. Конвертор – вольфрам 1мм. а) $E_e=10$ МэВ, б) $E_e=13$ МэВ.

С целью сравнения модельных результатов с экспериментальными данными по формуле (1) был вычислен (в относительных единицах) интегральный выход нейтронов из образца урана в детекторе, т.е. моделированы показания детектора в экспериментальных условиях:

$$G_n(\theta) \approx \int_{E_{\text{пор}}}^{E_{\text{max}}} \sigma_f(E_\gamma) \Phi_\gamma(E, \theta) dE_\gamma, \quad (1)$$

где $\sigma_f(E_\gamma)$ – сечение реакции деления (γ, f) γ -квантами ядра урана; $\Phi_\gamma(E_\gamma, \theta)$ – полученный спектр фотонов; $E_{\text{пор}}$ – пороговая энергия реакции; E_{max} – энергия верхней границы тормозного излучения; E_γ – энергия фотонов тормозного излучения.

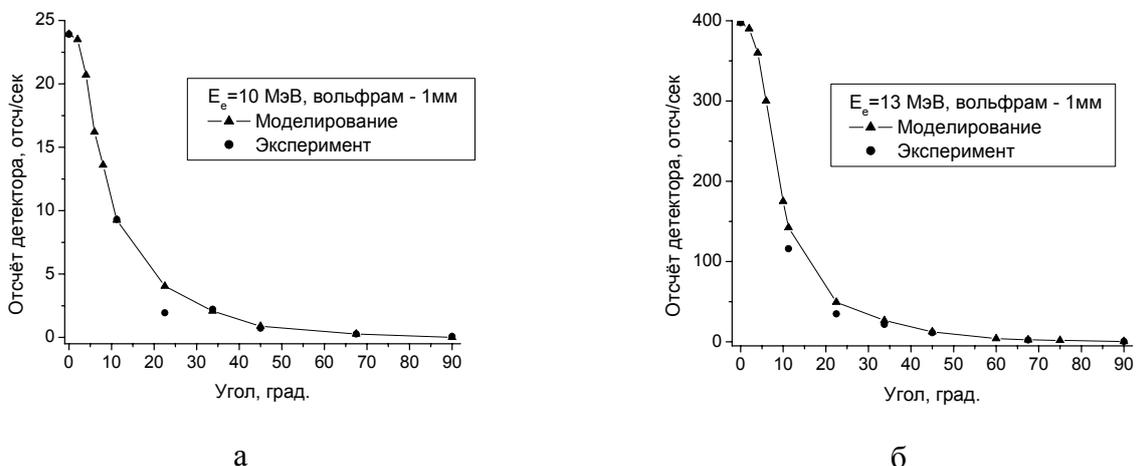


Рис.5. Количество счётов детектора нейтронов в зависимости от углового расположения детектора. а) $E_e=10$ МэВ. б) $E_e=13$ МэВ

В экспериментах получены значения выхода нейтронов фотоделения, который, как указывалось выше, пропорционален потоку тормозного излучения, падающего на образец урана. Эти данные в относительных единицах (отсчеты детектора) построены на рис. 5а и 5б, соответственно, для энергий электронов 10 и 13 МэВ.

Результаты расчетов по формуле (1) нормированы на максимальный выход фотонов (под углом 0°) полученных экспериментальным путём и показаны на тех же рисунках. Как видно из рисунков, наблюдается удовлетворительное согласие хода угловой зависимости расчетных и экспериментальных кривых. Это вселяет уверенность в правильности методологического подхода к решению поставленной задачи. В последующем развитии метода будет осуществлена абсолютная калибровка интенсивности и углового распределения спектра тормозного излучения из толстой мишени в более широком диапазоне энергий и толщин радиатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из вышеизложенного, предлагаемая авторами методика позволяет надёжно и при относительно небольших затратах времени проводить измерения угловых распределений тормозных γ -квантов, что является важным моментом при разработке промышленной установки на базе линейного ускорителя электронов. Результаты моделирования с помощью пакета GEANT показали удовлетворительное согласие расчетов с экспериментальными данными.

В заключение авторы выражают благодарность А.Ю. Буки за плодотворное обсуждение материалов настоящей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абибуллаев Н.А., Салихбаев У.С. Энергетические спектры и угловое распределение тормозного излучения, испускаемого 13МэВ электронами в толстой вольфрамовой мишени. //Известия Академии Наук Узбекистана. -1997. -Т.61, №11. -С.2258-2261.
2. Буки А.Ю., Касилов В.И., Кириченко В.В., Кохнюк К.С., Лапин Н.И., Нога В.И. Разработка промышленной методики определения концентрации делящихся материалов на базе линейного ускорителя электронов. //Атомная энергетика и промышленность Украины. -2000. -№ 2. -С. 24–25.
3. Касилов В.И., Кириченко В.В., Махненко Л.А., Нога В.И., Иванов Г.М., Кохнюк К.С., Рябка П.М., Хомич А.А. О возможности определения ^{238}U с помощью линейного ускорителя электронов методом регистрации нейтронов деления. //Атомная энергетика и промышленность Украины. -2000. -№ 3–4. -С.50–51.
4. Kasilov V.I., Kirichenko V.V., Kokhnyk K.S., Noga V.I. Determination of the ^{238}U concentration in concrete samples by registration of fission neutrons. //Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigation», Kharkov, NSC KIPT. - 2001. -№1. -P.84–85.
5. Слабоспицкий Р.П., Кочетов С.С., Кириченко В.В. Система экспрессной сортировки РАО с использованием ЛУЭ (линейного ускорителя электронов). Препринт, ХФТИ 2002-1, 18с.
6. Кочетов С.С., Слабоспицкий Р.П., Кириченко В.В. Использование линейного ускорителя электронов для определения делящихся материалов в радиоактивных отходах. //Вісник Харківського університету. Серія фізична „Ядра, частинки, поля”. -2002, випуск 4(20), №574. -С.71-79.
7. Каленик С.А., Кириченко В.В. Распределение интенсивности гамма-квантов внутри контейнера с радиоактивными отходами. //Вісник Харківського університету. Серія фізична „Ядра, частинки, поля”. -2003, випуск 1(21), №585. -С.113-116.

THE MEASUREMENT METHOD OF ANGULAR DISTRIBUTION OF ELECTRON BREMSSTRAHLUNG AT GAMMA QUANTUM ENERGY ABOVE 6 MEV

S.A. Kalenik, V.I. Kasilov, V.V. Kirichenko, K.S. Kokhnyuk, L.A. Makhnenko, V.I. Noga, P.M. Rjabka, A.A. Khomich

IHEPNP, National Science Centre of Physics and Technology,
Akademicheskaya str.1, Kharkov, Ukraine, 61108, kalesha@kipt.kharkov.ua

Beams of γ -quantums with energy above 6 MeV (higher than a threshold of uranium photofission) are necessary for realization radioactive waste diagnostics by the photon method. For their reception on linacs of electrons it is necessary use of photon converters Bremsstrahlung is well described by Shiff formulas, but in a case with thick targets they are not applicable. The measurement method of angular distribution of bremsstrahlung submitted in this paper allows to measure angular distribution of γ -quantums with energy above 6МэВ. The experiment for realization of measurement method with use LINAC-300 is carried out. Similar experiment with help GEANT 3.21 has been simulated. Results of mathematical simulation and physical experiment are well coincide.

KEY WORDS: fissionable materials, bremsstrahlung, angular distribution, experiment, diagnostics, simulation, converter.