

**ЯДЕРНАЯ  
И АЛЬТЕРНАТИВНАЯ  
ЭНЕРГЕТИКА**

УДК 621.039.1

**А. В. Буковецкий**

ФГУП «Горно-химический комбинат»,  
г. Железногорск, Красноярский край, Россия

## РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБОГАЩЕНИЯ УРАНА МЕТОДОМ «БЕСКОНЕЧНО ТОЛСТЫХ» ОБРАЗЦОВ

*Разработан, изготовлен и опробован экспериментальный стенд для определения обогащения урана методом «бесконечно толстых» образцов; проведены исследования, позволяющие сделать заключение о возможности эксплуатации стенда и определяющие основные направления оптимизации проведения измерений с его помощью.*

*Ключевые слова: экспериментальный стенд, обогащение урана, метод «бесконечно толстых» образцов, сцинтилляционный детектор, спектр, пик, оптимизация.*

**A. V. Bukovetskiy**

FSUE «Mining and Chemical Combine»,  
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russia

## DEVELOPMENT AND CREATION OF THE MOCK-UP FOR DETERMINATION OF URANIUM ENRICHMENT USING THE INFINITE-SAMPLE GAMMA MEASUREMENT TECHNIQUE

*Experimental stand for determination of uranium enrichment using the infinite-sample gamma measurement technique was developed, created and tested. Also was conducted researches, which has helped to make the conclusion about the possibility of using mock-up and determine the main directions of optimization for further researches.*

*Keywords: mock-up, uranium enrichment, infinite-sample gamma measurement technique, NaI(Tl) gamma-ray detector, optimization.*

Одним из основных методов определения изотопного состава ядерных материалов (ЯМ) является гамма-спектрометрический анализ со сцинтилляционным детектором. Метод обладает высокой точностью, отличается простотой и технологичностью. Указанные качества позволили ему стать одним из наиболее распространенных в процессах контроля за технологическими процессами, а также учета ЯМ. Однако наряду с указанными пре-

имуществами существуют недостатки метода. Наиболее значимым недостатком является плохое разрешение сцинтилляционного детектора. Указанный недостаток приводит к тому, что для анализа ядерных материалов могут использоваться только отдельные наиболее интенсивные энергетические линии излучения фотонов гамма-излучения. В случае урана такая линия образуется только фотоном с энергией 185,7 кэВ. Поэтому анализ изотопного состава может быть выполнен только

по  $^{235}\text{U}$ , который является источником излучения фотонов с энергией 185,7 кэВ.

Техническая возможность определения изотопного состава урана с помощью сцинтилляционного детектора определяется не только наличием переносных или стационарных гамма-спектрометрических комплексов, калибровочных и лабораторных образцов, но и возможностью организации и проведения измерений в подходящих и воспроизводимых условиях. Такие условия могут создаваться с помощью экспериментального стенда.

При разработке и создании экспериментального стенда для определения обогащения урана методом «бесконечно толстых» образцов с помощью сцинтилляционного NaI(Tl) детектора в составе переносного спектрометра-радиометра InSpector-1000 фирмы "Canberra" решались следующие задачи:

- изучение особенностей излучения урана и методов определения его изотопного состава;
- анализ технических возможностей для создания экспериментального стенда;
- разработка и изготовление экспериментального стенда;
- разработка программы исследований и их проведение;
- анализ полученных результатов и подготовка рекомендаций;
- разработка предложений по продолжению НИР.

Результаты исследований были представлены на всероссийской научно-технической конференции.

Обогащение урана – содержание делящегося изотопа  $^{235}\text{U}$  в образцах урана.

Обогащение может быть выражено в атомарных или весовых единицах. «Атомарное содержание»  $^{235}\text{U}$  в уране определяется следующим выражением:

$$E_a(\text{ат.}\%) = \frac{\text{Число атомов } ^{235}\text{U}}{\text{Число атомов U}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

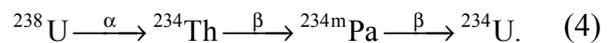
Обогащение также может быть выражено как «весовое содержание»:

$$E_\omega(\text{вес.}\%) = \frac{\text{Количество граммов } ^{235}\text{U}}{\text{Количество граммов U}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Две величины обогащения соотносятся как

$$E_\omega(\text{вес.}\%) = \frac{235E_a}{238 - 0,03E_a} \approx \frac{235}{238} E_a. \quad (3)$$

В природе преобладают три изотопа урана (в круглых скобках приведено содержание атомов этих изотопов):  $^{238}\text{U}$  (99,27 %),  $^{235}\text{U}$  (0,720 %) и  $^{234}\text{U}$  (0,006 %).  $^{234}\text{U}$  образуется в результате альфа-распада  $^{238}\text{U}$ :



Если образец получен в реакторе, в нем также могут присутствовать другие изотопы урана, включая  $^{236}\text{U}$ , получаемый в результате захвата нейтрона ядром  $^{235}\text{U}$ , и  $^{237}\text{U}$  из реакции (n, 2n) на ядрах  $^{238}\text{U}$ .

Изотопы урана испускают альфа-, бета-, нейтронное и гамма-излучения. Основным излучением, используемым при пассивном неразрушающем анализе образцов урана, является гамма-излучение, которое обычно преобладает при распаде  $^{235}\text{U}$ . Однако для образцов урана низкого обогащения наиболее интенсивным компонентом в спектре излучения является рентгеновское излучение. При измерении обогащения  $^{235}\text{U}$  наиболее часто используется линия гамма-излучения с энергией гамма-квантов 185,7 кэВ. Она является самой выделенной одиночной линией гамма-излучения для любых образцов урана с обогащением по  $^{235}\text{U}$  выше природного уровня. Обычно интерференции спектральных линий нет, кроме случая регенерированного топлива, в котором гамма-кванты с энергией 236 кэВ изотопа  $^{212}\text{Pb}$ , дочернего продукта  $^{232}\text{Th}$ , обычно накладываются на линию  $^{235}\text{U}$ . В табл. 1 приведены наиболее интенсивные гамма-линии интересующих изотопов урана.

На рис. 1 и рис. 2 приведены спектры гамма-квантов образцов урана разной степени обогащения, измеренные гамма-детекторами низкого и высокого разрешения, соответственно.

### Методы определения изотопного состава

На сегодняшний день используются два основных метода определения изотопного состава урана с помощью неразрушающих методов анализа:

- «бесконечно толстых» образцов;
- соотношения пиков полного поглощения.

Определение обогащения урана в «бесконечно толстых» образцах является ключевым измерением в технологических процессах и при контроле продукции на предприятиях по обогащению урана и изготовлению ядерного топлива, а также играет важную роль

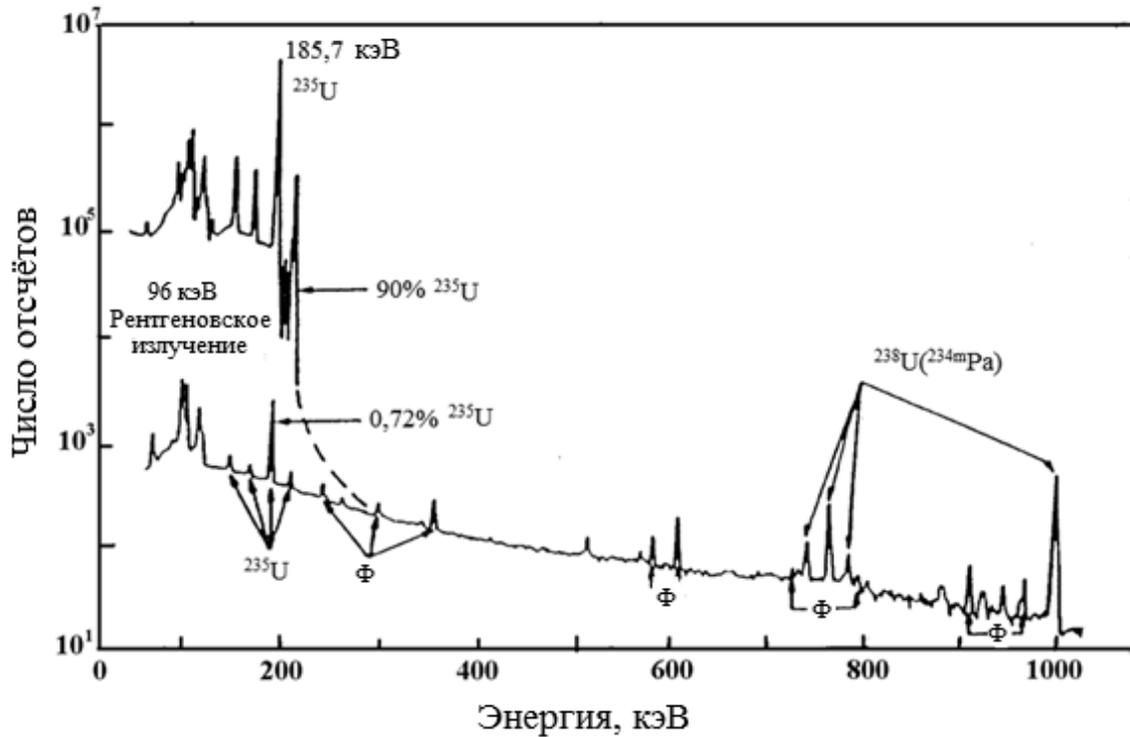


Рис. 1. Спектр гамма-излучения природного урана (0,7 %  $^{235}\text{U}$ ) и урана 90 % обогащения, измерение экранированным Ge(Li) детектором с эффективностью 14 %. Пики, обозначенные как  $^{238}\text{U}$  ( $^{234\text{m}}\text{Pa}$ ), – от распада  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ . Фоновые пики обозначены буквой Ф

Таблица 1

Наиболее интенсивные гамма-линии урана

Изотоп	Энергия гамма-излучения, кэВ	Удельная интенсивность, квант/с·г изотопа
$^{232}\text{U}$	129,1	$6,5 \cdot 10^8$
	270,5	$3,0 \cdot 10^7$
	327,8	$2,7 \cdot 10^7$
$^{233}\text{U}$	119,0	$3,9 \cdot 10^4$
	120,8	$3,2 \cdot 10^4$
	146,4	$6,6 \cdot 10^4$
	164,6	$6,4 \cdot 10^4$
	245,3	$3,8 \cdot 10^4$
	291,3	$5,8 \cdot 10^4$
$^{234}\text{U}$	317,2	$8,3 \cdot 10^4$
	120,9	$5,4 \cdot 10^5$
$^{235}\text{U}$	143,8	$7,8 \cdot 10^3$
	163,4	$3,7 \cdot 10^3$
	185,7	$4,3 \cdot 10^4$
	202,1	$8,0 \cdot 10^2$
	205,3	$4,0 \cdot 10^3$
	742,8	7,1
$^{238}\text{U}$ в равновесии с $^{234\text{m}}\text{Pa}$	766,4	$2,6 \cdot 10^1$
	786,3	4,3
	1001,0	$7,5 \cdot 10^1$

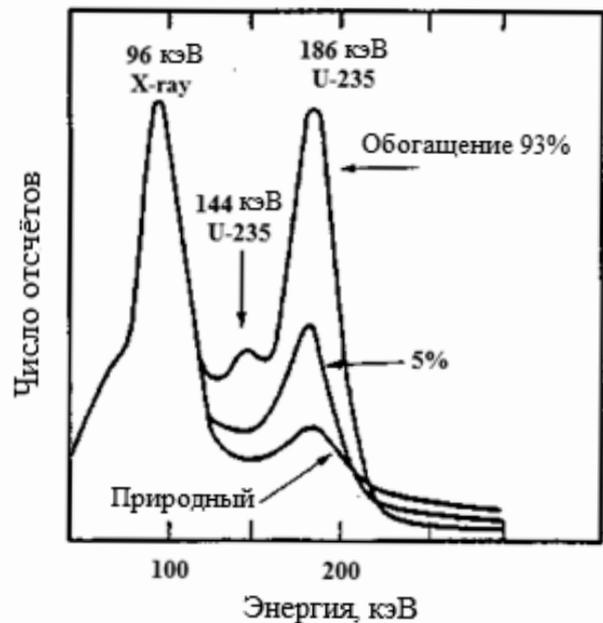


Рис. 2. Спектры гамма-излучения образцов урана природного, 5 и 93 % обогащения, измеренные сцинтилляционным детектором NaI(Tl)

при международных инспекциях по ядерным гарантиям для подтверждения использования уранового топлива в мирных целях.

Принципы измерения обогащения могут быть использованы для определения содержания любых изотопов, если известны их радиационные характеристики и удовлетворяются некоторые специальные условия измерений.

Одной из наиболее известных разновидностей способов определения изотопного состава урана с помощью сцинтилляционного детектора является метод «бесконечно толстых» образцов.

Метод теоретически обоснован предположением, что интенсивность гамма-излучения  $^{235}\text{U}$  измеряемых образцов урансодержащих материалов или сред пропорциональна их обогащению. Гамма-кванты с энергией 185,7 кэВ появляются при радиационном распаде ядра  $^{235}\text{U}$  с вероятностью  $(57,5 \pm 0,9) \%$ . Интенсивность излучения достигает  $4,3 \cdot 10^4$  квант/с·г (см. табл. 1).

Длины свободного пробега и «бесконечные» толщины для квантов 185,7 кэВ в соединениях урана приведены в табл. 2. «Бесконечной» называют толщину слоя вещества, равную 7 длинам свободного пробега гамма-квантов.

Вероятность поглощения монотонно увеличивается при уменьшении энергии, но при энергии гамма-лучей, близкой к энергии связи электронов, на К-оболочке происходит ее резкое изменение, которое носит название

Таблица 2

Длины свободного пробега и «бесконечные» толщины для квантов 185,7 кэВ в соединениях урана

Соединение	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Длина свободного пробега, см	Бесконечная толщина, см
1. Металл	18,7	0,04	0,26
2. UF <sub>6</sub> (тверд.)	4,7	0,20	1,43
3. UO <sub>2</sub> (спечен.)	10,9	0,07	0,49
4. UO (порошок)	2,0	0,39	2,75
5. Нитрат уранила	2,8	0,43	3,04

К-края. Из-за резкого уменьшения коэффициента поглощения при энергиях ниже К-края вероятности поглощения излучений в U и Pu при энергиях 100 кэВ и 200 кэВ почти одинаковые. Существование К-края имеет большое значение для проведения денситометрических и рентгено-флюоресцентных анализов.

На рис. 3 представлена геометрия измерений обогащения урана по гамма-излучению образца. Детектор регистрирует излучение, прошедшее через фильтр и коллиматор. С помощью коллиматора устанавливается площадь видимой детектором поверхности, одинаковой для образцов разной геометрии. Фильтр поглощает излучение в области энергий ниже 185,7 кэВ, что позволяет разгрузить измерительный тракт, повысить долю сигнала

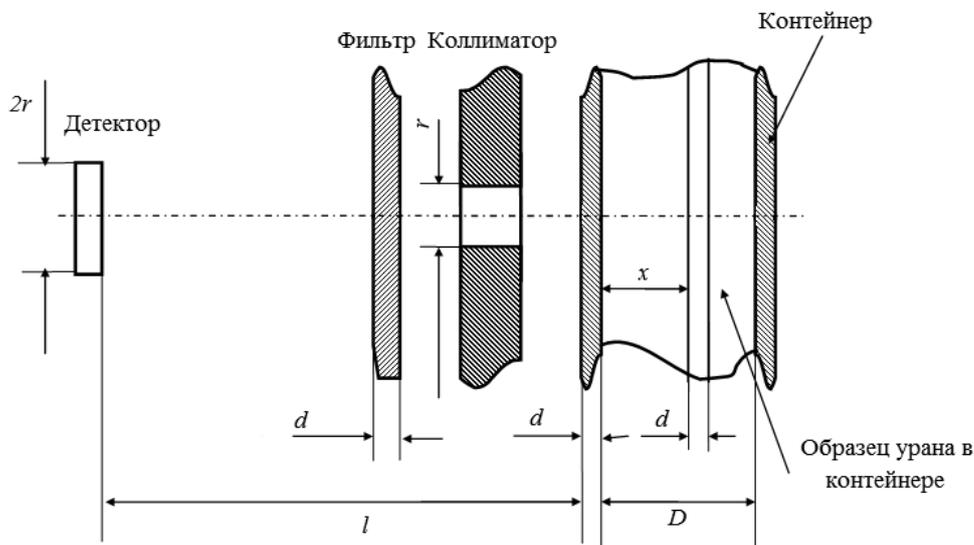


Рис. 3. Схема геометрии измерения обогащения урана по гамма-излучению образца

лов 185,7 кэВ в полном потоке сигналов через тракт и, соответственно, сократить время измерения. Фильтры изготавливаются из материалов среднего веса (Cd, Ni и др.).

Обычно  $l \gg D$ ,  $l \gg R$ ,  $l \gg r$ . Для заданных условий измеренная скорость счёта импульсов в фотопике  $n_p = S_\phi/t$ , где  $S_\phi$  – счёт импульсов в фотопике,  $t$  – время измерения, определяется следующим выражением:

$$n_p = \left(\frac{\Omega_d}{4\pi}\right) \varepsilon \lambda_{235} \left(\frac{N_A}{A_U}\right) \rho_U E I \Theta \exp(-\mu_\phi \rho_\phi d_\phi) \times \exp(-\mu_K \rho_K d_K) \int_0^D \exp(-\mu_1 x) dx, \quad (5)$$

где  $\Omega_d$  – телесный угол, ограниченный отверстием коллиматора;

$\varepsilon$  – эффективность детектора при  $E_\gamma = 185,7$  кэВ;

$\lambda_{235}$  – постоянная распада  $U^{235}$ ;

$N_A$  – число Авогадро;

$A_U$  – атомная масса урана в образце;

$\rho_U$  – плотность урана в образце;

$E$  – обогащение;

$I$  – квантовый выход (коэффициент ветвления) излучения 185,7 кэВ;

$\Theta$  – площадь отверстия коллиматора;

$\mu_\phi, \rho_\phi, d_\phi$  – массовый коэффициент ослабления, плотность и толщина фильтра;

$\mu_K, \rho_K, d_K$  – массовый коэффициент ослабления, плотность и толщина контейнера;

$\mu_1$  – коэффициент ослабления гамма-излучения в образце урана.

После вычисления интеграла и преобразований вышеуказанная формула приводится к следующему виду:

$$n_p = K \frac{E T_K T_\phi (1 - T_{обр})}{[1 + (\mu_M / \mu_U) (\rho_M / \rho_U)]}, \quad (6)$$

где  $K = [(\Omega_d / 4\pi) \varepsilon \lambda_{235} I A_U T_\phi]$ ;

$T_{обр}$  – коэффициент пропускания для исследуемого образца;

$T_K$  – коэффициент пропускания для стенки контейнера;

$T_\phi$  – коэффициент пропускания фильтра;

$\mu_U, \rho_U$  – массовый коэффициент ослабления и плотность урана;

$\mu_M, \rho_M$  – массовый коэффициент ослабления и плотность матрицы.

Член  $1 + (\mu_M / \mu_U) (\rho_M / \rho_U)$  учитывает разбавление урана в образце другими материалами (кислород, фтор, плутоний и др.). Он зависит от состава измеряемого материала. Для эле-

ментов с  $Z < 30$  отношение  $(\mu_M / \mu_U) \leq 0,1$ , а для большинства соединений урана  $(\rho_M / \rho_U) \leq 0,2$ . Таким образом, эта поправка редко бывает больше 1,02.

Все параметры в выражении для  $K$  являются константами для конкретной геометрии измерений. Если они хорошо известны, можно обойтись без использования эталонов. Однако в действительности  $K$  определяют с помощью физического эталона, и его значение становится калибровочным коэффициентом. Таким образом, искомое значение обогащения получают по формуле

$$E = \frac{n_p [1 + (\mu_M / \mu_U) (\rho_M / \rho_U)]}{K T_K T_\phi (1 - T_{обр})}, \quad (7)$$

где  $(1 - T_{обр})$ ,  $T_K, T_\phi, [1 + (\mu_M / \mu_U) (\rho_M / \rho_U)]$  являются поправками, которые, будучи раз определёнными, используются для измерений с любыми образцами с аналогичным составом в аналогичной упаковке. Чаще всего измерения обогащения проводятся на образцах, для которых  $T_{обр} = 0$  (бесконечно толстые образцы).  $T_K$  может быть подсчитан с достаточно малой погрешностью, если известны материал и толщина стенки контейнера. Точное значение толщины стенки можно оценить с помощью ультразвукового толщиномера.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_{p1} [1 + (\mu_{M1} / \mu_{U1}) (\rho_{M1} / \rho_{U1})] / K_1 T_{K1} T_{\phi1} (1 - T_{обр1})}{n_{p2} [1 + (\mu_{M2} / \mu_{U2}) (\rho_{M2} / \rho_{U2})] / K_2 T_{K2} T_{\phi2} (1 - T_{обр2})}. \quad (8)$$

Наличие эталонного образца позволяет использовать формулу (7) для определения обогащения урана в исследуемом материале, если измерения выполняются в повторяющихся условиях, под которыми понимаются одинаковые геометрия измерений (включая геометрию образцов) и элементный состав исследуемых материалов. Тогда функционалы  $(1 - T_{обр})$ ,  $T_K, T_\phi, [1 + (\mu_M / \mu_U) (\rho_M / \rho_U)]$ ,  $K$  будут одинаковы для обоих образцов, а выражение (8) может быть преобразовано к виду

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_{p1}}{n_{p2}}. \quad (9)$$

Спектры излучения урановых образцов, измеренные на NaI- и Ge(Li)-спектрометрах, представлены на рис. 1 и 2. При измерениях на Ge-детекторах нет проблем с вычитанием фона. Пики примерно в 20 раз уже, чем при измерениях на NaI-детекторах, соответственно выше отношение пик/фон. Несколько больше поправка на «мертвое» время, так как сигналы

Ge-детектора более длинные. Погрешность анализа может составлять 0,1 % за разумный промежуток времени.

При анализах бесконечно толстых образцов

$$E = \frac{n_p}{K} = A \cdot p + B \cdot b, \quad (10)$$

$$B = -f \cdot A, \quad (11)$$

где  $A$ ,  $B$  – калибровочные коэффициенты, определенные из измерений с эталоном.

При измерениях обогащения образцов «бесконечной» толщины детектор «видит» через коллиматор часть поверхности образца. Для всех однородных образцов видимый объем содержит одинаковое количество урана. Интенсивность излучения 185,7 кэВ пропорциональна содержанию  $^{235}\text{U}$  в образце. Для калибровки измерительной системы нужен подходящий эталон – аттестованный урановый образец. Точность анализа зависит от степени обогащения и составляет 1–5 % при измерениях на NaI-детекторе и 0,1–1,0 % при измерениях на Ge-детекторе.

Главный недостаток метода измерения обогащения урана, основанный на регистрации излучения 185,7 кэВ, – необходимость калибровки измерительной системы для каждого нового контейнера с образцом урана. Этого недостатка лишен метод измерения обогащения по относительной интенсивности гамма-излучений  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ .

### Анализ технических возможностей

Определение изотопного состава методом «бесконечно толстых» образцов выполняется с помощью практической реализации схемы измерений, представленной на рис. 3 (или ее модификаций). Для реализации предложенного методического подхода лаборатории ИНОЦ ФТИ был разработан и изготовлен экспериментальный стенд.

В данной работе условия проведения эксперимента были несколько изменены и дополнены:

- «бесконечно толстый» образец был заменён на набор отраслевых стандартизированных образцов (ОСО);
- фильтр был исключён из общей схемы геометрии измерений.

В качестве измеряемых образцов был использован набор отраслевых стандартных образцов ОСО 95 651-2003П с различным

изотопным составом урана в диоксиде урана. В наборе ОСО имеются образцы с обогащением от 0,7 % до 90 %. Указанный спектр обогащений позволяет наиболее полно провести статистические исследования, что является достоинством набора ОСО. В то же время образцы ОСО имеют одинаковую геометрию, что соответствует одному из условий метода «бесконечно толстых» образцов. Недостаток использования ОСО – нарушение одного из условий метода «бесконечно толстых» образцов, так как ОСО не являются «бесконечно толстыми» образцами.

Помимо поглощения излучения в области энергий ниже 185,7 кэВ фильтр частично ослабляет излучение от фотонов с энергией 185,7 кэВ. В целях повышения чувствительности измерений фильтр был исключён из общей схемы измерений.

В лаборатории анализа ядерных и радиоактивных материалов ИНОЦ ФТИ представлено два вида сцинтилляционных детекторов: стационарный и ручной. В данной работе по ряду причин применялся переносной сцинтилляционный детектор:

- конструктивные особенности стационарного детектора не позволяют в полной мере реализовать схему измерения обогащения урана методом «бесконечно толстых» образцов;
- конструкция экспериментального стенда обеспечивает возможность свободного отсоединения блока детектирования гамма-квантов. Это позволяет использовать переносной спектрометр-радиометр InSpector-1000 в нескольких экспериментальных стендах, созданных на базе лаборатории анализа ядерных и радиоактивных материалов ИНОЦ ФТИ.

Экспериментальный стенд был разработан и изготовлен для измерения обогащения урана по линии 185,7 кэВ согласно методу «бесконечно толстых» образцов в подходящих и воспроизводимых условиях от мононаправленного коллимированного пучка гамма-квантов, создаваемого измеряемым образцом при помощи свинцовой защиты с коллиматором.

Было запланировано проведение пяти серий экспериментов, предназначенных для оценки влияния диаметра отверстия коллиматора и геометрии «источник излучения – детектор» на точность определения обогащения урана. Для оценки влияния первого фактора диаметр окна коллиматора последовательно

изменялся от меньшего к большему (10 мм, 26 мм, 34 мм, 53 мм). Для оценки влияния второго фактора блок детектирования гамма-квантов последовательно перемещался вдоль оси, соединяющей его геометрический центр с предполагаемым геометрическим центром ОСО по направлению от свинцовой защиты. Калибровка по энергии выполнялась с использованием образца  $^{137}\text{Cs}$  в автоматическом режиме. Длительность калибровочного измерения составляла 300 с. Калибровка по эффективности в данном методе не предполагается. Затем на основе сделанной калибровки для всех ОСО выполнялся анализ изотопного состава. Длительность измерений определялась исходя из того, что количество импульсов в пике полного поглощения должно быть не менее 10 000. Это позволяет обеспечить статистическую погрешность в пределах одного процента. Таким образом, было выполнено 1080 измерений длительностью от нескольких десятков секунд до нескольких тысяч секунд.

Обработка результатов серии экспериментов проводилась согласно методу «бесконечно толстых» образцов. В качестве эталонного образца был выбран ОСО с обогащением 90 %, что обеспечило максимально быстрый

набор спектра и хорошую статистику в пике полного поглощения. В случае, когда диаметр окна коллиматора равен 10 мм, для ОСО с обогащением 0,7 % выполнить анализ изотопного состава урана не удалось, так как отличить пик от фона не представляется возможным. Рассчитанные значения обогащений исследуемых образцов в сравнении с их реальными показателями, а также относительное отклонение полученных значений от реальных приведены в табл. 3.

По результатам измерений были построены графики зависимости скорости счёта от геометрии «источник излучения – детектор» при использовании коллиматоров с различным диаметром отверстий (рис. 4–8).

В результате выполнения работы были сделаны следующие заключения:

1. С использованием технической базы лаборатории анализа ядерных и радиоактивных материалов ИНОЦ ФТИ разработан, изготовлен и опробован экспериментальный стенд для определения обогащения урана методом «бесконечно толстых» образцов.
2. Проведены исследования, позволяющие сделать заключение о возможности эксплу-

Таблица 3

Относительное отклонение полученных значений от реальных значений обогащений измеряемых образцов

Диаметр отверстия коллиматора, мм	ОСО – 0,7 %		ОСО – 3,6 %	
	Обогащение, %	Относительная погрешность, %	Обогащение, %	Относительная погрешность, %
10	–	–	3,12	13,3
26	0,68	2,9	2,42	32,8
34	0,59	15,7	2,08	42,2
53	0,59	15,7	2,06	42,8
Без защиты	0,67	4,3	2,06	42,8
Диаметр отверстия коллиматора, мм	ОСО – 21 %		ОСО – 36 %	
	Обогащение, %	Относительная погрешность, %	Обогащение, %	Относительная погрешность, %
10	21,44	2,1	35,33	1,9
26	17,0	19,0	36,43	1,2
34	14,45	31,2	36,65	1,8
53	14,02	33,2	36,99	2,8
Без защиты	14,12	32,8	37,13	3,1

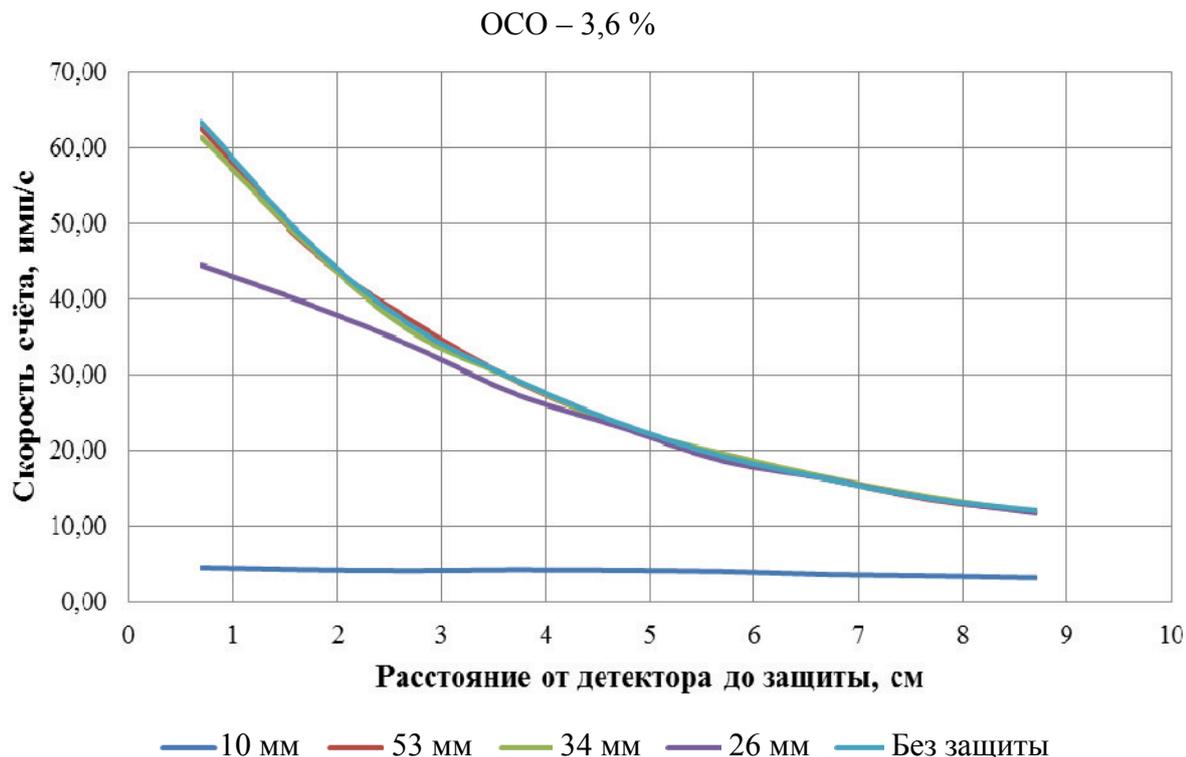


Рис. 4. Графики зависимости скорости счёта импульсов от геометрии «источник излучения – детектор» при использовании коллиматоров с различными диаметрами отверстий для образца с обогащением 3,6 %

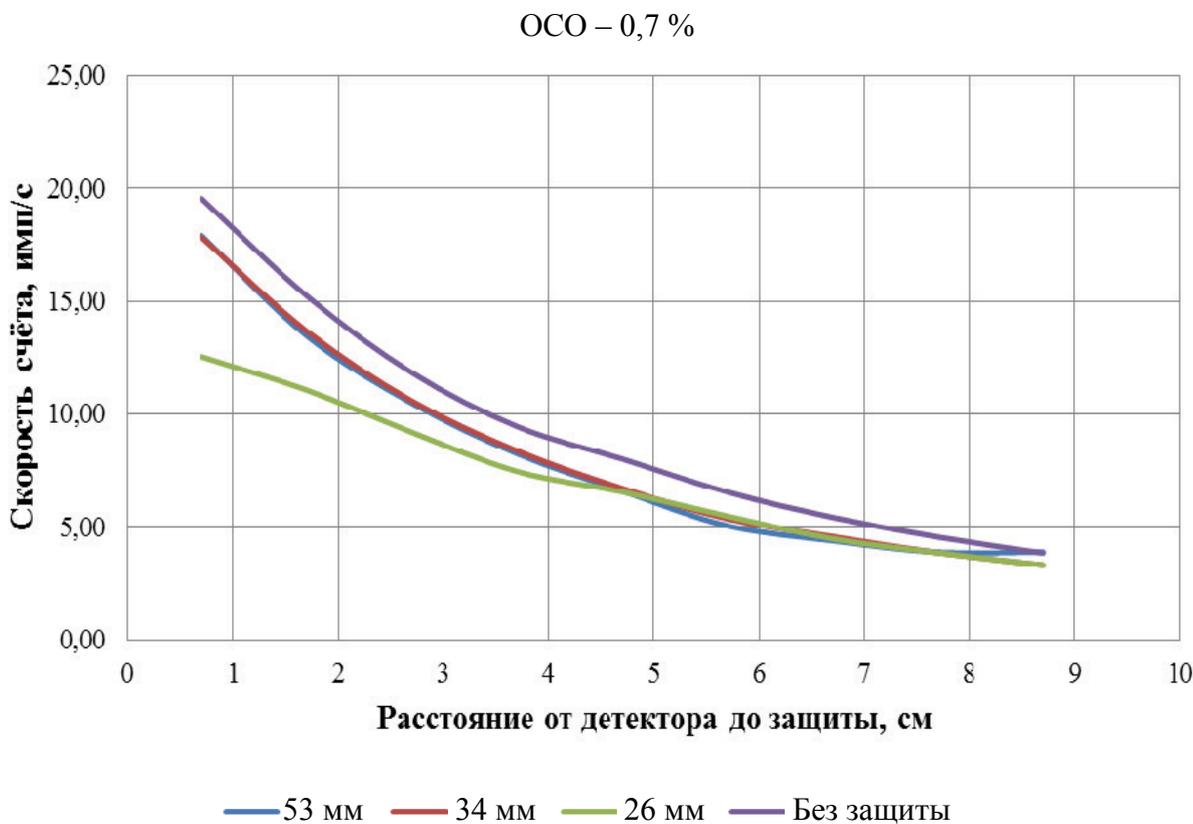


Рис. 5. Графики зависимости скорости счёта импульсов от геометрии «источник излучения – детектор» при использовании коллиматоров с различными диаметрами отверстий для образца с обогащением 0,7 %

ОСО – 21 %

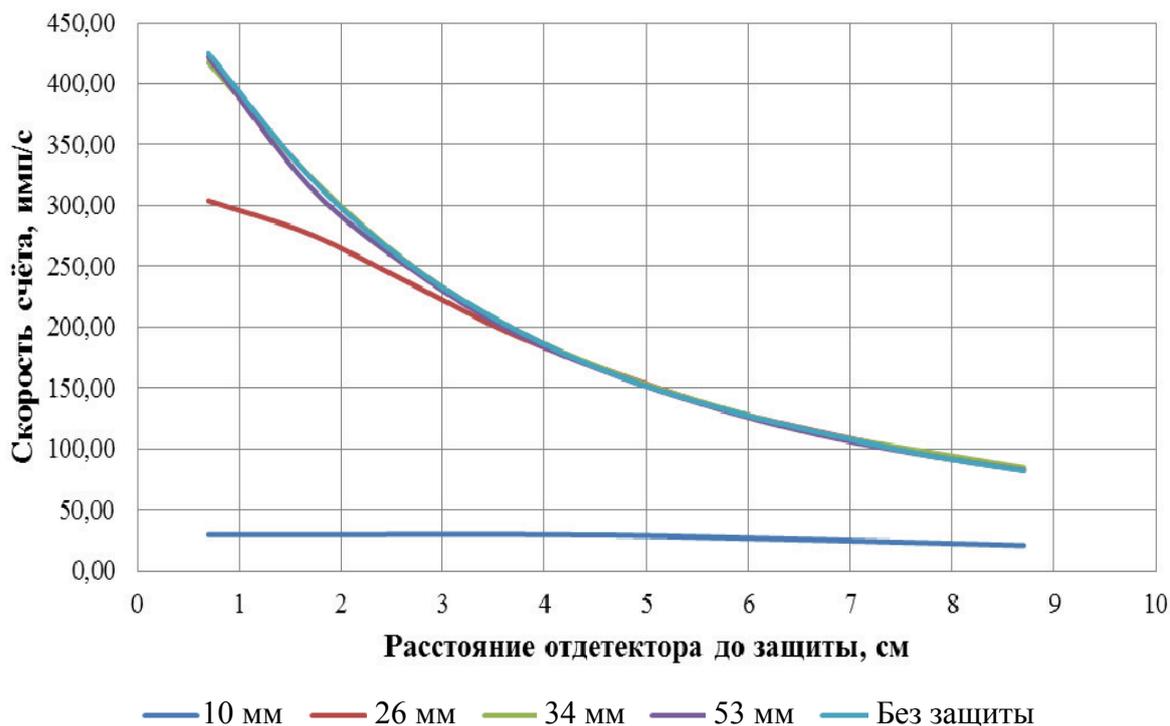


Рис. 6. Графики зависимости скорости счёта импульсов от геометрии «источник излучения – детектор» при использовании коллиматоров с различными диаметрами отверстий для образца с обогащением 21 %

ОСО – 36 %

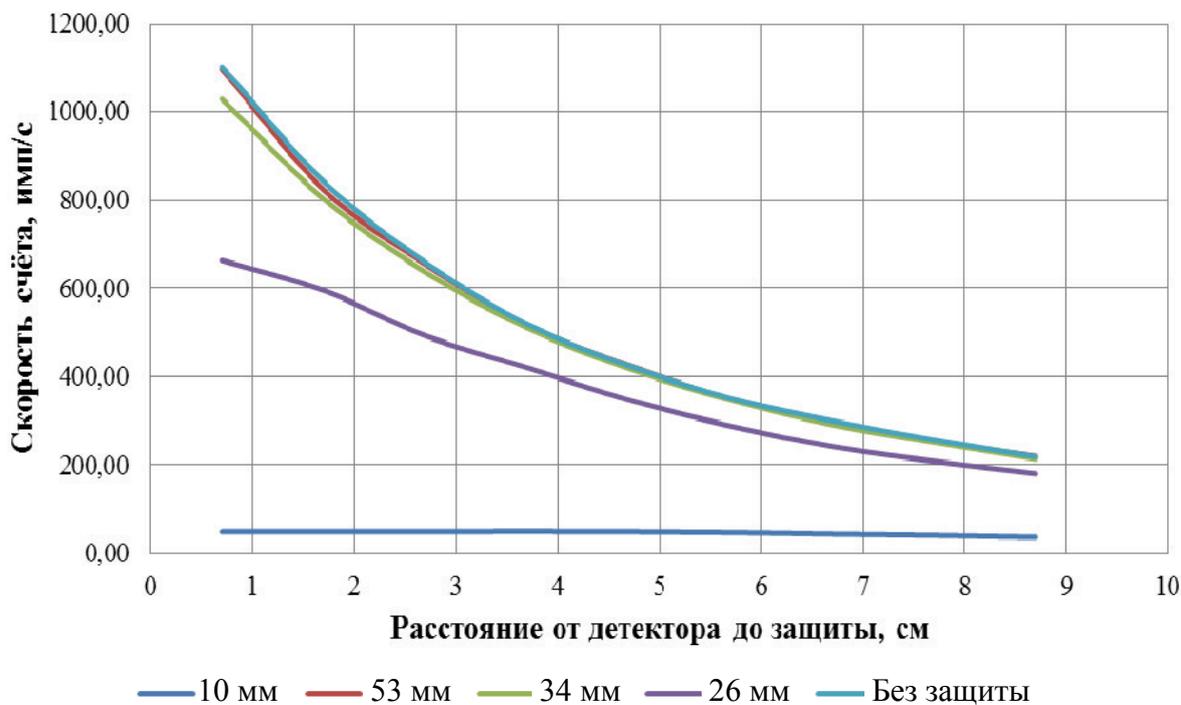


Рис. 5. Графики зависимости скорости счёта импульсов от геометрии «источник излучения – детектор» при использовании коллиматоров с различными диаметрами отверстий для образца с обогащением 0,7 %

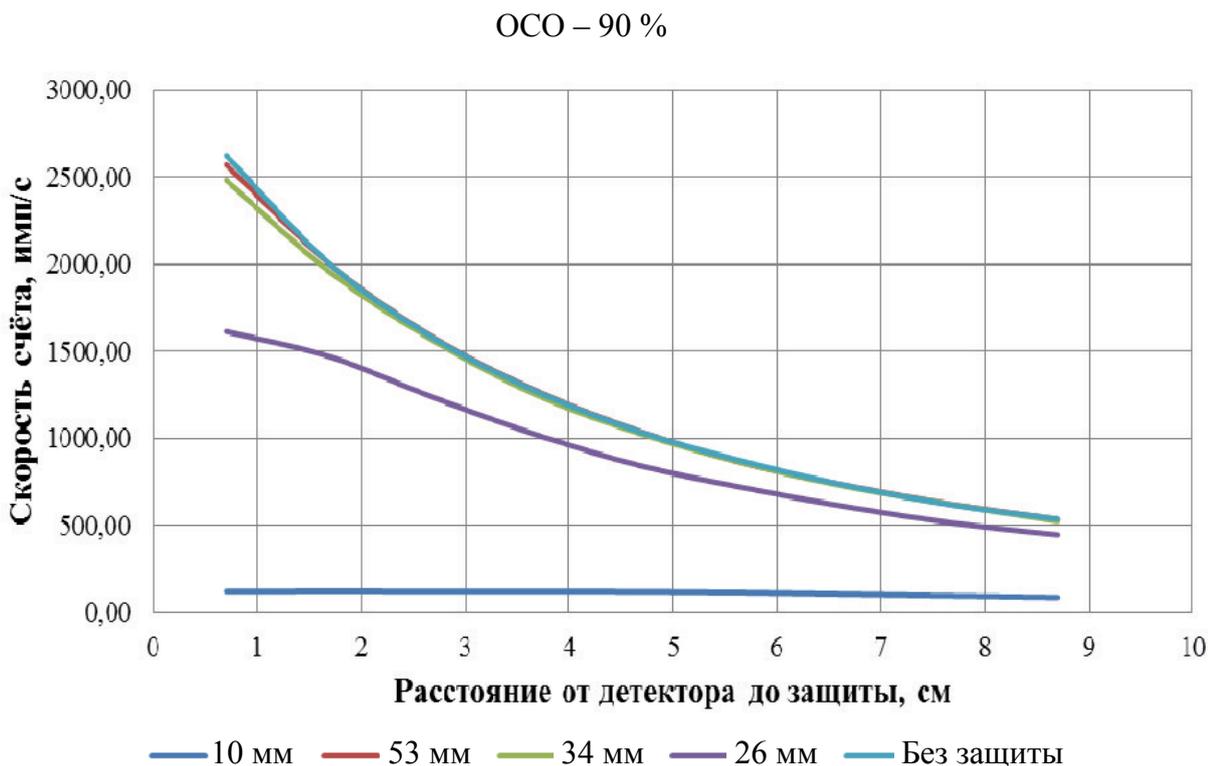


Рис. 8. Графики зависимости скорости счёта импульсов от геометрии «источник излучения – детектор» при использовании коллиматоров с различными диаметрами отверстий для образца с обогащением 90 %

атации стенда и определяющие основные направления оптимизации проведения измерений с его помощью:

- измерения низкообогащённых образцов урана лучше выполнять без защитного экрана в составе экспериментального стенда;
- наилучшие результаты экспериментов были получены при использовании в составе стенда коллиматоров, создающих мононаправленный пучок фотонного излучения.

### Библиографические ссылки

1. Дуглас Райли, Норберт Энслин, Хэйстингс Смит, Сара Крайнер. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. М. : Бинум, 2000. 720 с.
2. Бойко В. И., Силаев М. Е. Методы и приборы для измерения ядерных и других радиоактивных материалов : учеб. пособие [Б.м. : б.и.: 2011]. С. 170–179.
3. Berlizov A. N., Gunnink R., Zsigrai J., Nguyen C. T., Tryshyn V. V. Performance testing of the upgraded uranium isotopics multi-group analysis code MGAU // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 575, Issue 3, 1 June 2007. P. 498–506.

4. Radiation Detection and Measurement, 4th Edition, Glenn F. Knoll, Professor Emeritus of Nuclear Engineering and Radiological Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, John Wiley & Sons, Inc., 2010.
5. Wayne D. Ruhter, Ray Gunnink Measurement of Plutonium and Uranium Isotopic Abundances by Gamma-Ray Spectrometry) // 11th International Workshop on Accurate Measurements in Nuclear Spectroscopy. Sarov, 1996. P. 1–5. UCRL-JC-123412.
6. Gunnink R., Ruhter W. D., Miller P., Goerten J., Swinhoe M., Wagner H., Verplancke J., Bickel M., Abousahl S. MGAU: A New Analysis Code for Measuring U-235 Enrichments in Arbitrary Samples // International Nuclear Safeguards 1994, vision for the future: proceedings of a Symposium on International Safeguards. Vienna: IAEA, 1994. P. 541–546. UCRL-JC-114713.
7. Wayne D. Ruhter, Ray Gunnink Measurement of Plutonium and Uranium Isotopic Abundances by Gamma-Ray Spectrometry) // 11th International Workshop on Accurate Measurements in Nuclear Spectroscopy. Sarov, 1996. P. 1–5. UCRL-JC-123412.

*Статья поступила в редакцию  
14.10.2013 г.*