

УДК 620.179.152
EDN: UTDMXL

PACS: 87.53.Bn

Количественная оценка качества радиографического контроля с учетом специфики генерации и формирования рабочих пучков проникающего излучения© А. С. Декопов¹, А. А. Лукьянов^{1,2,*}, С. П. Масленников², С. В. Михайлов¹¹ Акционерное общество «Энергомонтаж Интернэшнл», Москва, 107078 Россия

* E-mail: lukyanov_a_a@bk.ru

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409 Россия

Статья поступила в редакцию 5.06.2025; после доработки 27.06.2025; принята к публикации 20.10.2025

Представлена количественная оценка качества радиографического контроля с учетом особенностей формирования системами глубокой коллимации рабочих пучков проникающего излучения в портативных средствах радиографического контроля затворного типа, оснащённых источниками на основе радионуклида ¹⁹²Ir, генерирующими потоки ионизирующего излучения фокальными пятнами поверхностей «дно» и «бок» цилиндрической капсулы. Проведено математическое моделирование взаимодействия гамма-излучения с элементами систем глубокой коллимации различной геометрии с использованием программных комплексов MCNP5 и Geant4. Установлено, что применение пирамидальной системы глубокой коллимации позволяет улучшить соотношение «сигнал/шум» примерно в два раза по сравнению с прямоугольно-пирамидальной, что способствует повышению качества регистрируемого изображения и снижению массогабаритных характеристик оборудования. Кроме того, ориентация капсулы излучателя относительно «зоны интереса» фокальным пятном излучающей области «дно» незначительно увеличивает вклад шумового эффекта и ухудшает параметры фактора «сигнал/шум» не более, чем на 1 %.

Ключевые слова: глубоко коллимированный; шумовой эффект; фактор «сигнал/шум»; гамма-дефектоскоп затворного типа.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-5-100-105

Высокое качество радиографического метода контроля с относительной чувствительностью 1–2 % в диапазоне радиационных толщин до 70 мм по стали гарантированно достигается с использованием глубоко коллимированных серийных средств радиографического контроля (СРК) переносного класса, оснащаемых серийными излучателями на основе радионуклида ¹⁹²Ir [1].

По экспертным оценкам в РФ на объектах судостроения, предприятий химической, нефтегазовой и нефтеперерабатывающей промышленности, а также в энергетической от-

расли в промышленной эксплуатации находится до 10 тысяч серийных гамма-дефектоскопов переносного класса.

Широкое распространение в отечественной практике неразрушающего контроля получил разработанный АО «НИИТФА» адаптивно к конструктивно стесненным условиям монтажа и ремонта портативный гамма-дефектоскоп затворного типа серии «Стапель» [2], снабженный системой глубокой коллимации.

При работе с указанными СРК на предприятиях судостроительной промышленности

сформировалось гипотетическое предположение, что наилучшая чувствительность метода контроля в условиях глубокой коллимации фронтального пучка излучения достигается стандартными излучателями, ориентированными в направлении объекта контроля исключительно излучающей областью донной рабочей поверхности цилиндрической капсулы источника.

Указанная гипотеза предварительно исследована и оценена канавочным эталоном № 2 (ГОСТ 7512-82) на судостроительном предприятии в штатных условиях регистрации макроструктуры сварных стыков. Полученные фактические результаты эталонной оценки качества радиографического контроля реальных объектов не позволили отдать предпочтение какой-либо из систем координации фокальных пятен излучающих областей «бок» и «дно» капсулы при ориентации капсулы излучателя относительно «зоны интереса» донной и боковой поверхностями.

В этой связи практика радиографии с использованием указанных СРК и анализ конструктивной композиции формирователя коллимированного пучка излучения затворных гамма-дефектоскопов подсказывают необходимость иного подхода к исследованию поставленной задачи с учетом специфики формирования глубоко коллимированных рабочих пучков излучения, например, посредством количественной оценки эффектов конвертации излучения и генерации негативно сказывающегося на чувствительности метода шумового потока рассеянного излучения (I_{ϕ}) и несущего полезную информацию потока нерассеянного излучения (I_{π}) в цифровом формате.

В этой связи с учетом различных физических возможностей трансформации потока первичного излучения конструктивными версиями систем глубокой коллимации целесообразна количественная оценка достигаемого качества контроля с использованием цифровых технологий по фактору «сигнал/шум» (I_{π}/I_{ϕ}), который позволит оценить степень размытия изображения при несовершенстве узловых решений указанного формирователя, применении фильтра, а также использовании излучателей с нестандартными размерами активированного сердечника и в том числе геометрической ориентации капсулы излучателя в системе.

Таким образом, в сфере интереса настоящей работы оказался вопрос установления фактора «сигнал/ шум» применительно к различным системам глубокой коллимации (пирамидально-прямоугольной рис. 1 (A1-A1) и пирамидальной рис. 1 (A2-A2) в ранее описанных условиях экспонирования фокальными пятнами излучающих областей «бок» и «дно» цилиндрической капсулы источника. Система радиографического контроля для данного случая детально представлена на рисунке 1.

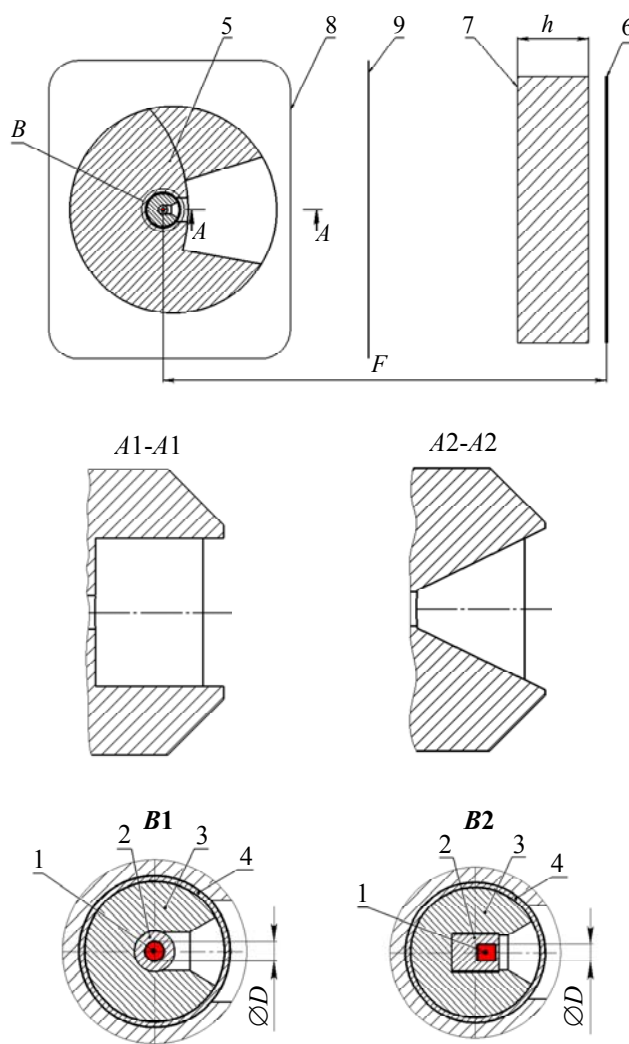


Рис. 1. Упрощенная система радиографического контроля: A1-A1 – вид в разрезе пирамидально-прямоугольной системы глубокой коллимации; A2-A2 – вид в разрезе пирамидальной системы глубокой коллимации; B1 – фокальное пятно излучающей области «бок»; B2 – фокальное пятно излучающей области «дно»; 1 – активная часть излучателя; 2 – капсула излучателя; 3 – держатель источника; 4 – гильза; 5 – защитно-коллимационный блок с затвором; 6 – пленочный детектор; 7 – объект контроля; 8 – корпус системы ручной координации пучка излучения; 9 – фильтр Pb

Взаимодействие фотонов радионуклидного излучателя на основе ^{192}Ir [4] с компонентами системы и количественное установление потоков I_f и I_p , зарегистрированных пленочно-эмульсионным детектором [5], реализовано методом математического моделирования Монте-Карло с использованием программного комплекса MCNP5 согласно расчетной модели с учетом координации фокальных пятен в положениях «дно» и «бок» в системе применительно к случаям использования фильтра Pb и излучателей в том числе с нестандартными размерами активированного сердечника. В расчетной модели заданы материалы: блок защиты на основе урана-238, держатель источника ВНЖ-95, капсула источника и втулка гнезда блока зажимы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, активная часть на основе ^{192}Ir .

Результаты моделирования по фактору «сигнал/шум» в программном комплексе MCNP5 представлены в таблице.

Визуализированные отображения распределений регистрируемых потоков гамма-излучения в различных конструктивных ис-

полнениях систем глубокой коллимации были реализованы моделированием в программном комплексе Geant4 [6] с запуском $3,7 \times 10^8$ событий распада применительно к излучателю на основе радионуклида ^{192}Ir размерами активной части $\varnothing 1,5 \times 1,5$ мм на фокусном расстоянии 150 мм с последующим построением распределения потоков (рис. 2) в среде MATLAB, а также графиков распределения интенсивности потока по осям X и Y без вклада рассеянного излучения (рис. 3).

На рис. 2 представлены карты треков распределения гамма-квантов на фокусном расстоянии 150 мм в зависимости от геометрии системы глубокой коллимации.

Максимальный размер интересующей области 150×150 мм на фокусном расстоянии 150 мм согласно РЭ на аппараты типа «Стапель5 Se75 Ir192» с системой глубокой коллимации.

В исследовательских экспериментах настоящей работы практическое применение получил снабженный системой глубокой коллимации портативный гамма-дефектоскоп заводного типа «Стапель» [2].

Таблица

ИИИ Ir192 ТУ95.930-82	Фактор «сигнал/шум»			
	Ориентация изучающей рабочей поверхности «бок» Прямоугольно-пирамидальный коллиматор	Ориентация изучающей рабочей поверхности «дно» Прямоугольно-пирамидальный коллиматор	Ориентация изучающей рабочей поверхности «бок» Пирамидальный коллиматор	Ориентация изучающей рабочей поверхности «дно» Пирамидальный коллиматор
Размер активной части ИИИ $\varnothing 1,5 \times 1,5$ мм	$22,411 \pm 0,0041$	$22,199 \pm 0,0044$	$47,539 \pm 0,0054$	$47,216 \pm 0,0053$
Размер активной части ИИИ $\varnothing 1,5 \times 1,5$ мм с фильтром 0,1 мм	$21,619 \pm 0,0054$	$21,411 \pm 0,0053$	$46,964 \pm 0,0073$	$46,463 \pm 0,0073$
Размер активной части ИИИ $\varnothing 1,5 \times 1,7$ мм	$21,622 \pm 0,0041$	$21,404 \pm 0,0044$	$46,959 \pm 0,0053$	$46,461 \pm 0,0053$
Размер активной части ИИИ $\varnothing 1,5 \times 1,7$ мм с фильтром 0,1 мм	$21,431 \pm 0,0053$	$21,167 \pm 0,0053$	$46,714 \pm 0,0074$	$45,963 \pm 0,0073$

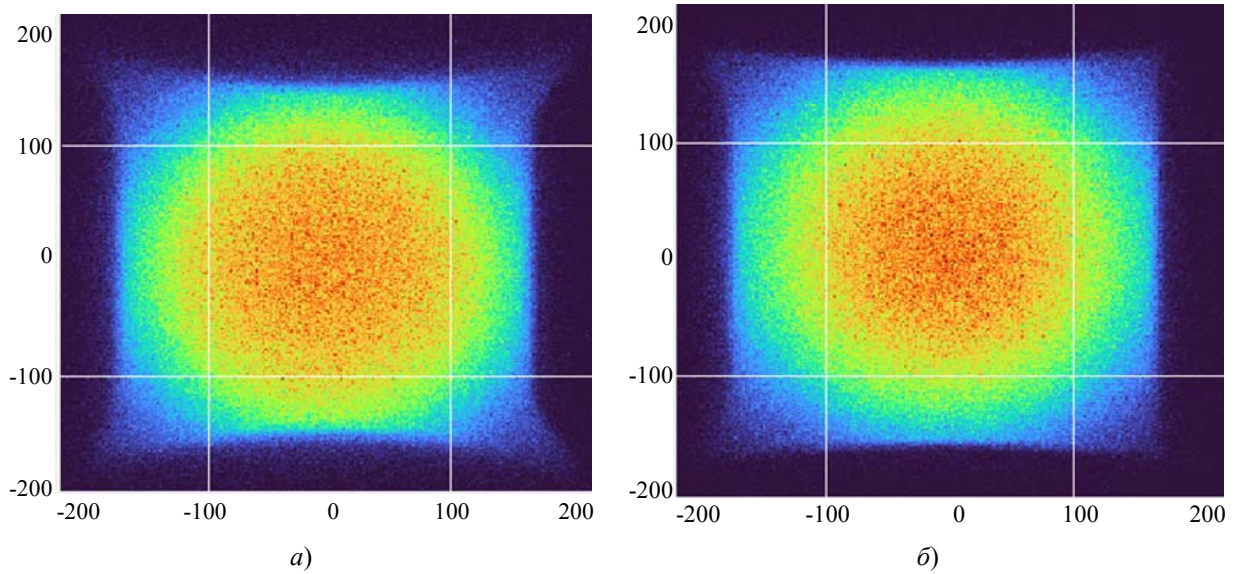


Рис. 2. Распределения потоков прямого и рассеянного излучения гамма-квантов системами глубокой коллимации: а) – пирамидально-прямоугольная; б) – пирамидальная

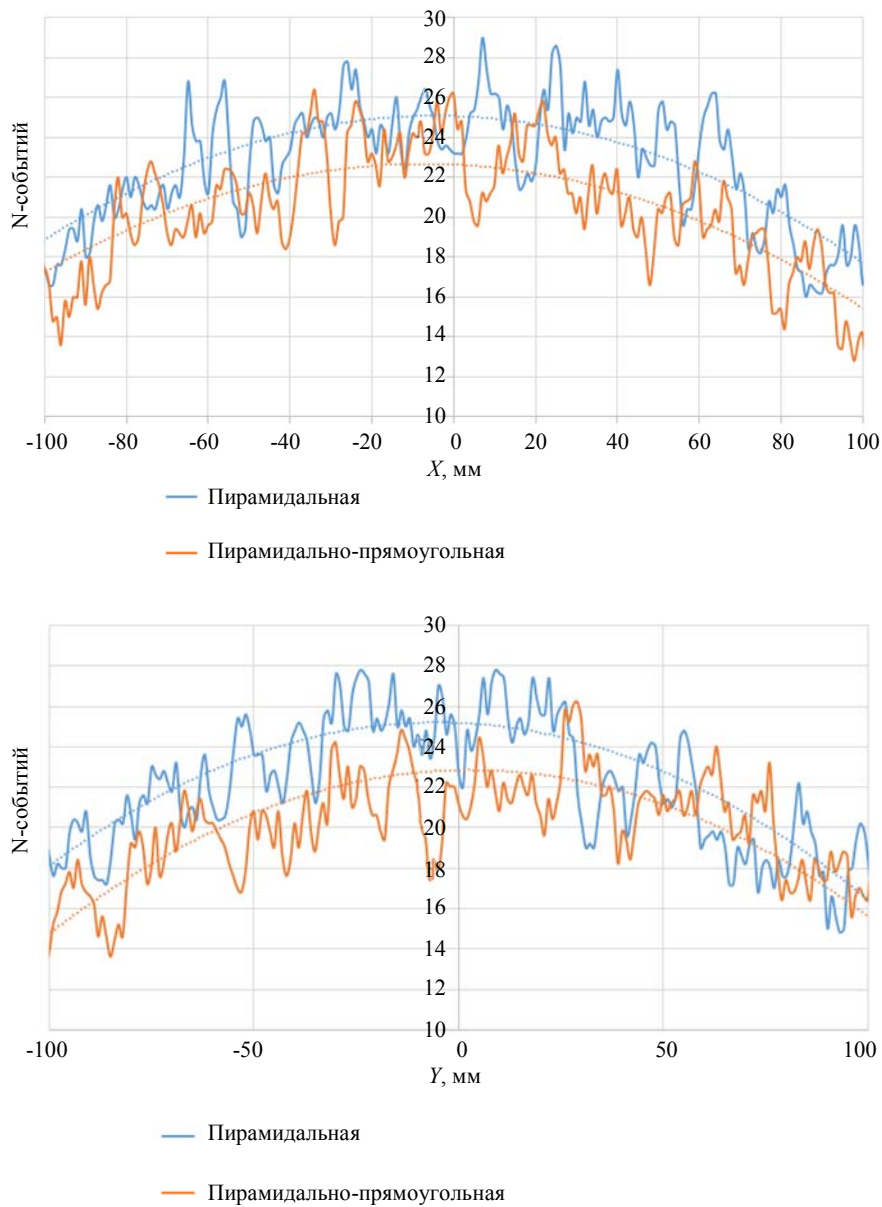


Рис. 3. Графики распределения интенсивностей потоков по осям

Максимальный размер интересующей области 150×150 мм на фокусном расстоянии 150 мм согласно РЭ на аппараты типа «Стапель5 Se75 Ir192» с системой глубокой коллимации.

В исследовательских экспериментах настоящей работы практическое применение получил снабженный системой глубокой коллимации портативный гамма-дефектоскоп затворного типа «Стапель» [2].

При апробации указанного серийного СРК в условиях конструктивной стесненности зоны контроля к основным эксплуатационным недостаткам отнесена низкая прецизионность координации условной геометрической оси коллимированного пучка излучения по центру «зоны интереса» объекта контроля, что негативно отражается на качестве регистрируемой информации вследствие высокой вероятности смещений зоны облучения за пределы «зоны интереса», регистрации при этом эффектов обратно-рассеянного излучения от сопредельных конструкций, а также повышения радиационной опасности, сопряженной с повышением лучевых нагрузок на персонал и окружающую среду.

В этой связи АО «ЭМИ» разработано патентованное техническое решение (№ 2791427) [7] обновленной модели затворного гамма-дефектоскопа, обеспечивающее визуализированную координацию траектории нацеливания центра рабочего пучка гамма-излучения в ручном режиме относительно точно обозначенного центра «зоны интереса» объекта контроля. Это техническое решение реализовано конвертацией штатной откидной ручки переноса, армированной острофокусным генератором лазерного излучения, для визуализированного сопровождения траектории курсовой направленности виртуальной геометрической оси пучка гамма-излучения оператором совмещением точечной проекции узконаправленного лазерного луча с ранее маркированным центром «зоны интереса» объекта контроля.

Выводы

1. Расчетные данные фактора «сигнал/шум» полученных с применением ПК позволяют констатировать: пирамидальная система глубокой коллимации в ≈ 2 раза улучшает соотношение «сигнал/шум» (таблица

в сравнении с прямоугольно-пирамидальной, что должно сказаться на уменьшении размытия изображения.

2. Согласно расчетным данным (таблица) фильтр из Pb толщиной 0,1 мм не уменьшает вклад шумового эффекта.

3. Ориентация капсулы излучателя относительно «зоны интереса» фокальным пятном излучающей области «дно» незначительно увеличивает вклад шумового эффекта и $< 1\%$ ухудшает параметры фактора «сигнал/шум» в связи с внутренним самопоглощением. Исходя из этого ориентация капсулы фокальным пятном излучающей области «бок» или «дно» безразлично.

4. Пирамидальная система глубокой коллимации позволяет уменьшить вес затворного узла в $\approx 1,4$ раза, вследствие чего увеличивается устойчивость к динамическим нагрузкам в условиях аварийного транспортирования.

5. Интенсивность потока прямого нерассеянного излучения пирамидальной системы глубокой коллимации выше по оси X в 1,11 раз по оси Y в 1,1 раза, что видно из графиков рис. 3.

6. Создано оригинальное техническое решение № 2791427 координации виртуальной геометрической оси коллимированного пучка излучения относительно «зоны интереса» с целью увеличения прецизионности, уменьшения шумовых эффектов обратно рассеянного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ТУ95.930-82 Источники гамма-излучения закрытые на основе радионуклида иридий-192. Технические условия.
2. Хорошев В. Н. и др. Гамма-дефектоскоп. Патент № 2418290 (РФ). 2011.
3. IAEA Nuclear Data Section [Электронный ресурс]. URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.
4. MCNP [Электронный ресурс]. URL: <https://mcnp.lanl.gov/manual.html>
5. Деконков А. С. Исследования методов радиографического контроля кольцевых сварных соединений узлов ядерных реакторов: дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2012.
6. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. / Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. Vol. 506. P. 250–303.
7. Деконков А. С. и др. Гамма-дефектоскоп затворного типа. Патент № 2791427 (РФ). 2023.

Quantitative assessment of the quality of radiographic control, taking into account the specifics of generation and formation of working beams of penetrating radiation

A. S. Dekopov¹, A. A. Lukyanov^{1,2,*}, S. P. Maslennikov² and S. V. Mikhailov¹

¹ Joint Stock Company «Energomontazh International», Moscow, 107078 Russia

² National Research Nuclear University MEPhI, Moscow 115409 Russia

Received 5.06.2025; revised 27.06.2025; accepted 20.10.2025

The paper presents a quantitative assessment of the quality of radiographic testing taking into account the features of formation of working beams of penetrating radiation by various design versions of deep collimation systems in portable radiographic testing devices of the shutter type equipped with sources based on the radionuclide ¹⁹²Ir, generating flows of ionizing radiation by focal spots of the emitting working surfaces "bottom" and "side" of the cylindrical capsule of the emitter. Mathematical modeling of the interaction of gamma radiation with elements of deep collimation systems of various geometries was carried out using the MCNP5 and Geant4 software packages. It was found that the use of a pyramidal deep collimation system allows improving the signal-to-noise ratio by approximately two times compared to a rectangular-pyramidal one, which helps to improve the quality of the recorded image and reduce the weight and size characteristics of the equipment. In addition, the orientation of the emitter capsule relative to the "zone of interest" by the focal spot of the emitting region "bottom" slightly increases the contribution of the noise effect and <1% worsens the parameters of the "signal/noise" factor.

Keywords: deep collimated system; noise effect; signal-to-noise factor; gate-type gamma-ray flaw detector.

REFERENCES

1. TU95.930-82 Sealed emission sources based on iridium-192 radionuclide. Technical conditions.
2. Khoroshev V.N. et al., Gamma detector. Patent № 2418290 (RF). 2011.
3. MCNP. Electronic resource: URL: <https://mcnp.lanl.gov/manual.html>
4. IAEA Nuclear Data Section. Electronic resource: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>
5. Dekopov A. S. Research of methods of radiographic testing of ring welded joints of nuclear reactor units: diss. Candidate of Technical Sciences. M., 2012.
6. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al., Nucl. Instrum. Meth. A **506**, 250–303 (2003).
7. Decopov A. S. et al. Gamma-defectoscope of shutter type. Patent № 2791427 (RF). 2023.

Об авторах

Декопов Андрей Семенович, к.т.н., заслуженный работник атомной промышленности, консультант, Акционерное общество «Энергомонтаж Интернэшнл» (107078, Россия, Москва, Красноворотский проезд, д. 3, стр. 1). E-mail: 16deko29@mail.ru AuthorID: 647102

Лукьянов Александр Андреевич, аспирант, Акционерное общество «Энергомонтаж Интернэшнл» (107078, Россия, Москва, Красноворотский проезд, д. 3, стр. 1). Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, 31). E-mail: lukyanov_a_a@bk.ru SPIN-код: 9321-1309, AuthorID: 1215288

Маслеников Сергей Павлович, д.т.н., доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, 31). E-mail: spmaslennikov@mephi.ru SPIN-код: 8452-5020, AuthorID: 113692

Михайлов Сергей Владимирович, директор СКБ, Акционерное общество «Энергомонтаж Интернэшнл» (107078, Россия, Москва, Красноворотский проезд, д. 3, стр. 1). E-mail: svm@jscei.ru