

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ В БАГАЖЕ ПАССАЖИРОВ АЭРОПОРТОВ В УСТАНОВКАХ С ИМПУЛЬСНЫМИ НЕЙТРОННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ И ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ДАННЫХ

В.Л. Ромоданов, И.В. Мухамадьяров, А.Г. Белевитин,

В.В. Афанасьев, В.К. Сахаров, Д.Н. Черникова

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет),
г. Москва*



При создании таможенных установок обнаружения делящихся материалов (ДМ) в багаже одной из основных является проблема их выявления в случаях, когда они сознательно скрываются какими-либо экранами, поглощающими зондирующие излучения. В установках с импульсными нейтронными источниками практически невозможно скрыть ДМ с помощью свинцовых экранов, однако, если в таких устройствах используются тепловые нейтроны, то это возможно сделать с помощью экранов, имеющих большое сечение поглощения тепловых нейтронов, например, кадмиевых. В качестве обоснования возможности создания установки таможенного контроля ДМ приводятся экспериментальные результаты выполнения проектов МНТИЦ №596 и №2978 по обнаружению ^{235}U в модели с графитовым замедлителем нейтронов и цифровым разделением нейтронов и фотонов в PSD-сцинтилляторах. Модель представляет собой графитовый параллелепипед размером $1300 \times 1300 \times 1200$ мм с внутренней полостью $500 \times 500 \times 1200$ мм. Внутри полости находится инспектируемый образец ДМ и сцинтилляционная измерительная система с кристаллом стильбена. Анализ результатов экспериментов показал, что возможно обнаружение урана, скрытого кадмиевым экраном, за счет деления ^{235}U нейтронами с энергией выше энергии резонанса в сечении поглощения кадмия. Эти нейтроны присутствуют в графитовой модели в интервале до ~ 150 мкс после импульса нейтронов источника. Было показано, что при соответствующем выборе энергетического порога детектирования отклика ДМ можно получить практически нулевой фон фотонов, что определяет высокую чувствительность установки. При этом разделение нейтронов и фотонов во временных зависимостях возможно при нагрузках сцинтилляционного тракта до $7 \cdot 10^5$ част./с, что недоступно для стандартных аналоговых спектрометрических блоков. Анализ результатов эксперимента показывает, что для обнаружения ~ 10 граммов ^{235}U в кадмиевом экране достаточно 5–7 с при выходе нейтронов импульсного источника DD реакции на уровне $\sim 10^7$ – $2 \cdot 10^7$ нейтр/с.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с возможными случаями нарушения международной договоренности о нераспространении ядерных материалов и, как следствие этого, возможными актами ядерного терроризма назрела необходимость в создании устройств обнаружения и контроля радиоактивных и ДМ в ключевых точках их производства, хранения и переработки, а также при транспортировке через таможенные пункты государственных границ. В случае организации террористических актов с использованием радиоактивных и ДМ их последствия могут быть крайне тяжелыми, т.к. кроме человеческих жертв может произойти длительное заражение местности. При создании террористами «грязной» атомной бомбы (например, с распылением различных радиоактивных и делящихся нуклидов) в результате взрыва могут быть загрязнены обширные территории, что потребует огромных средств для реабилитации среды обитания (особенно при взрыве в городских условиях). Наибольшую опасность представляет незаконное распространение ^{235}U и ^{239}Pu , т.к. эти материалы являются основными компонентами ядерного оружия. Поэтому разработка новых методов и устройств обнаружения ДМ в багаже пассажиров в аэропортах, морских портах и т.д. актуальна и соответствует реалиям современного мира.

В настоящее время имеются разработки установок для обнаружения и контроля ДМ в условиях таможенных пунктов [1–3]. Использование тепловых нейтронов в таких устройствах решает задачу обнаружения ДМ, скрытых свинцовыми экранами, однако экраны с большим сечением поглощения тепловых нейтронов, например, кадмиевые, полностью скрывают присутствие ДМ в inspected объекте. Поэтому в проектах МНТЦ №596 и №2978 были разработаны физический метод и модель таможенной установки с графитовым замедлителем и импульсным источником нейтронов, в которой невозможно скрыть ДМ материалами, поглощающими фотоны и тепловые нейтроны, например, свинцовыми или кадмиевыми экранами.

ФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ В ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМАХ БЕЗ ИХ ВСКРЫТИЯ

Сущность работы установки обнаружения ДМ базируется на методе спектрометрии по времени замедления нейтронов от импульсного источника в тяжелых замедлителях [4]. При этом в различное время после импульса нейтронов источника в установке присутствуют замедляющиеся нейтроны разных энергий, что практически не дает возможности скрыть ДМ экранами, поглощающими тепловые нейтроны. Регистрация нейтронных откликов быстрых нейтронов деления дает безальтернативный признак присутствия ДМ в inspected образце. Это объясняется тем, что спустя некоторое время после импульса нейтронов источника в экспериментальной установке при отсутствии ДМ фактически нет физических процессов, приводящих к появлению быстрых нейтронов. Из результатов работы [5] следует, что существует временная область вплоть до ~150 мкс после импульса быстрых нейтронов источника, когда в графитовом замедлителе присутствуют замедляющиеся нейтроны с энергией, выше энергии резонанса в сечении поглощения кадмия.

Детектирование нейтронов деления с помощью гелиевых счетчиков быстрых нейтронов нерационально, т.к. они имеют низкие эффективность и быстродействие, в то время как органические сцинтилляторы могут с высокой эффективностью детектировать как нейтроны, так и фотоны, которые возникают в процессе

деления и на любых материалах багажа в реакции радиационного захвата. Поэтому использование сцинтилляторов с цифровым разделением нейтронов и фотонов по форме их откликов является необходимым элементом в установке, т.к. оно ведется при загрузках, не доступных для стандартных аналоговых типов спектрометров. Это объясняется экспоненциальными спадами временных зависимостей нейтронных и фотонных полей, создающих высокую и переменную загрузку электронных трактов в установках с импульсными источниками нейтронов. Запись амплитудно-временной последовательности откликов нейтронов и фотонов в память компьютера решает эту задачу, и поэтому использование цифровой обработки сцинтилляционных откликов нейтронов и фотонов практически снимает проблему мертвого времени и позволяет создавать унифицированные системы сбора данных, для которых становится ненужным использование временных анализаторов, схем совпадений со сдвиговыми регистрами, а также спектрометрических устройств. Это значительно уменьшает номенклатуру электронных блоков и позволяет использовать ранее не доступные для таких целей физические методы обнаружения и контроля ДМ.

Проведенные эксперименты показали, что разделение откликов нейтронов и фотонов в сцинтилляторе цифровым методом позволяет получать информацию об их потоках при загрузках до $7 \cdot 10^5$ част./с. В проведенных экспериментах была использована цифровая технология записи амплитудно-временной последовательности откликов всех нейтронных и фотонных импульсов, возникающих в стильбене от протонов отдачи и комптоновских электронов, в память компьютера с последующим их разделением с помощью специально созданных программ [6]. При этом возникают два канала получения информации о содержимом исследуемого объекта: нейтронный и фотонный. Таким образом, присутствие ДМ, скрытого поглощающим тепловые нейтроны материалом, можно обнаружить в багаже пассажиров по присутствию быстрых нейтронов деления во время 150 мкс после импульса нейтронов источника. Если ДМ скрывается только свинцом, то его можно обнаружить также во временном диапазоне до ~ 1500 мкс. При этом временной спад отклика ДМ, окруженного кадмиевым экраном, будет более крутой, нежели аналогичный временной спад отклика ДМ, скрытого свинцом, а также в тех случаях, когда он ничем не скрывается.

Подробное описание использованного метода цифрового разделения откликов нейтронов и фотонов деления дано в работе [7]. Такой подход дал возможность в настоящее время создать модели установок обнаружения ДМ, в которых невозможно скрывать ДМ с помощью экранов, поглощающих фотоны и тепловые нейтроны. На основе этих моделей предполагается создание прототипов таможенных установок и средств контроля состава ДМ в тепловыделяющих сборках ядерных реакторов, в которых будет использоваться цифровой процессор, позволяющий получать результаты контроля в режиме реального времени.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В УСТАНОВКАХ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ И ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

Для получения оцифрованного сигнала с детектора использовалась четырехканальная аналого-цифровая измерительная система с частотой дискретизации импульсов равной 100 МГц, разработанная фирмой «Инструментальные системы» (Москва). Программы обработки объединены в единый вычислительный комплекс и позволяют определять следующие характеристики смешанных нейтронных и фотонных полей:

- отдельные временные распределения откликов нейтронов и фотонов (аналог временного анализатора);
- отдельные амплитудные распределения откликов нейтронов и фотонов (аналог спектрометрических блоков);
- временные совпадения частиц при регистрации продуктов деления ДМ (аналог схем совпадений).

В качестве примера на рис. 1 показано разделение откликов нейтронов и фотонов в зависимости от загрузки сцинтилляционного тракта. На диаграммах каждый отклик представляется отдельной точкой. Параметр разделения определялся как площадь под сцинтилляционным откликом, нормированная на его амплитуду.

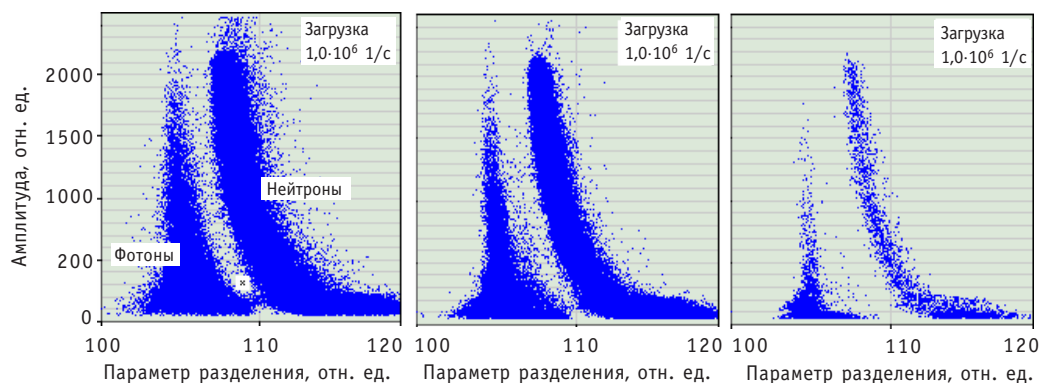


Рис. 1. Точечная диаграмма сцинтилляционных откликов нейтронов и фотонов: источник – генератор DT-нейтронов; детектор – кристалл стибьбена с размерами $\varnothing 40 \times 40$ мм; время измерения 1 с

ЭКСПЕРИМЕНТ

Модель таможенной установки обнаружения ДМ представляет собой графитовый параллелепипед с внешними размерами $1300 \times 1300 \times 1200$ мм, в котором имеется сквозная внутренняя полость с размерами $500 \times 500 \times 1200$ мм, имитирующая багажную камеру. Импульсный нейтронный генератор располагается в боковой стенке установки. Сцинтилляционный детектор – кристалл стибьбена размером $\varnothing 40 \times 40$ мм был установлен в центре камеры. Во время эксперимента в полость помещались различные исследуемые материалы и измерялись временные и амплитудные распределения откликов нейтронов и фотонов. Результаты эксперимента и расчета по программе MCNP-4c2 для временного распределения нейтронной составляющей представлены на рис. 2.

В экспериментах преследовали цель отработки физических методов измерения функционалов нейтронных и фотонных полей, которые могут дать информацию о минимальном количестве ДМ, обнаруживаемом в реальном устройстве. Результаты этих экспериментов позволяют сделать прогноз эффективности реальной установки и дать основу для оптимизации измерительной системы, включая количество детекторов, их размеры и расположение в установке. Для этой цели в модельной установке проводились эксперименты с образцом урана массой 8 г и обогащением по ^{235}U , равным 90%. В комплекс экспериментальных исследований были включены опыты, в которых образцы окружались кадмиевым, свинцовым и сложным композитным экраном, состоящим из свинца, кадмия и плексигласа. Включение плексигласа в композицию сложного экрана объясняется присутствием в нем водорода, эффективно замедляющего эпитепловые нейтроны, которые, снижая свою энергию, затем поглощаются кадмием и тем самым уменьшают число деле-

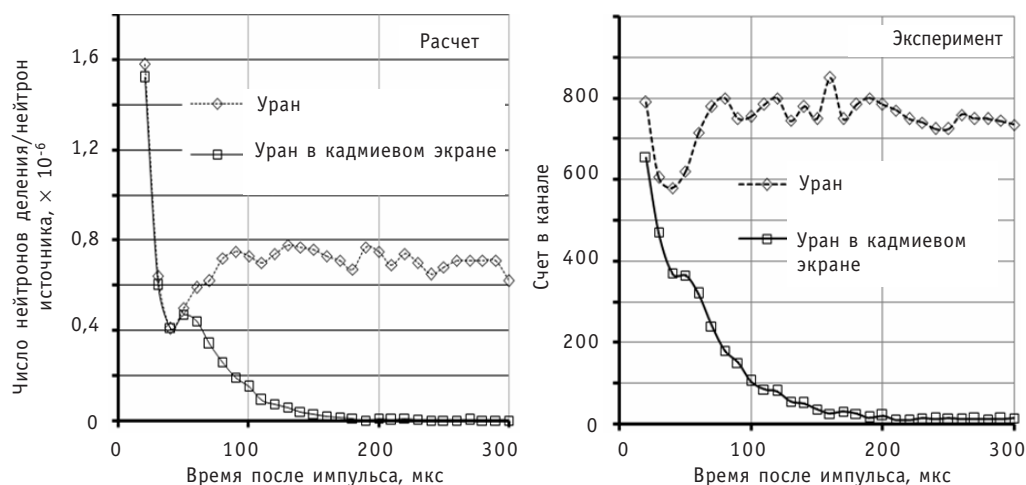


Рис. 2. Зависимость отклика нейтронов деления от времени после импульса нейтронов источника (масса ^{235}U 165 г)

ний урана на тепловых нейтронах. Толщина свинцового экрана составляла 50 мм, кадмиевого – 0,5 мм, плексигласа – 10 мм. Также были проведены эксперименты, в которых исследовались фоновые свойства модели и влияние различных матричных материалов и материалов, которые могут быть использованы в качестве поглотителей излучения (свинец, кадмий). В качестве матричных материалов использовалась вода в количестве 0,5 л, два образца железа с размерами 750×200×50 мм, а также листовой кадмий и свинец. Образцы располагались на расстоянии 60 мм от центра детектора на центральной оси измерительной полости.

В результате обработки экспериментальных данных в нейтронном канале были получены сцинтилляционные отклики деления уранового образца. Регистрация импульсов нейтронных откликов в отсутствие ДМ объясняется ухудшением качества разделения нейтронных и фотонных откликов при уменьшении их амплитуды и искажении формы фотонных откликов из-за их наложения (см. рис. 1). Экспериментальные результаты были обработаны при разных значениях порога регистрации и параметра формы отклика. С помощью параметра формы производилась программная отбраковка откликов, не удовлетворяющих заданному значению параметра.

На рис. 3 можно видеть, что при энергетическом пороге регистрации нейтронов ~600 кэВ получается практически нулевой фон от фотонов матричных материалов. Это позволяет сделать однозначный вывод о присутствии ДМ даже в том случае, если он скрыт не только кадмием, но и композитным экраном.

Анализ полученных распределений импульсов в нейтронном и фотонном каналах показывает, что фотонный канал также может дать независимую информацию о наличии ДМ в inspected объекте. Если энергетический порог сцинтилляционной системы ниже энергии гамма-квантов собственного излучения ДМ, то присутствие ДМ легко обнаруживается по присутствию постоянной составляющей во временном распределении фотонов. Любой радиоактивный источник также даст постоянную составляющую в фотонном канале. При этом измерение амплитудных распределений фотонов дает возможность определить спектральные характеристики излучения и сделать вывод об энергии излучения, а следовательно, и о типе источника. На рис. 4 показаны временные распределения откликов

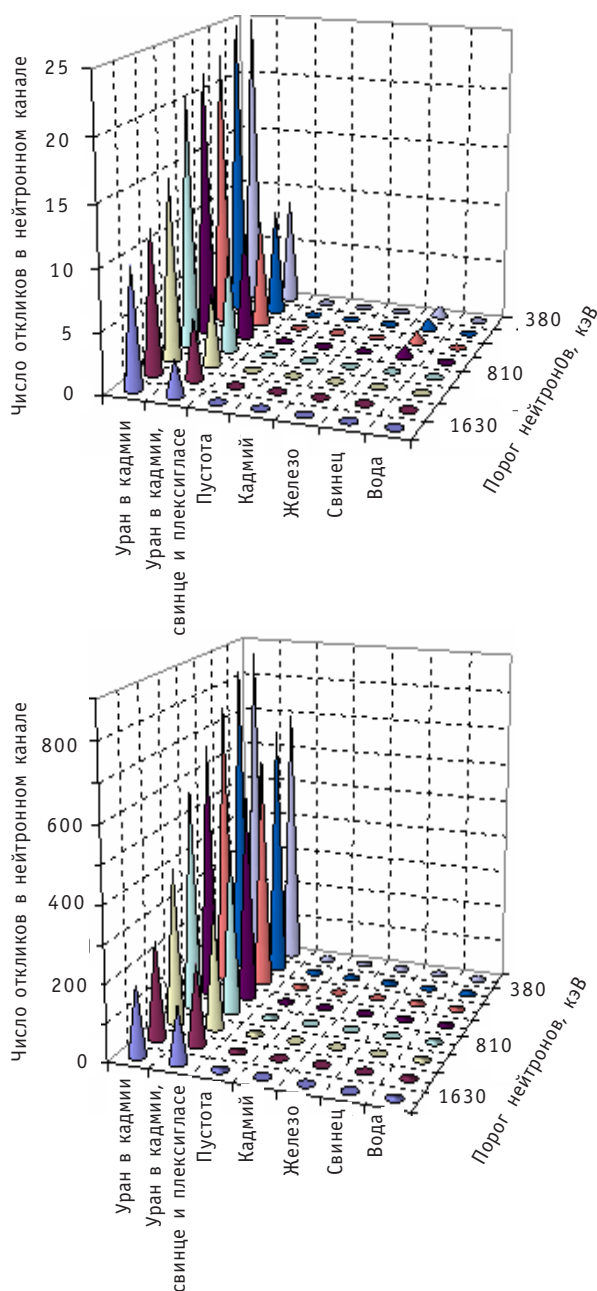


Рис. 3. Число нейтронных откликов в зависимости от порога регистрации для различных материалов, находящихся в измерительной полости установки

фотонов при различных энергетических порогах регистрации откликов нейтронов и фотонов при помещении в установку различных материалов.

Видно, что при пороге регистрации фотонов 125 кэВ наблюдается присутствие гамма-квантов урана ^{235}U с энергией 185,7 кэВ. Это свидетельствует о том, что установка может обнаруживать малые количества урана даже в пассивном режиме работы, в том случае, когда ДМ не скрывается свинцовыми экранами. При этом видно, что кадмиевый экран лишь в незначительной степени снижает отклик фотонов урана, в то время как свинцовый экран имеет на него сильное влияние. Обработка этих же результатов при более высоком пороге практически полностью уничтожает отклик фотонов, принадлежащий линии 185,7 кэВ ^{235}U . Поэтому можно сделать вывод о том, что если высокообогащенный уран малого количества скрывается свинцовым экраном, то отклик от него можно наблюдать только в нейтронном канале при активном режиме работы установки. Амплитудные распределения откликов фотонов, полученные в экспериментах, подтверждают проведенный анализ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты показали, что сочетание импульсного нейтронного источника с тяжелым замедлителем

нейтронов и цифровой технологией обработки сцинтилляционных сигналов дает возможность создавать установки обнаружения и контроля ДМ с уникальными свойствами, т.к. при этом появляется возможность измерения отдельных временных зависимостей нейтронов и фотонов и их амплитудных характеристик. Использование сцинтилляционных систем позволяет разделять нейтроны и фотоны и получать временные отклики ДМ в различных временных и энергетических диапа-

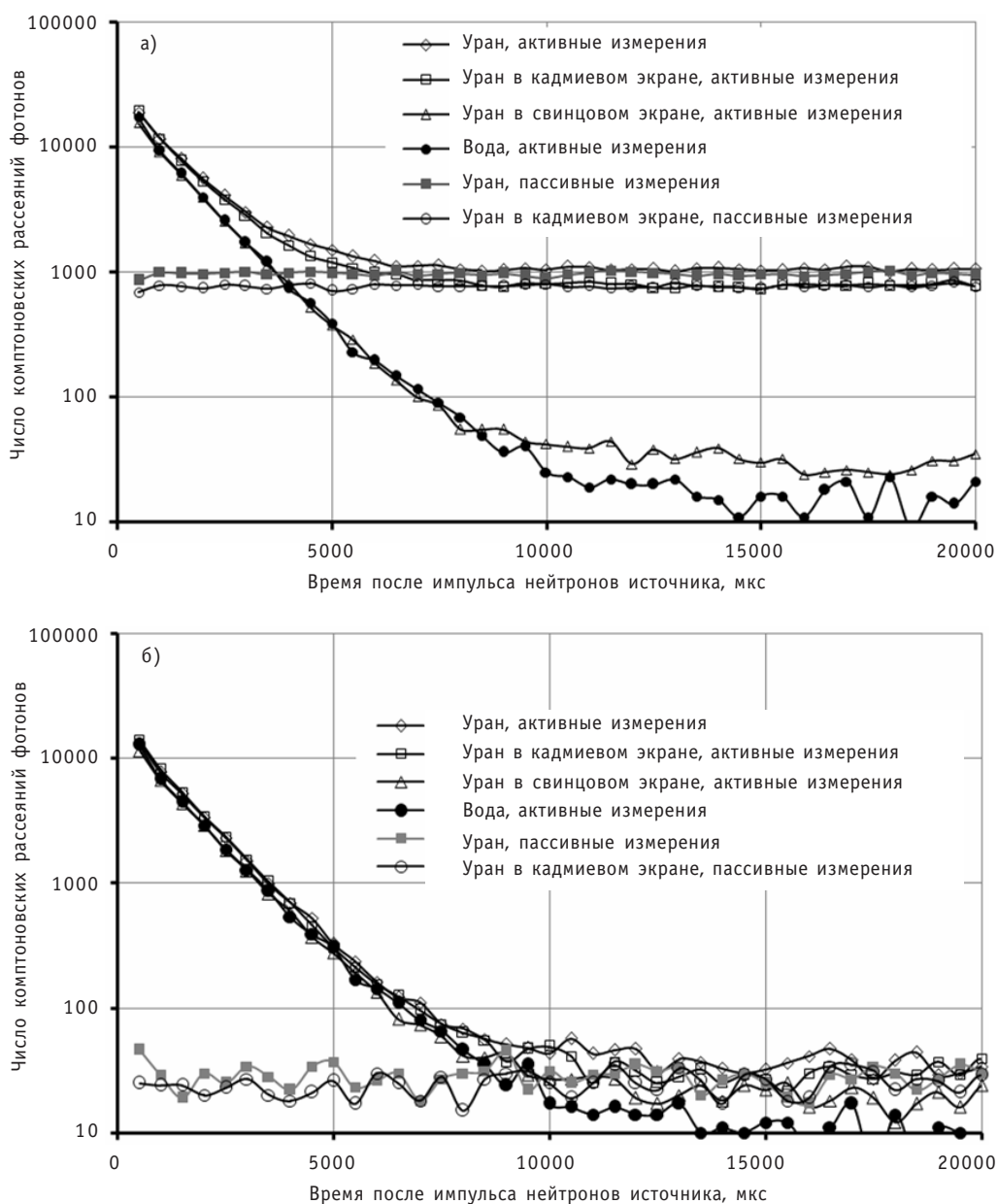


Рис. 4. Временные распределения фотонов при энергетических порогах по фотонам 125 кэВ (а) и 187 кэВ (б)

зонах, что открывает возможность использования в одной установке независимых физических методов их контроля и обнаружения, даже если они скрыты сложными композитными, поглощающими излучения, экранами. Получение высокого качества цифрового разделения нейтронов и фотонов при больших нагрузках электронного тракта позволяет измерять спектральные характеристики анализируемых излучений, что в значительной мере повышает методические возможности обнаружения различных опасных материалов (делящихся, взрывчатых и т.д.). Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности создания технологии получения временных и амплитудных раздельных откликов нейт-

ронов и фотонов от различных объектов, содержащих ДМ (например, ТВС ядерных реакторов, отходы ядерного производства и т.д.). Результаты экспериментов показывают реальную возможность создания полномасштабной таможенной установки для обнаружения ~5–10 г обогащенного урана в багаже за 5–7 с в условиях аэропортов. При эксплуатации установки не требуется специальный штат для обслуживания нейтронного источника, безопасного во время перерывов в работе и при транспортировке. Кроме этого, использование нейтронного генератора с DD-реакцией получения нейтронов не может дать загрязнения помещения даже при его полном разрушении.

Литература

1. Bogolubov Ye.P., Korotkov S.A., Korytko L.A., Morukov V.G., Nazarov V.I., Polkanov Yu.G., Khasaev T.O. Method and system based on pulsed neutron generator for fissile material detection in luggage/ Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. - V. 213. - January 2004. - P. 439-444.
2. Ромоданов В.Л., Афанасьев В.В., Белевитин А.Г., Игнатов А.А., Сахаров В.К. Обнаружение делящихся материалов в установках с импульсными нейтронными источниками//Атомная энергия. – 2006. – Т. 101. – Вып. 2. – С. 126.
3. Romodanov V.L., Afanasiev V.V., Bele A.G., Mukhamadyarov I.V., Sakharov V.K., Chernikova D.N. A fissile material detection and control facility with pulsed neutron sources and digital data processing/IAEA Conference (Edinburg, 19-22 November 2007).
4. Krinniger at al. Pulsed neutron method for non-destructive and simultaneous determination of the ^{235}U and ^{239}Pu contents of irradiated and non-irradiated reactor fuel elements//Nuclear Instruments and Methods. – 1969. – 73. – P. 13-33.
5. Спектры медленных нейтронов/Сборник статей. – М.: Атомиздат, 1971.
6. Romodanov V.L., Afanasiev V.V., Belevitin A.G., Muchamadjarov I.V. Detection of fissile materials concealed with radiation absorbing shields in installation with pulsed neutron sources and digital signal processing/Proceedings of 47 Annual INMM Meeting. 2006. – Paper 126.
7. Ромоданов В.Л., Афанасьев В.В., Белевитин А.Г., Мухамадьяров И.В. Тестирование программы цифрового разделения откликов нейтронов и фотонов при различных нагрузках сцинтилляционного тракта//Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2008. – № 4. – С.184-191.

Поступила в редакцию 11.06.2008

account of a failure rate, a repair rate, a cost of SPTE and their repair. Also the model helps to compute probability of system unavailability. Calculation for three CPS elements of Bilibino NPP was made.

УДК 621.039.556

Neutron Beam Optimization for Tumor Therapy with Importance Functions use \V.N. Kononov, A.V. Korobeynikov, V.V. Korobeynikov, O.E. Kononov, N.F. Soloviev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 11 pages, 8 illustrations. – References, 8 titles.

Calculation study has been carried out to analyze the optimal structure of neutron source for cancer tumor treating. The special approach based on so called importance functions was developed. Optimum energy distribution of a neutron beam for patient radiation depends on a malignant tumor disposition in a patient body. It is necessary to define such a neutron specter which produces the maximal harm for malignant tumor tissue and the minimal for the healthy tissue with dependence of the tumor size and depth disposition. The special approach based on so called importance functions was developed.

УДК 621.039.5

Detection of Fissile Materials in Installations with Pulsed Neutron Sources and Digital Signal Processing \V.L. Romodanov, I.V. Mukhamadyarov, A.G. Belevitin, V.V. Afanasiev, V.K. Sakharov, D.N. Chernikova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 8 pages, 4 illustrations. – References, 7 titles.

Implementation of customs installations for the detection of fissile materials (FM) in baggage is related to one of the basic problems of their revealing, that is when FM are deliberately shielded. In devices with pulsed neutron sources, it is practically impossible to conceal FM with a lead shield; however, in such devices, thermal neutrons are used, and therefore FM can be concealed with shields having large thermal neutron absorption cross-section, for example, those of cadmium. The grounds for the feasibility of a customs FM control installation are given by the results of the experiments under ISTC Project No.596 on detection of ^{235}U in a model with graphite neutron moderator and digital discrimination of neutrons and photons in a PSD scintillator. The model represented a graphite parallelepiped of $1300 \times 1300 \times 1200 \text{ mm}^3$ in size with an inner chamber of $500 \times 500 \times 1200 \text{ mm}^3$. A FM sample being inspected and a scintillation measuring system with a stilbene crystal were placed inside the chamber. A complex of four experiments was carried out, considering the following cases: uranium present in the model, uranium surrounded with a cadmium shield, the cadmium shield without uranium, and absence of all indicated materials. The analysis of the experimental results has shown the detectability of uranium concealed with a cadmium shield owing to the fission of ^{235}U on neutrons with energies above the resonance in the cadmium absorption cross-section. These neutrons are present in the graphite model at ~ 150 microseconds after a pulse of fast neutrons from the source. It has been shown that in case of appropriate choice of the energy threshold of FM response detection, it is possible to obtain practically zero photon background, which determines high sensitivity of the installation. Under these conditions, the discrimination of neutrons and photons in the time dependences is possible under loads on the scintillation channel up to $5 \cdot 10^5$ particles per second. Analysis of the results of the experiment shows that 5-7 s suffice to detect ~ 10 grams of ^{235}U in a cadmium shield, at a yield of a DD neutron source equal to $\sim (10^7 - 5 \cdot 10^7)$.

УДК 539.1: 621.039

The Branching Ratio Change in the Reaction $^7\text{Li}(\alpha, \alpha)^7\text{Li}^$ with the Formation of the Near-Threshold $^7\text{Li}^*(7.45 \text{ MeV})$ Resonance under the Influence of the Coulomb Field of the Accompanying Particle* \I.A. Tyras; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 8 pages, 1 illustration. – References, 17 titles.

The influence of the Coulomb field of the accompanying particle on the branching ratio is studied for the case of the near-threshold resonance $^7\text{Li}^*(7.45 \text{ MeV})$ forming in the reaction $^7\text{Li}(\alpha, \alpha)^7\text{Li}^*$ at $E_\alpha = 27.2 \text{ MeV}$.