

УДК 620.179.152  
EDN: MJJBCO

PACS: 87.53.Bn

## Количественная оценка защитных свойств аппарата методом цифровых технологий и ее верификация радиометрическим способом

А. С. Декопов, А. А. Лукьянов, С. П. Масленников, С. В. Михайлов

*Представлена инновационная модель шлангового гамма-дефектоскопа переносного класса «РИД 50W», оснащенная экологически чистым вольфрамовым блоком защиты для работы с излучателями на основе  $^{75}\text{Se}$  и  $^{192}\text{Ir}$ . Рассмотрены вопросы оптимизации, синтеза, компьютерной инженерии ответственных компонентов, представлена количественная оценка технических параметров и характеристик оборудования.*

*Ключевые слова:* шланговый гамма-дефектоскоп, блок биологической защиты, псевдосплав ВНЖ-95, лазерный визир, корректор из вольфрама.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-81-88

Проблема утилизации аппаратуры, содержащей блоки биологической защиты из обедненного урана и мораторий стран ОАЭ и ЕС на использование указанных выше средств неразрушающего контроля, явились триггером создания экологически адаптированных к особым условиям эксплуатации эффективных шланговых средств радиографического контроля (СРК) переносного класса на основе блока биологической защиты из вольфрама.

Шланговый гамма-дефектоскоп «РИД 50W» переносного класса (рис. 1) с блоком биологической защиты, затворным узлом и многозвенным держателем источника на основе вольфрама реализован АО «ЭМИ» в формате интеллектуального продукта [1] с учетом действующих регламентов [2–6] синтезом апробированной конструктивной платформы УНИГАМ Р [7–9] поляризованного клиновидного obtюратора, блокиратора одно-разового рабочего цикла [1] и визуальной системы навигации [10] виртуальной оси пучка  $\gamma$ -излучения относительно «зоны интереса».

Декопов Андрей Семенович<sup>1</sup>, консультант, к.т.н., заслуженный работник атомной промышленности.  
E-mail: 16deko29@mail.ru

Лукьянов Александр Андреевич<sup>1,2</sup>, аспирант.  
E-mail: lukyanov\_a\_a@bk.ru

Масленников Сергей Павлович<sup>2</sup>, доцент, д.т.н.  
E-mail: spmaslennikov@mephi.ru

Михайлов Сергей Владимирович<sup>1</sup>, директор СКБ.  
E-mail: svm@jscemi.ru

<sup>1</sup> Акционерное общество «Энергомонтаж Интернэшнл». Россия, 107078, Москва, Красноворотский проезд, 2, стр. 1.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31.

Статья поступила в редакцию 26.04.2024

После доработки 23.05.2024

Принята к публикации 31.05.2024

Шифр научной специальности: 1.3.2



Рис. 1. Рабочий комплект шлангового гамма-дефектоскопа «РИД 50W» класса «Р»: 1 – головка радиационная (РГ); 2 – контейнер транспортно-перезарядный; 3 – механизм перемещения; 4 – ампулопровод; 5 – коллиматор; 6 – наконечник

Модель радиационной головки шлангового гамма-дефектоскопа класса Р «РИД 50W» (рис. 2) для радионуклидных излучателей на основе  $^{192}\text{Ir}$  и  $^{75}\text{Se}$  с блоком биологической защиты из псевдосплава вольфрама ВНЖ-95 (ТУ48-19-84-81) разработана с использованием системы автоматизированного проектирования (САПР), в последствии может служить для количественной оценки защитных свойств блока биологической защиты и анализа устойчивости к воздействию факторов транспортной аварии методом конечно-элементных расчетов.

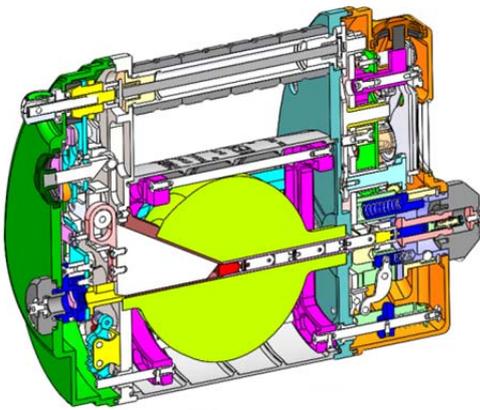


Рис. 2. Вертикальный разрез 3D-модели РГ гамма-дефектоскопа «РИД 50W»

На стадии проектирования комплекс САПР обеспечил возможность виртуально апробировать 3D-модель радиационной головки «РИД 50W» в алгоритме рабочего цикла, исключив необходимость натурного макетирования, испытаний и выявления несогласованности сопрягаемых деталей при изготовлении.

Конструктивное исполнение модели радиационной головки (рис. 2) совершенствует эргономику органов управления системой выпуска (перекрытия) пучка излучения прототипа

[7–9] и согласно концептуальным решениям его конструктивной платформы обеспечивает блокирование:

- замкового и исполнительных механизмов радиационной головки, исключающее возможность выполнения рабочего цикла без предварительного подсоединения штуцеров ампулопровода, зубчатого троса и соединительного рукава пульта дистанционного управления;

- выпуска пучка излучения в положении «ЗАКРЫТО» замкового механизма;

- штуцеров ампулопровода и соединительного рукава пульта управления в присоединенном состоянии в положении «ОТКРЫТО» замкового механизма;

- рабочего цикла при несанкционированном выпуске пучка излучения без перевода в рабочее положение.

Выполненный в укрупненном формате маятниковый сигнализатор положения источника излучения представленной модели радиационной головки, оперативно отображает соответствующую информацию в рабочем алгоритме в цветовой гамме:

- «ЗЕЛЕНАЯ» – пучок излучения перекрыт;

- «ЖЕЛТАЯ» – выпуск пучка излучения подготовлен;

- «КРАСНАЯ» – пучок излучения выпущен.

Выпуск и перекрытие пучка излучения радиационной головки обеспечиваются дискретными перемещениями поляризованного клиновидного obtюратора толкающим усилием контактной поверхности рабочей капсулы источника либо тянущим усилием профилированной хвостовой части многозвенного держателя источника при его поступательных перемещениях вдоль оси канала (рис. 3) согласно техническому решению прототипа [9].

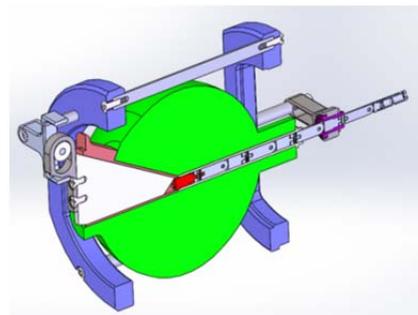
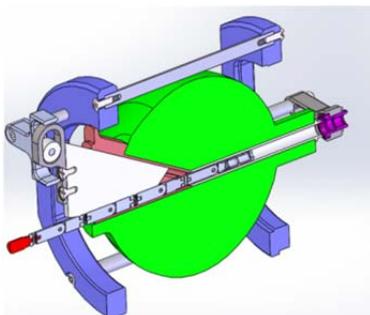


Рис. 3. Схема выпуска и перекрытия пучка излучения клиновидным obtюратором

Конструктивно-технологические сопряжения составных компонентов вновь разработанного блока биологической защиты и затворного узла радиационной головки «РИД 50W» из псевдосплава ВНЖ-95 (ТУ48-19-84-81) на основе вольфрама минимизируют геометрические параметры зоны диффузии  $\gamma$ -квантов, в сравнении с прототипом [9] и выполнены с соблюдением конструктивных зазоров, обеспечивающих санитарные нормы радиационной безопасности [3].

При этом необходимо констатировать, что заготовки изделий из композиционного материала в виде псевдосплава ВНЖ-95 на основе тугоплавкого вольфрама формируют посредством соединения нескольких металлических элементов с разнородными физико-химическими свойствами исключительно методом порошковой металлургии с капиллярной пропиткой пресованного пористого вольфрамового каркаса жидкой фазой расплавленных металлов Ni-Fe в количественном соотношении (~ 5 % массы).

Указанное обстоятельство представляет интерес статистической количественной оценки свойств биологической защиты из ВНЖ-95 вновь разработанной аппаратуры и ее последующей практической верификации посредством стандартных средств дозиметрического контроля.

С учетом опыта проектной оценки [11] параметров защиты гетерогенного блока био-

логической защиты (обедненный уран – вольфрам) прототипа [7–9] статистическим методом математического моделирования Монте-Карло проблема количественной оценки защитных свойств составных компонентов реконструированного блока защиты с двухфазной пористой структурой псевдосплава на основе твердого раствора вольфрама в Ni-Fe реализована в настоящей работе моделированием процесса переноса ионизирующего излучения в материальных системах Geant4 [12] в зонах выходного окна аксиального канала радиационной головки (осевое направление 1, рис. 4) и центрального сечения (направление 5, рис. 4).

Расчёт мощности экспозиционной дозы (МЭД) диффузионного потока проникающего излучения осуществлялся в программном комплексе Geant4 с учетом характеристик распада изотопа  $^{192}\text{Ir}$  [13].

Параметры количественной оценки МЭД в зависимости от переменных параметров щелевого конструктивного зазора ( $\delta$ ) между кардинально обновленным конструктивным исполнением (рис. 5) гомогенной системы (обойма затворного узла – клиновидный обтюратор) и в центральном сечении (направление 5, рис. 4) радиационной головки «РИД 50W» на регламентированных удалениях установлены с использованием программного продукта [12].

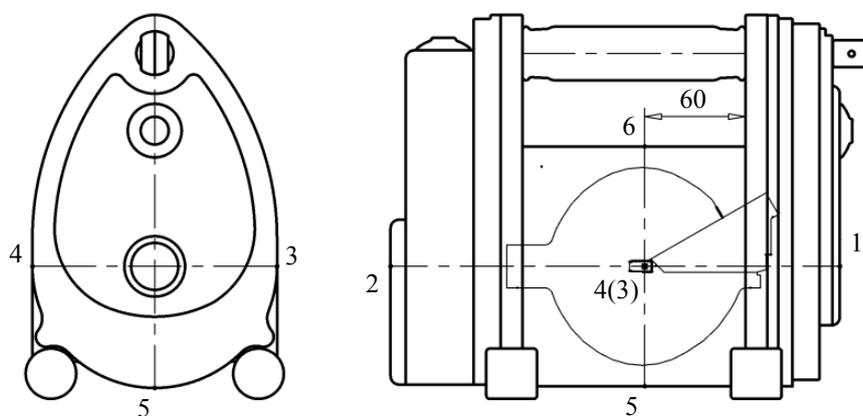


Рис. 4. Схема дозиметрического контроля РИД 50W

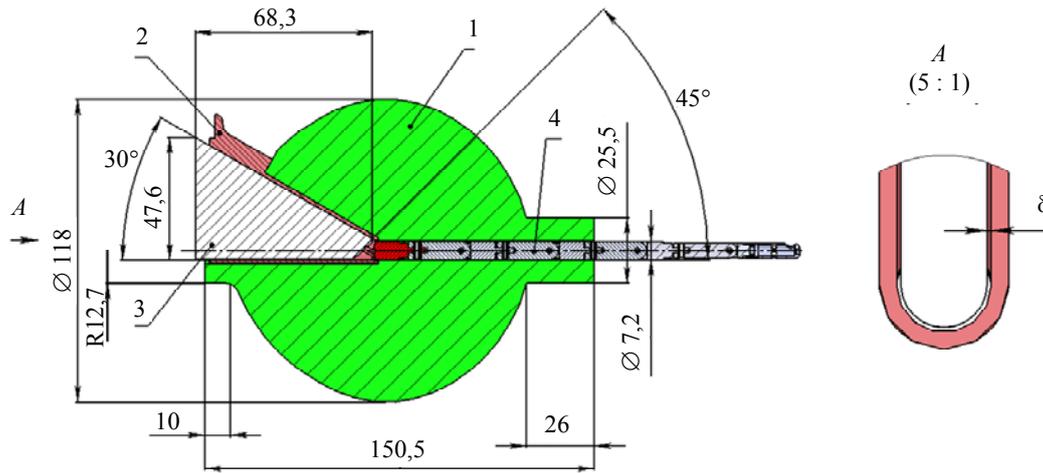


Рис. 5. Конструктивные параметры блока биологической защиты: 1 – блок защиты; 2 – обойма; 3 – обтюратор; 4 – держатель источника

Трансформация потока первичного излучения и модификация исходного энергетического спектра  $\gamma$ -квантов моделируются программным комплексом [12] с учетом материала и конструктивных параметров комбинации блока биологической защиты с затворным узлом согласно расчетной ячеистой трёхмерной модели блока защиты (рис. 6) и дискретных величин конструктивных зазоров (0,05; 0,10 и 0,20 мм) между клиновидным обтюратором и обоймой (осевое направление 1, рис. 4), а также геометрических параметров блока биологической защиты в центральном сечении (направление 5, рис. 4).

Согласно [3] параметры максимальных значений МЭД от источника номинальной активности в радиационной головке, не должны превышать:

- на поверхности корпуса головки – 2,0 мЗв/ч;
- на расстоянии 0,05 м от поверхности корпуса головки – 0,50 мЗв/ч;
- на расстоянии 1,0 м от поверхности корпуса головки – 0,020 мЗв/ч.

Оценочные расчеты МЭД фрагмента радиационной головки – блока защиты проводились согласно расчетной модели (рис. 6).

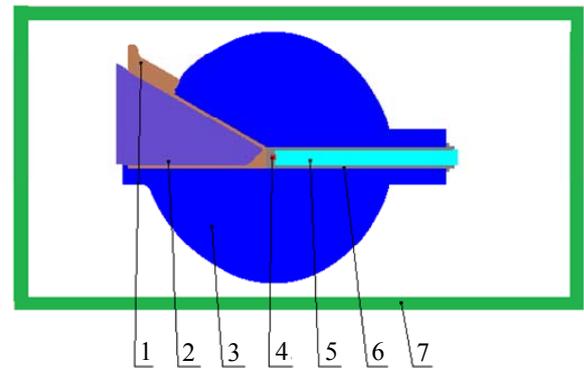


Рис. 6. Расчетная модель блока защиты с затворным узлом: 1 – обойма обтюратора (ВНЖ-95); 2 – клиновидный обтюратор (ВНЖ-95); 3 – блок биологической защиты (ВНЖ-95); 4 – излучатель на основе  $^{192}\text{Ir}$  (50 Ки); 5 – держатель источника (ВНЖ-95); 6 – втулка (ВНЖ-95); 7 – упрощенная модель корпуса радиационной головки (12X18H10T)

В таблице 1 представлены статистически установленные уровни количественных значений МЭД применительно к зоне конструктивного сопряжения подвижного и статичного элементов затворного узла, выполненного с зазорами: 0,05; 0,1 и 0,2 мм (осевое направление 1, рис. 4), и центрального сечения (направление 5, рис. 4) на расстояниях, отвечающих регламенту [3] от условного корпуса радиационной головки.

Таблица 1

Направление рис. 4	$\delta$ , мм	МЭД, мкЗв/ч		
		На поверхности	0,05 м от поверхности	1,0 м от поверхности
1	0,05	231	131	3,5
	0,1	232	165	4,0
	0,2	286	200	13
5	–	808	349	14
Норма по ГОСТ 23764-79		2000	500	20

Фактические результаты оценки МЭД реального изделия с использованием средств дозиметрического контроля (ДКС-96) в критических зонах диффузии  $\gamma$ -квантов конструк-

тивного сопряжения подвижного и статичного элементов затворного узла представлены для сравнения в табулированном виде (табл. 2) согласно схеме рисунка 4.

Таблица 2

МЭД, мкЗв/ч						
На поверхности		0,05 м от поверхности		1,0 м от поверхности		
Измеренное значение	Приведенное значение к активности, 50 Ки	Измеренное значение	Приведенное значение к активности, 50 Ки	Измеренное значение	Приведенное значение к активности, 50 Ки	
1	237,5	249,5	152	159,7	8,55	9,0
2	171,0	179,6	114	119,7	6,65	7,0
3	1035,5	1087,7	466	489,5	13,3	14,0
4	950,0	997,9	447	469,5	12,35	13,0
5	1045,0	1097,7	466	489,5	15,2	16,0
6	1045,0	1097,7	456	479	10,45	11,0
<b>Норма по ГОСТ 23764-79</b>		2000		500		20

Основные сравнительные характеристики и рабочие параметры радиационной головки гамма-дефектоскопа переносного класса

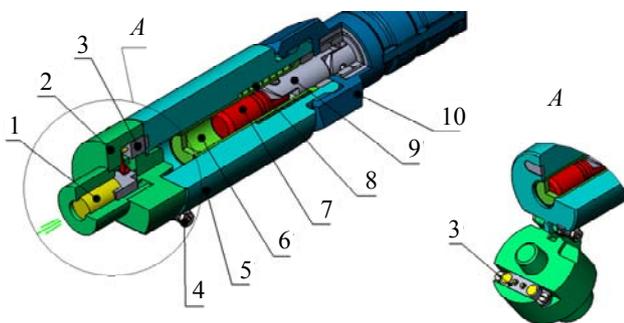
«РИД 50W» и прототипа «УНИГАМ Р» представлены в таблице 3.

Таблица 3

Рабочие параметры радиационных головок серии «РИД 50W» и «УНИГАМ Р»

Параметры, характеристики радиационных головок (РГ)	РИД 50W	УНИГАМ Ir300 Se200 P
Масса РГ, кг	~ 20,0	19,7
Габаритные размеры РГ, мм (Н×В×L), мм	229×153×303	227×168×310
Используемые излучатели: Тип, номиналы МЭД, А/кг; активность, Бк (Ки) на 1 м. Технические условия.	ГИ192М61 – ГИ192М62; ТУ95 2911-2009 GS192Ir411 – GS192Ir412 ТУ 90.02.00.000 СР16.10 – СР16.140 ТУ 95.2934-98 SR16.10 – SR16.140 ТУ 90.03.00.000	ГИИД-11а-4; $6,8 \times 10^{-6}$ ; $11,1 \times 10^{12}$ ; (300); ТУ 95 930-82  ГС75М13.200; $2,86 \times 10^{-6}$ ; $7,4 \times 10^{12}$ ; (200); ТУ 95 2934-2008
Размеры рабочей капсулы излучателя, мм; элемент соединения	$\varnothing 7,15 \times 19,7$ ; «лопатка» с отверстием	$\varnothing 6^{+0,5} \times 19,7$ ; «лопатка» с отверстием
Материал блока защиты. Масса блока, кг	Вольфрам. 14,0	Обедненный уран – вольфрам. 11,5
Канал блока защиты. Защитная оболочка канала	Аксиальный. Вольфрам.	Аксиальный. Трубка-вольфрам.
Держатель источника	Многозвенный, шарнирный из вольфрама	Многозвенный, шарнирный из вольфрама
Затворный узел. Материал.	Клиновидный подвижный обтюра-тор. Вольфрам.	Клиновидный подвижный обтюра-тор. Вольфрам.
Навигация рабочего пучка $\gamma$ -излучения относительно объекта контроля	Траектория лазерного визиера. (Патент РФ № 2818496)	Визуально – «на глазок»
Правовая защита	Патент РФ № 2773118	Патенты РФ №№ 2428679, 1746799

Рабочий комплект шлангового гамма – дефектоскопа «РИД 50W», предназначенного для  $\gamma$ -дефектоскопии в том числе в критических условиях конструктивной стесненности с выпуском при этом исключительно  $4\pi$  пучка излучения из тупикового трубчатого наконечника ампулопровода в отсутствии возможности использования штатных систем коллимации, включает в свой состав средство визуализированной навигации виртуальной оси рабочего пучка излучения «дно» капсулы излучателя относительно «зоны интереса» соосно юстированному лучу лазерного визира [10] (рис. 7).



**Рис. 7. 3D-модель лазерного визира.**  
**Основной вид** – капсула излучателя в режиме доставки к выходному окну корректора;  
**Вид А** – капсула излучателя в положении экспонирования: 1 – лазерный светодиод; 2 – прицельная рамка; 3 – коммутатор электропитания; 4 – шарнир; 5 – корректор из вольфрама; 6 – биметаллический трубчатый наконечник; 7 – капсула излучателя; 8 – пружина; 9 – держатель источника; 10 – гайка ампулопровода

Лазерный визир оснащен резьбовым элементом соединения с унифицированной гайкой ампулопровода и выполнен на основе биметаллического тупикового трубчатого наконечника, телескопически дискретно-подвижно заключенного в полость корректора в виде втулки из вольфрама с толщиной стенки не менее слоя половинного ослабления, шарнирно и эксцентрично соединенной в торцевой части с магнитно-фиксированной прицельной рамкой, армированной лазерным светодиодом.

Эффект коррекции параметров МЭД мультинаправленного пучка излучения реализуется частичной адресной локализацией пучка  $\gamma$ -излучения  $4\pi$  и его конвертированной интенсификацией преимущественно в осевом направлении рабочей поверхности «дно» кап-

сулы излучателя в целях частичного погашения боковых шумовых эффектов обратно-рассеянного излучения и повышения интенсивности потока торцового пучка излучения при доставке капсулы излучателя совместно с тонкостенным трубчатым наконечником к выходному окну корректора.

Поляризованная прицельная рамка лазерного визира выполнена с возможностью автоматизированной экстракции из реконструированного рабочего пучка ионизирующего излучения (рис. 7, вид А) в динамическом режиме доставки капсулы излучателя в положение экспонирования.

## Выводы

1. Создана новая модель шлангового гамма-дефектоскопа «РИД 50W» с блоком биологической защиты на основе псевдосплава ВНЖ-95, отвечающая регламентам [2–6].

2. Расхождение расчётных данных (табл. 1) с практическими результатами верификации по направлению 5 рис. 4 (табл. 2) может быть объяснено достаточно высокой погрешностью  $\pm 20\%$  [14] измерительного прибора ДКС-96 и локальным наличием пор в макроструктуре заготовки блока защиты из ВНЖ-95 (ТУ 48-19-84-81). Представляется целесообразным изготовления блока защиты из псевдосплава ВНЖ-95 по ТУ 1967-012-00196150-2013 отличающиеся более высокими требованиями к размерам пор и посторонних включений.

3. Количественная оценка защитных свойств аппарата методом цифровых технологий позволяет предварительно оценить параметры блока биологической защиты на ранней стадии конструирования без многократного изготовления опытных образцов и использования трудоемкого ресурса натуральных испытаний. При этом расчетная количественная оценка защитных свойств аппаратуры не исключает необходимость штатных дозиметрических испытаний.

4. Оснащение рабочего комплекта гамма-дефектоскопа лазерным визиром расширяет технологические возможности шлангового дефектоскопа в условиях конструктивной стесненности при лазерной навигации направленного пучка излучения относительно «зоны интереса», а также его коррекции.

5. Применение блока биологической защиты из ВНЖ-95 в радиографической аппаратуре решает ключевые проблемы её транспортирования и утилизации, а также расширяет возможности экспорта в страны ОАЭ и ЕС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов А. А., Баранов А. В., Колотьев С. П., Михайлов С. В. и др. Гамма-дефектоскоп. Патент № 2773118 (РФ). 2022.

2. ISO 3999:2004 Защита радиационная. Аппаратура для гамма-радиографии. Технические требования к эксплуатационным показателям, проектированию и испытаниям.

3. ГОСТ 23764-79. Гамма-дефектоскопы. Общие технические условия. – М.: ИПК Изд. стандартов, 2005.

4. ГОСТ 16327-88 Комплекты упаковочные транспортные для радиоактивных веществ. Общие технические условия. – М.: ИПК Изд. стандартов, 1999.

5. НП-053-16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила без-

опасности при транспортировании радиоактивных материалов».

6. СП2.6.1.3241-14 Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при радионуклидной дефектоскопии.

7. Декопов А. С., Федотов В. И., Гуськов В. К. Гамма-дефектоскоп. Патент № 2428679 С1 (РФ). 2011.

8. Декопов А. С., Михайлов С. В., Лукьянов А. А. / В мире неразрушающего контроля. 2021. № 3 (93). С. 52–56.

9. Декопов А. С., Емельянов М. В., Маслосолов В. А., Фурцев В. И. Гамма-дефектоскоп. Патент № 1746799 А1 (РФ). 1992.

10. Декопов А. С., Михайлов С. В., Тихомиров Г. В. и др. / MEGATECH. 2015. № 2–3. С. 48–53.

11. Agostinelli S. et al. / Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. Vol. 506. P. 250–303.

12. Декопов А. С., Михайлов С. В., Лукьянов А. А. и др. Шланговый гамма-дефектоскоп. Патент № 2818496 (РФ). 2024.

13. IAEA Nuclear Data Section [Электронный ресурс]. URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>

14. Дозиметры-радиометры ДКС-96. Руководство по эксплуатации ТЕ1.415313.003РЭ

PACS: 87.53.Bn

## Quantitative assessment of protective properties of the apparatus by digital technology method and its verification by radiometric method

A. S. Dekopov<sup>1</sup>, A. A. Lukyanov<sup>1,2</sup>, S. P. Maslennikov<sup>2</sup> and S. V. Mikhailov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Joint Stock Company «Energomontazh International»  
Bd. 1, 3 Krasnovorotsky proezd, Moscow, 107078, Russia  
E-mail: sasha-lyk@bk.ru

<sup>2</sup> National Research Nuclear University MEPHI  
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia

Received 26.04.2024; revised 23.05.2024; accepted 31.05.2024

*An innovative model of a portable class hose gamma flaw detector “RID 50W” is presented, equipped with an environmentally friendly tungsten protection unit for use with emitters based on <sup>75</sup>Se and <sup>192</sup>Ir. The issues of optimization, synthesis, computer engineering of critical components and quantitative assessment of technical parameters and characteristics of equipment are considered.*

*Keywords:* hose gamma-defectoscope, biological protection unit, pseudo-alloy WNIFE-95, laser sighting device, tungsten corrector.

**REFERENCES**

1. Antonov A. A., Baranov A. V., Kolotiev S. P., Mikhailov S. V. et al. Gamma-defectoscope. Patent № 2773118 (RF). 2022.
2. ISO 3999:2004. Radiation protection. Apparatus for gammaradiography. Technical requirements for performance, design and testing.
3. GOST 23764-79. Gamma detectors. General specifications.
4. GOST 16327-88 Packaging transportation kits for radioactive substances. General technical conditions.
5. NP-053-16. Federal norms and rules in the field of atomic energy use "Safety rules for transportation of radioactive materials.
6. SP2.6.1.3241-14 Hygienic requirements to ensure radiation safety in radionuclide flaw detection.
7. Dekopov A. S., Fedotov V. I. and Guskov V. K. Gamma-defectoscope. Patent № 2428679 C1 (RF). 2011.
8. Dekopov A. S. Mikhailov S. V. and Lukyanov A. A., In the world of nondestructive testing, № 3 (93), 52–56 (2021).
9. Dekopov A. S., Emelyanov M. V., Maslosolov V. A. and Furtsev V. I. Gamma-defectoscope. Patent № 1746799 A1 (RF). 1992.
10. Dekopov A. S., Mikhailov S. V., Tikhomirov G. V. et al., MEGATECH, № 2-3, 48–53 (2015).
11. Agostinelli S. et al., Nucl. Instrum. Meth. A **506**, 250–303 (2003).
12. Dekopov A. S., Mikhailov S. V., Lukyanov A. A. et al. Hose gamma flaw detector. Patent № 2818496 (RF). 2024.
13. IAEA Nuclear Data Section. Electronic resource: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>
14. DKS-96 dosimeters-radiometers. Operation Manual TE1.415313.003RE