

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДОВ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ON-LINE-КОНТРОЛЯ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПИРОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ НИТРИДНОГО ОЯТ

Б.А. Канашов*, В.П. Смирнов*, В.В. Кадилин, Р.Ф. Ибрагимов**,
Г.Л. Деденко**, К.Ф. Власик**, В.С. Руденко**, Э.М. Глаговский**,
Е.Э. Лупарь**, Г.В. Полётов***, Е.А. Ломтев***, А.А. Смирнов****,
В.С. Хрунов******

* ООО НПФ «Сосны»

433507, Ульяновская обл., г. Димитровград, пр. Димитрова, 4а

** ИПЯТ НИЯУ МИФИ

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

*** АО «НИИТФА»

115230, г. Москва, Варшавское шоссе, 46

**** АО «Институт физико-технических проблем»

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Курчатова, 4

P

Впервые сообщаются сведения о результатах испытаний детекторов различных типов и аппаратуры каналов гамма-спектрометрии в условиях внешнего излучения, характерного для процедуры пирохимической переработки отработавшего смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива. В качестве детекторов испытывались полупроводниковый детектор с кристаллом CdZnTe; сцинтилляционный детектор с кристаллом LaBr₃; ионизационная камера на основе сжатого ксенона. Внешнее имитационное гамма-излучение было создано на основе Co-источника рассеянного гамма-излучения. Описаны экспериментальная установка и методика проведения измерений, приведены результаты испытаний установки для трех типов детекторов. Показано, что наилучшими характеристиками обладает полупроводниковый детектор. Однако для достижения проектных характеристик канала гамма-спектрометрии необходим поиск новых решений в части защиты и коллимации гамма-излучения от реальной установки переработки СНУП ОЯТ. Речь идет о влиянии геометрических размеров детекторов на конфигурацию защитного коллиматора, который предполагается использовать в реальных условиях. Так, для использования в решении задачи контроля переработки ОЯТ детектора на основе ксенона расчетная масса защитного коллиматора составляет 900 кг, в то время как для других детекторов можно применять менее массивную защиту. Кроме того, фактор наличия нейтронного излучения при контроле процесса переработки ОЯТ может быть учтен при изготовлении защиты от нейтронов для детекторов на основе CdZnTe и LaBr₃. Защитный коллиматор можно окружить слоем замедлителя (например, полиэтилена), а внутри коллиматора создать обшивку из поглотителя тепловых нейтронов (например, на основе кадмия).

© **Б.А. Канашов, В.П. Смирнов, В.В. Кадилин, Р.Ф. Ибрагимов, Г.Л. Деденко, К.Ф. Власик, В.С. Руденко, Э.М. Глаговский, Е.Э. Лупарь, Г.В. Полётов, Е.А. Ломтев, А.А. Смирнов, В.С. Хрунов, 2018**

Ключевые слова: пирохимическая переработка, СНУП ОЯТ, электрорафинирование, продукты деления, on-line-контроль, гамма-спектрометрия, экспериментальная установка.

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [1] продемонстрирована возможность on-line-контроля движения ядерных материалов (ЯМ) в процессах пирохимической регенерации оксидного ОЯТ с использованием методов нейтронной радиометрии. Подобная задача стоит при реализации on-line-контроля наличия продуктов деления (ПД) в расплаве солей в процессе электрохимического восстановления U и Pu из нитридов. Контроль содержания ПД важен как для определения параметров технологического процесса и управления им, так и для оценки качества конечного продукта. В процессе переработки необходимо избавляться, в первую очередь, от элементов, наиболее «вредных» с точки зрения нейтронно-физических характеристик активной зоны реакторов на быстрых нейтронах: Zr, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, I, Cs, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu. Для восстановления ядерно-физических свойств регенерата необходимо достигать коэффициента очистки по этим элементам не менее 30-ти. С точки зрения радиационной безопасности при работе со СНУП ОЯТ опасными являются некоторые изотопы Nb, Sb, Ba, Ce, La, а также продукты активации стали Cr, Mn, Fe, Ni, Co.

Работа посвящена анализу возможностей методов гамма-спектрометрии для on-line-контроля ПД на примере регистрации излучения, исходящего от 1 кг СНУП ОЯТ БРЕСТ-ОД-300, находящегося в солевом расплаве аппарата пирохимической переработки ОЯТ.

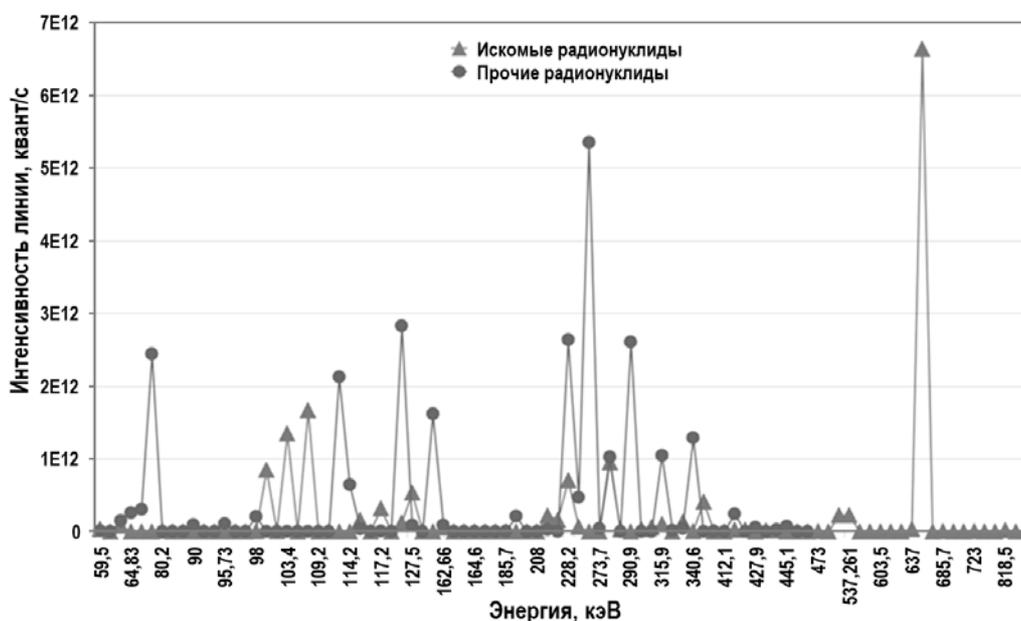


Рис. 1. Теоретический спектр γ -излучения объекта измерения с разделением на целевые нуклиды и сопутствующие

Метод γ -спектрометрии, возможно, является единственным методом on-line-контроля ПД, которые, в основном, являются γ -излучателями и присутствуют в электролите в виде соединений. Из них наиболее активной линией (662 кэВ) обладает цезий-137. В целом же спектр ОЯТ состоит из нескольких сот линий гамма-квантов с различными энергиями, например, только европий-152 содержит 128 линий. Соотношение интенсивности γ -линий зависит от выгорания и времени выдержки топлива так, что носителями информации о содержании нуклидов в соли или кадмии

будут те или иные γ -линии [2 – 4]. Требуется экспериментальное изучение наиболее важных излучателей, дающих информацию для технологического процесса. До настоящего времени задача, подобная проведению on-line-контроля процесса переработки ОЯТ γ -спектрометрическим методом, не ставилась ввиду сложности ее осуществления. Однако при успешном решении появляется возможность ускорить процессы переработки топлива за счет уменьшения времени нахождения ОТВС в бассейнах выдержки и, следовательно, повысить рентабельность цикла переработки ОЯТ.

Задача γ -спектрометрии СНУП ОЯТ осложняется наличием значительного суммарного фона, на котором необходимо зарегистрировать «полезные» линии. Исходя из нуклидного состава СНУП ОЯТ, достигшего выгорания топлива 10 % т.а., была рассчитана мощность дозы γ -излучения в непосредственной близости (100 – 200 мм) от емкости с расплавом соли, содержащей ПД. Расчет производился по значениям керма-постоянных нуклидов. Приблизительное значение мощности дозы составило $P = 5 \cdot 10^5$ Р/ч. На рисунке 1 приведен теоретический спектр гамма-излучения, полученный на основе данных по составу исследуемого СНУП ОЯТ.

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Выбор аппаратуры, подходящей для on-line-контроля параметров процесса переработки, ограничивается в значительной степени общими технологическими условиями осуществляемого процесса. Наиболее критичными условиями являются повышенная температура в защитной камере, где устанавливается измерительная аппаратура (до 60°C), сложность доступа персонала в камеру (следовательно, невозможность произвести ремонт или замену аппаратуры), периодическое наличие химически активных веществ в процессе очистки камеры. В работе [1] представлены данные по условиям, которые предъявляются к аппаратуре on-line-контроля, необходимой для решения поставленной задачи.

В качестве детекторов γ -излучения используются полупроводниковые детекторы [5 – 8], сцинтилляционные детекторы [9 – 12] и газонаполненные ионизационные камеры [13 – 18]. В данной работе применялись полупроводниковый детектор с кристаллом CdZnTe, сцинтилляционный детектор с кристаллом LaBr₃ и ионизационная камера на основе сжатого ксенона. Для защиты от интенсивных высокоэнергетических γ -лучей и рассеянного излучения использовался коллиматор, состоящий из цельного свинцового «домика» и наборной защиты из свинцовых кирпичей.

Полупроводниковый детектор на основе теллурида кадмия представляет собой моноблок, включающий в себя детектор, предусилитель, аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Квазиполусферический детектор имеет размер 10×10×5 мм. Программа набора и обработки спектров, устанавливаемая на ноутбук, позволяет осуществлять стандартные операции со спектрами (набор в течение заданного времени, энергетическая калибровка, определение «мертвого» времени и т.д.). Фотографии детектора на основе CdZnTe, совмещенного с АЦП и установленного внутри защиты, показаны на рис. 2.

Сцинтилляционный блок детектирования представляет собой сборку сцинтилляционного кристалла LaBr₃ и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), помещенных в светозащитный корпус (рис. 3). С выхода сборки сцинтиллятор+ФЭУ снимается аналоговый сигнал, который по соединительным проводам подается на вход спектрометрической платы в персональном компьютере. Размеры детектора определяются размером сборки, в состав которой входили кристалл LaBr₃ цилиндрической формы диаметром 25 и длиной 25 мм и фотоэлектронный умножитель с габаритными размерами 25×100 мм.

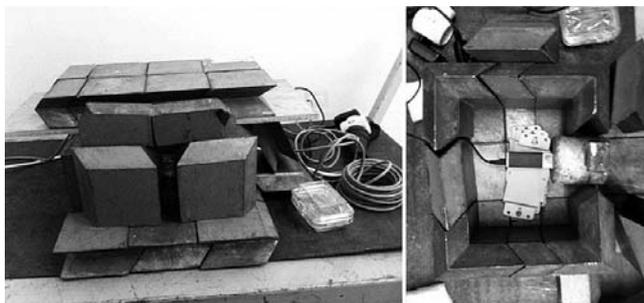


Рис. 2. Детектор на основе CdZnTe внутри свинцовой защиты



Рис. 3. Детектор на основе сцинтиллятора LaBr₃ внутри свинцовой защиты

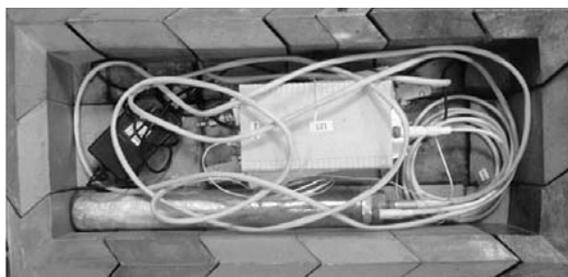


Рис. 4. Детектор на основе ионизационной камеры со сжатым ксеноном внутри свинцовой защиты

Фотография ксенонового гамма-детектора с рабочим объемом 0,2 л, разработанного на основе цилиндрической ионизационной камеры с экранирующей сеткой, показана на рис. 4. Все внутренние элементы детектора изготовлены из нержавеющей стали и металлокерамики, внешние элементы – из фторопласта и сплавов алюминия. Корпус детектора является также катодом ионизационной камеры и основным несущим элементом конструкции. Сигнал с выхода зарядо-чувствительного усилителя (ЗЧУ) γ -детектора подается на блок цифровой электроники (БЦЭ) по помехозащищенному кабелю, после чего поступает на персональный компьютер для обработки с помощью специального программного обеспечения. Линия связи, соединяющая выход ЗЧУ и БЦЭ, находится вместе с γ -детектором внутри свинцовой защиты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Для сравнительной оценки регистрирующих свойств отобранных детекторов проводился эксперимент по регистрации спектров контрольных источников γ -излучения в условиях повышенного фона. В качестве контрольных использовались источники типа ОСГИ (изотопы барий-133, цезий-137). Данные по источникам приведены в табл. 1. Для создания интенсивного фонового излучения использовалась облучательная γ -установка ГУ-200М.

Таблица 1

Характеристики контрольных источников гамма-излучения

Источник	Энергия, кэВ	Квантовый выход, %
^{133}Ba	30,973	62,2
	80,998	34,11
	276,398	7,147
	302,853	18,3
	356,017	61,94
^{137}Cs	661,66	85,1

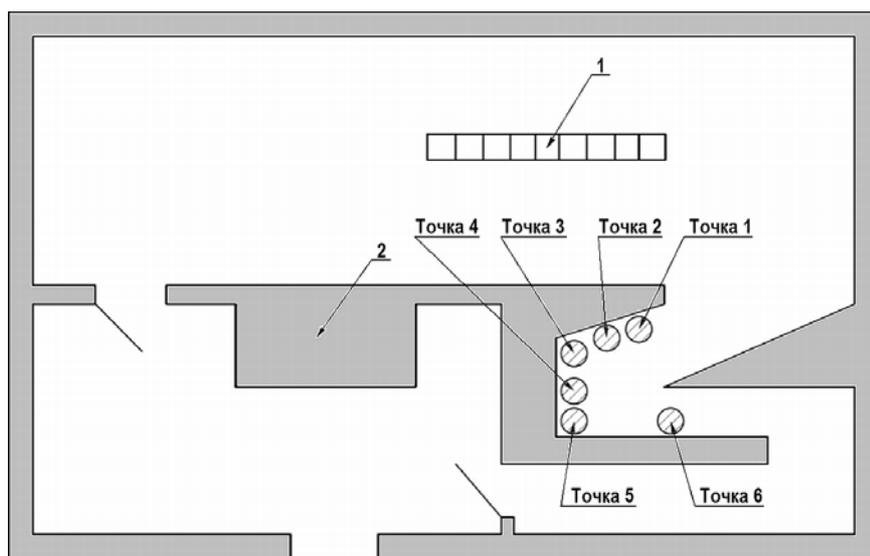


Рис. 5. Расположение точек измерения в эксперименте по исследованию различных типов детекторов в поле фонового гамма-излучения: 1 – облучатель ГУ-200М; 2 – место оператора

Схема расположения точек измерения относительно радиоизотопного облучателя показана на рис. 5. Значения мощности дозы фотонного излучения, измеренные в данных точках с помощью поверенных дозиметрических устройств, приведены в табл. 2. В каждой из указанных точек проводилась запись спектра γ -излучения контрольных источников при выключенной и включенной облучательной установке в течение 300 с.

Детекторы размещались внутри свинцовой защиты, которая набиралась из стандартных свинцовых кирпичей типа «ласточкин хвост», с длиной каждой стороны 100 мм и толщиной 50 мм. В одной из стен свинцовой защиты устанавливался свинцовый коллиматор цилиндрической формы длиной 100 мм с осевым отверстием диаметром 10 мм.

Таблица 2

Информация о дозовых нагрузках в различных точках облучательной камеры

Номер точки	Мощность дозы фотонного излучения, Р/ч
1	12
2	6,44
3	6
4	1
5	0,48
6	0,22

На рисунках 6 – 8 представлены результаты измерений спектров γ -излучения с использованием описанных детекторов.

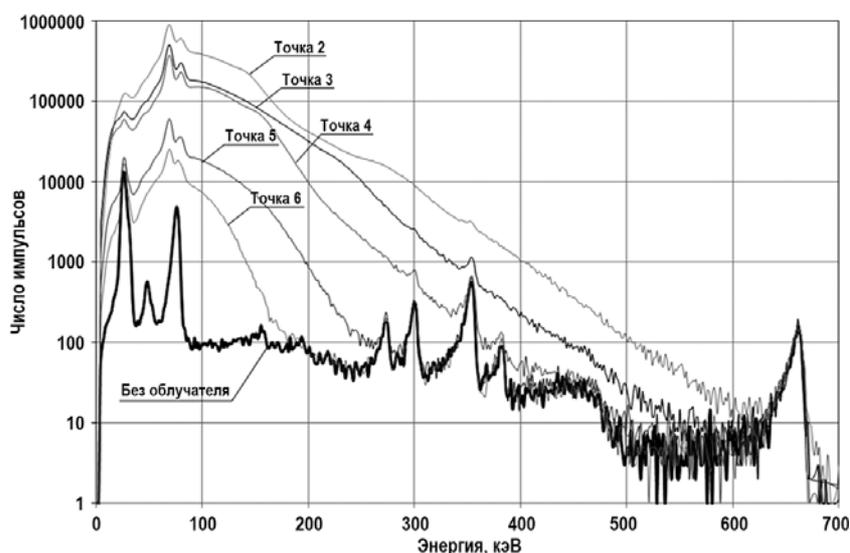


Рис. 6. Спектры контрольных источников, полученные в различных точках лабиринта, детектор CdZnTe

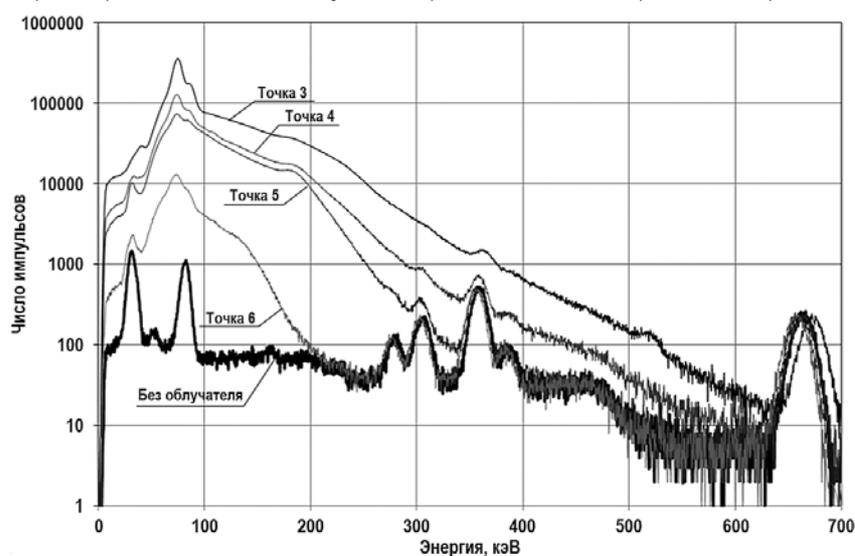


Рис.7. Спектры контрольных источников, полученные в различных точках лабиринта, детектор LaBr₃

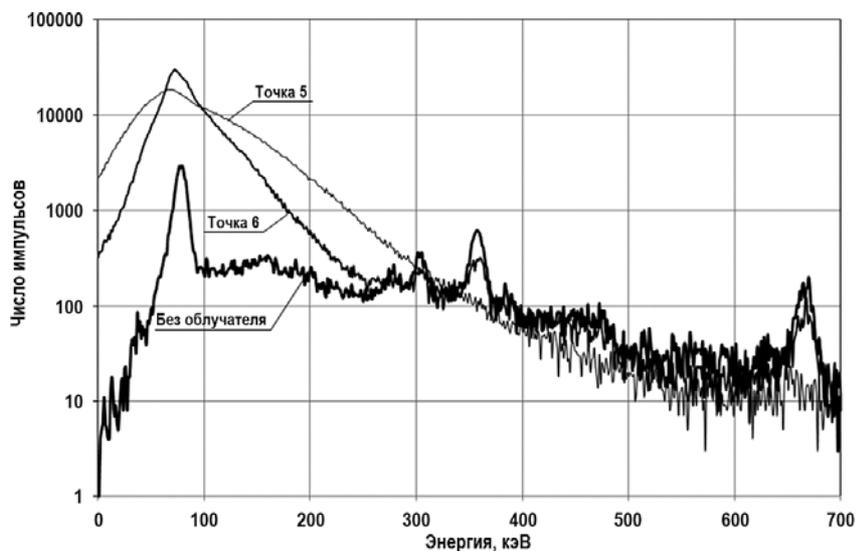


Рис.8. Спектры контрольных источников, полученные в различных точках лабиринта, детектор на основе ионизационной камеры со сжатым ксеноном

При проведении измерений в точке № 1 не удалось ни с одним из представленных детекторов произвести набор спектра в связи с чрезвычайно высокой нагрузкой спектрометрических трактов. В точке № 2 аналогичные сложности при записи спектров возникли с газонаполненным детектором на основе Хе и сцинтилляционным детектором с LaBr_3 . Экспериментальным путем было установлено, что предел загрузки для сцинтилляционного детектора составляет 10^7 имп/с, а газонаполненных детекторов – 10^4 имп/с.

ВЫВОДЫ

Детекторы на основе CdZnTe , а также на основе LaBr_3 за счет их малого размера и высокого предела загрузки можно было бы использовать в условиях интенсивного излучения, соорудив вокруг детектора свинцовую защиту с коллиматором. Масса свинцовой защиты по ориентировочным расчетам может достигать 300 кг.

Детектор на основе ионизационной камеры со сжатым ксеноном вследствие невысокой эффективности регистрации γ -излучения должен иметь более крупные размеры по сравнению с детекторами на основе CdZnTe или LaBr_3 для получения сравнимого по значению энергетического разрешения. Данная особенность, а также низкий предел загрузки детектора ведет к увеличению размеров свинцовой защиты, масса которой (по предварительным расчетам) может достигать 900 кг, что несовместимо с условиями эксплуатации детектора.

Основным недостатком полупроводникового и сцинтилляционного детекторов является их чувствительность к нейтронному излучению. Интенсивность степени взаимодействия детекторов с нейтронами различных энергий, определяемая как интегральное сечение взаимодействия атомов вещества чувствительных элементов детекторов с нейтронами, соотносится приблизительно как 1000:10:1 для детекторов на основе $\text{CdZnTe}:\text{LaBr}_3:\text{Xe}$ соответственно. Поэтому фактор наличия нейтронного излучения при контроле процесса переработки СНУП ОЯТ необходимо учитывать при изготовлении защиты от нейтронов для детекторов на основе CdZnTe и LaBr_3 . Коллиматор можно окружить слоем замедлителя (например, полиэтилена), а внутри него создать обшивку из поглотителя тепловых нейтронов (например, на основе кадмия).

Литература

1. Скиба О.В., Кислый В.А., Савочкин Ю.П., Вавилов С.К. Пироэлектрoхимические процессы в топливном цикле реакторов на быстрых нейтронах. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИ-АР», 2012. – 348 с. – ISBN 978-5-94831-123-4.
2. Рейлли Д., Энслин Н., Смит Х. мл. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. – М.: Бином. – 1999. – 717 с.
3. Акимов Ю.К. Фотонные методы регистрации излучений. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Дубна: ОИЯИ, 2014. – 323 с. – ISBN 978-5-9530-0380-3.
4. Бушуев А.В., Петрова Е.В., Кожин А.Ф. Практическая гамма-спектрометрия. – М.: МИФИ, 2006. – 124 с.
5. Акимов Ю.К., Игнатъев О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Левенец В.В., Омельник А.П., Щур А.А., Кутний В.Е., Рыбка А.В. Применение детекторов из CdTe и CdZnTe производства ННЦ ХФТИ для измерения гамма- и альфа-излучений. – Электронный ресурс: <http://www.lsrn.ru/ppsr/2005/tz20.htm> (дата доступа 02.02.2018).
7. Rybka A.V., Davydov L.N., Shlyakhov I.N. Gamma-radiation dosimetry with semiconductor CdTe and CdZnTe detectors. // Nucl. Instr. and Meth. – 1994. – Vol. 53. – No. 1-2. – PP. 147-156.
8. Левенец В.В., Омельник А.П., Щур А.А. Спектрометрия гамма- и альфа-излучений полупроводниковыми детекторами на основе CdTe (CdZnTe), изготовленными в ННЦ ХФТИ. Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина. – Электронный ресурс: http://www.kinr.kiev.ua/nrae_kyiv2006/proc/levenets.pdf (дата доступа 02.02.2018).
9. Медведев М.Н. Сцинтилляционные детекторы. – М.: Атомиздат, 1977. – 137 с.
10. Цирлин Ю.А., Дайч А.Р., Радыванюк А.М. Сцинтилляционные блоки детектирования. – М.: Атомиздат, 1978. – 124 с.
11. Van Loef E.V.D., Dorenbos P., Van Eijk C.W.E., Kramer K.W., Gudel H.U. Scintillation properties of LaBr₃:Ce₃₊ crystals: fast, efficient and high-energy-resolution scintillators. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. – 2002. – Vol. A 486. – P. 254.
12. Shah K.S., Glodo J., Klugerman M., Moses W.W., Derenzo S.E., and Weber M. J. LaBr₃:Ce Scintillators for Gamma Ray Spectroscopy. – University of California, 2002.
13. Улин С.Е., Дмитренко В.В., Грачев В.М. Цилиндрическая ионизационная камера с экранирующей сеткой, заполненная ксеноном до давления 50 атм. // Приборы и техника эксперимента. – 1995. – № 4. – С. 46.
14. Dmitrenko V.V., Chernysheva I.V., Gratchev V.M. The progress in developing of large volume high pressure xenone gamma ray spectrometers. – Nara: ICDL 99, 1999.
15. Улин С.Е. Гамма-спектрометры на сжатом ксеноне (разработка, исследование характеристик и применение). – М.: МИФИ, 1999. – 98 с.
16. Бовин В.П., Викулов И.В., Панов М.А. Состояние и перспективы разработки газовых пропорциональных детекторов рентгеновского излучения для радиометрического анализа вещества. // ВАНТ. Серия: Радиационная техника. – 1992. – Вып. 1. – С. 39.
17. Шустов А.Е., Власик К.Ф., Грачев В.М. Восстановление спектров гамма-источников, регистрируемых ксеноновым гамма-детектором. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2013. – Т. 4. – № 11-12.
18. Dmitrenko V.V., Gratchev V.M., Ulin S.E. High-pressure xenon detectors for gamma-ray spectrometry. // Applied Radiation and Isotopes. – 2000. – Vol. 52. – No. 3.

Поступила в редакцию 15.02.2018 г.

Авторы

Канашов Борис Андреевич, начальник группы информационного обеспечения
E-mail: bak@sosny.ru

Смирнов Валерий Павлович, директор ООО НПФ «Сосны»
E-mail: vps@sosny.ru

Кадили Владимир Валериевич, доцент
E-mail: vvkadilin@mephi.ru

Ибрагимов Ренат Фаридович, инженер
E-mail: ribragimov@mephi.ru

Деденко Григорий Леонидович, доцент
E-mail: gldedenko@mephi.ru

Власик Константин Федорович, инженер
E-mail: kfvlasic@mephi.ru

Руденко Владимир Степанович, главный специалист
E-mail: vsrudenko@mephi.ru

Глаговский Эдуард Михайлович, директор ИПЯТ МИФИ
E-mail: emglagovskij@mephi.ru

Лупарь Евгений Эдуардович, инженер,
E-mail: eelupar@mephi.ru

Полётов Григорий Владимирович, главный специалист
E-mail: gvpoletov@niitfa.ru.

Ломтев Евгений Алексеевич, инженер
E-mail: EALomtev@niitfa.ru

Смирнов Александр Александрович, начальник отделения
E-mail: ASmirnov@iftp.ru

Хрунов Владимир Семенович, главный инженер
E-mail: ASmirnov@iftp.ru

UDC 621.039.546

CAPABILITITES OF GAMMA-SPECTROMETRY METHODS FOR ON-LINE MONITORING OF NITRIDE SNF PYROCHEMICAL REPROCESSING

Kanashov B.A.*, Smirnov V.P.*, Kadilin V.V.**, Ibragimov R.F.**, Dedenko G.L.**,
Vlasik G.F.**, Rudenko V.S.**, Glagovskij E.M.**, Lupar E.E.**, Poletov G.V.**,
Lomtev E.A.***, Smirnov A.A.****, Hrunov V.S.****

* Sosny R&D Company

4a Dimitrov ave, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433507 Russia

** INPhE MEPHI

31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

*** JSC «National Technical Physics and Automation Research Institute»

(JSC NIITFA)

46 Varshavskoe shosse, Moscow, 115230 Russia,

**** IPTP

4 Kurchatov st., Dubna, Moscow reg., 141980 Russia

ABSTRACT

The paper reports the first test results for detectors of various types and equipment of gamma-spectrometry channels under external radiation originating from pyrochemical reprocessing of spent mixed nitride uranium-plutonium (MNUP) fuel. Testing was carried out on a solid-state detector with a CdZnTe crystal, a scintillation

detector with a LaBr_3 crystal, and an ionization chamber based on compressed xenon. Simulated external gamma radiation was created by means of a Co-based scattered gamma radiation source. The paper also describes an experimental facility and a measurement technique, and discusses results of the facility testing for the three types of detectors. The solid-state detector was proved to have the best performance. However, achieving the design characteristics of the gamma spectrometry channel requires new solutions for protection and collimation of gamma radiation produced by a real MNUP spent nuclear fuel reprocessing facility. What is meant here is the influence of the detectors' geometry on the configuration of a protective collimator which is supposed to be used in real conditions. Thus, if a CXIC based system is used, the calculated mass of the protective collimator is 900 kg, while it is possible to use less massive protection for the other detectors. In addition, the factor of the presence of neutron radiation in reprocessing process can be taken into account when manufacturing neutron shielding for detectors based on CdZnTe and LaBr_3 . It is possible to surround the protective collimator by an inhibitor layer (for example, polyethylene), and inside the collimator, to create a skin from a thermal neutron absorber (for example, based on cadmium).

Key words: pyrochemical process, mixed nitride uranium-plutonium SNF (MNUP SNF), pyroelectrochemical refining, fission products, on-line monitoring of nuclear materials, gamma spectrometry, experimental facility.

REFERENCES

1. Skiba O.V., Kislij V.A., Savochkin U.P., Vavilov U.P. *Pyroelectrochemical processes in the fuel cycle of fast reactors*. Dimitrovgrad. OAO SSC RIAR Publ., 2012, 348 p. ISBN 978-5-94831-123-4 (in Russian).
2. Reilly D., Ensslin N. and Smith H. Jr. *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials*. Moscow. Binom Publ., 1999, 717 p. (in Russian).
3. Akimov Yu.K. *Photon methods for gamma detection*. Dubna. Joint Institute for Nuclear Research Publ., 2014. 323 p. ISBN 978-5-9530-0380-3 (in Russian).
4. Bushuev A.V., Petrova E.V., Kozhin A.F. *Practical gamma spectrometry*. Moscow. MEPhI Publ., 2006, 124 p. (in Russian).
5. Akimov Yu.K., Ignatiev O.V., Kalinin A.I., Kushniruk V.F. *Semiconductor detectors in experimental physics*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1989 (in Russian).
6. Levenets V.V., Omelnik A.P., Schur A.A., Kutniy V.E., Rybka A.V. Use of CdTe and CdZnTe detectors produced by NSC KIPT for gamma and alpha measurements. Available at: <http://www.lsrn.ru/ppsr/2005/tz20.htm> (accessed Feb 02, 2018) (in Russian).
7. Rybka A.V., Davydov L.N., Shlyakhov I.N. Gamma-radiation dosimetry with semiconductor CdTe and CdZnTe detectors. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1994, v. 53, no. 1-2, pp. 147-156.
8. Levenets V.V., Omelnik A.P., Schur A.A. Gamma and alpha spectrometry by semiconductor detectors based on CdTe (CdZnTe) produced by NSC KIPT. Available at: http://www.kinr.kiev.ua/npae_kyiv2006/proc/levenets.pdf (accessed Feb 02, 2018) (in Russian).
9. Medvedev M.N. *Scintillation detectors*. Moscow. Atomizdat Publ., 1977, 137 p. (in Russian).
10. Tsirlin Yu.A., Daich A.R., Radyvanyuk A.M. *Scintillation detection units*. Moscow. Atomizdat. Publ., 1978, 124 p. (in Russian).
11. Van Loef E.V.D., Dorenbos P., Van Eijk C.W.E., Kramer K.W., Gudel H.U. Scintillation properties of $\text{LaBr}_3:\text{Ce}_3+$ crystals: fast, efficient and high-energy-resolution scintillators. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.*, 2002, v. A 486, p. 254.
12. Shah K.S., Glodo J., Klugerman M., Moses W.W., Derenzo S.E., and Weber M. J. $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ Scintillators for Gamma Ray Spectroscopy. *University of California*, 2002.
13. Ulin S.E., Dmitrenko V.V., Grachev V.M. Cylindrical ionization chamber with a shield

grid pressurized by xenon up to 50 atm. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 1995, no. 4, p. 46 (in Russian).

14. Dmitrenko V.V., Chernysheva I.V., Gratchev V.M. *The progress in developing of large volume high pressure xenone gamma ray spectrometers*. Nara: ICDL 99, 1999.

15. Ulin S.E. *Condensed-xenon gamma spectrometers (Development, signature study and use)*. Moscow. MEFHI Publ., 1999, 98 p. (in Russian).

16. Bovin V.P., Viculov I.V., Panov M.A. Current state and prospective development of gas-filled proportional X-ray detectors for radiometric assay. *VANT. Ser.: Radiatsionnaya tekhnika*, 1992, iss. 1, p. 39 (in Russian).

17. Shustov A.E., Vlasik K.F., Grachev V.M. Reconstruction of gamma source spectra registered by xenon gamma detector. *Yadernaya fizika i inzhiniring*. 2013, v. 4, no. 11-12 (in Russian).

18. Dmitrenko V.V., Gratchev V.M., Ulin S.E. High-pressure xenon detectors for gamma-ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 2000, v. 52, no. 3.

Authors

Kanashov Boris Andreevich, Head of Information Activities Group
E-mail: bak@sosny.ru

Smirnov Valerii Pavlovich, Director
E-mail: vps@sosny.ru

Kadilin Vladimir Valerievich, Assistant Professor
E-mail: vvkadilin@mephi.ru

Ibragimov Renat Faridovich, Engineer
E-mail: rfibragimov@mephi.ru

Dedenko Grigory Leonidovich, Assistant Professor
E-mail: gldedenko@mephi.ru

Vlasik Konstantin Fedorovich, Engineer
E-mail: kfvlasic@mephi.ru

Rudenko Vladimir Stepanovich, Head Specialist
E-mail: vsrudenko@mephi.ru

Glagovskij Eduard Mihailovich, Director of INPhE MEFHI
E-mail: emglagovskij@mephi.ru

Lupar Evgeny Eduardovich, Engineer
E-mail: eelupar@mephi.ru

Poletov Grigory Vladimirovich, Head Specialist
E-mail: gvpoletov@niitfa.ru

Lomtev Evgeny Alexeevich, Engineer
E-mail: EALomtev@niitfa.ru

Smirnov Aleksandr Aleksandrovich, Head of Department
E-mail: ASmirnov@iftf.ru

Hrunov Vladimir Semenovich, Lead Engineer
E-mail: VHrunov@iftf.ru