

НОВЫЙ СПОСОБ И УСТАНОВКА ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ γ-РАДИОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТРОСКОПИИ МАССИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ И ЗАГОТОВОК ИЗ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ

© 2019 г. М.А. Горбунов¹, С.В. Дудин^{1,**}, О.В. Игнатьев^{1,*}, Е.А. Купчинская¹, А.В. Купчинский¹,
С.Г. Морозов¹, А.А. Пулин¹

¹ УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19
E-mail: *ignatyev47@gmail.com; **serddudin@gmail.com

Поступила в редакцию 13.05.2019; после доработки 24.06.2019

Принята к публикации 05.07.2019

Предложен способ и установка γ-интроскопии с «электронной фокусировкой» прошедших через исследуемый объект γ-квантов. Установка содержит мощный ⁶⁰Со-источник; устройство позиционирования исследуемого объекта; измерительный комплекс, включающий тонкий сцинтилляционный координатный детектор-рассеиватель с 64-мя кремниевыми фотоумножителями (SiPM) и цифровыми процессорами детекторных импульсов (PDP), сцинтилляционный детектор полного поглощения с аналого-цифровым PDP, узел отбора событий по совпадениям и энергиям и on-line вычисления координат, интерфейс связи с персональным компьютером.

Достигнутое на толстых объектах пространственное разрешение составляет $\approx 400 \mu\text{m}$. Теоретический предел — $\approx 50 \mu\text{m}$.

Ключевые слова: радиография, комптоновская γ-камера, детектор-рассеиватель, детектор полного поглощения.

DOI: 10.1134/S0130308219100063

ВВЕДЕНИЕ

В современной промышленности для выявления внутренних дефектов в массивных металлических объектах широко применяется γ-радиографическая интроскопия. Типовая схема установки приведена на рис. 1. Принцип действия предельно прост. Источник «просвечивающего» излучения расположен на таком расстоянии, чтобы поток испускаемых им γ-квантов мог считаться параллельным. Расстояние определяется из простых геометрических соображений, которые принимают во внимание размеры собственно излучателя, размеры ожидаемых дефектов и допустимую величину геометрического «размытия» получаемого изображения. В качестве источника излучения используют линейные ускорители, бетатроны и радионуклидные источники (обычно ⁶⁰Со). Энергия γ-квантов должна составлять несколько мэВ, чтобы не происходило полное их поглощение в исследуемом образце.

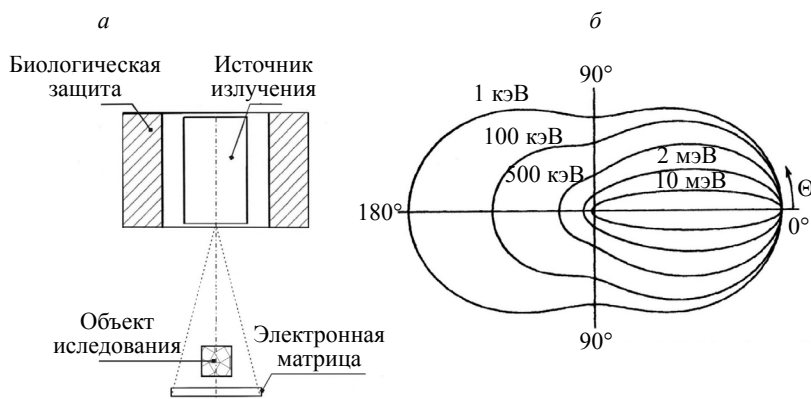


Рис. 1. Схема типовой радиографической установки (а) и диаграмма направленности комптоновски рассеянных в объекте γ-квантов в функции от их исходной энергии [1] (б).

В качестве регистратора ранее применяли мелкозернистую рентгеновскую фотопленку, теперь же ее все чаще заменяют различными кремниевыми микропиксельными запоминающими пластинами [1]. Для увеличения эффективности регистрации применяют свинцовые экраны-конверторы толщиной 50 — 200 мкм [2].

Существуют задачи, где требуется обнаружение субмиллиметровых дефектов (≥ 100 мкм) в объектах из тяжелых металлов ($Z \geq 82$) с линейными размерами до 100 мм. Традиционные методы γ -радиографии в лучшем случае при этих условиях позволяют обнаружить дефект с характерными размерами от 1000 до 700 мкм.

ФАКТОРЫ ДЕГРАДАЦИИ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ γ -ИНТРОСКОПОВ

Существует, на наш взгляд, два фундаментальных фактора, влияющих на качество изображения. Их можно условно поделить на 2 группы:

1. Размытие изображения в координатном регистраторе (рентгеновская пленка или Si-матрица).
2. Рассеяние первичного излучения в исследуемом объекте.

Влияние процессов в регистраторе иллюстрирует рис. 2.

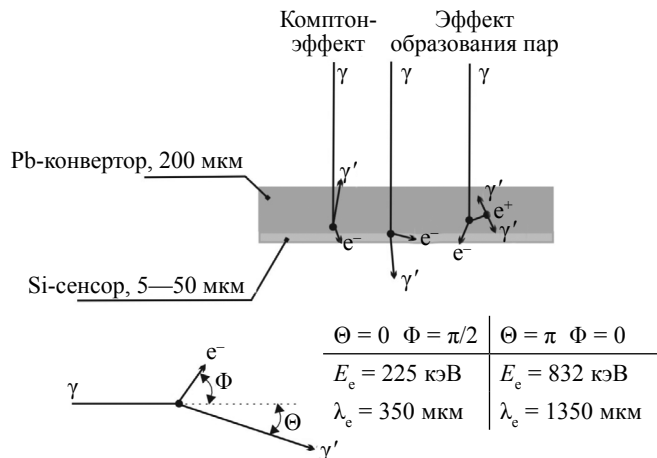


Рис. 2. Сценарии образования в Pb-экране электронов, создающих изображение в фотосенсоре (пленка или кремниевая матрица). Энергия рассеиваемых квантов $E_\gamma \leq 1,332$ кэВ (источник ^{60}Co).

Основные процессы взаимодействия γ -квантов, прошедших через исследуемый объект — комптоновское рассеяние (преобладает при $E_\gamma = 1,332$ кэВ) и эффект образования пар. Возвращаясь к диаграммам направленности на рис. 1, можно отметить, что большинство рассеянных квантов отклоняется на незначительные углы Θ , а это означает рассеяние электронов отдачи на углы Φ вплоть до 90° — почти параллельно поверхности регистратора. Средняя длина пробега электронов в кремнии оказывается в несколько раз больше упомянутых выше 100 мкм (см. рис. 2). Связь между углами рассеяния квантов и электронов дается выражением [4]:

$$\text{Cot}(\Theta/2) = (1 + E_\gamma/m_e c^2) \times \tan\Phi, \quad (1)$$

где E_γ — энергия исходного γ -кванта; $m_e c^2$ — энергия покоя свободного электрона

Известно [1], что для электронов с исходными энергиями от 50 кэВ до 10 мэВ во всех веществах справедливо соотношение

$$\lambda_e \times \rho \approx \text{const}, \quad (2)$$

где λ_e — длина пробега в веществе электронов с данной исходной энергией; ρ — плотность вещества, г/см³.

Исходя из этого, логично полагать, что замена координатного детектора из легкого материала (рентгеновская пленка или кремний) на Anger-камеру из тонкого сцинтилляционного кристалла с высокой плотностью и множеством полупроводниковых фотосенсоров, уменьшит эту составляющую погрешности в несколько раз.

Главная же причина низкой контрастности 2D-изображений, получаемых традиционными способами, состоит в рассеянии первичного «просвечивающего» излучения веществом массивного объекта исследования (рис. 3). Идеальный случай — формирование изображения квантами «1» и «2». Кванты «3» и «4» затушевывают картину.

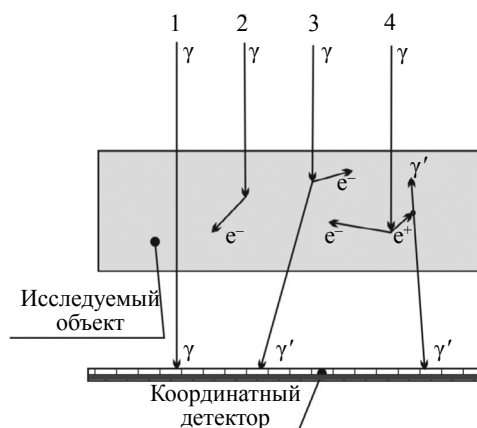


Рис. 3. Рассеяние γ -квантов в исследуемом объекте. Четкое изображение формируется квантами «1» и «2».

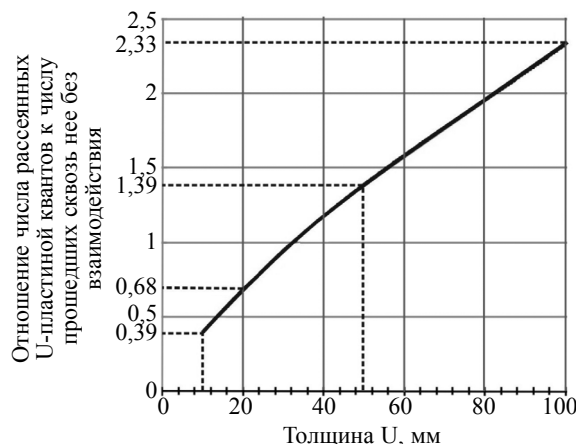


Рис. 4. Зависимость отношения числа рассеянных в образце γ -квантов к числу прошедших через него без взаимодействия в функции от толщины пластины.

Проведенное нами моделирование в пакете GEANT4 [5] для образцов из урана и источника ^{60}Co показало значительный рост относительной доли рассеянных γ -квантов («3» и «4») с ростом толщины просвечиваемого объекта (рис. 4). По-видимому, именно в этой зависимости кроется объяснение феномена того, что средствами классической радиографии удастся обнаруживать лишь дефекты с линейными размерами L_d , превышающими (0,7—1,0) % от толщины просвечиваемого образца из тяжелого металла [3].

Очевидно, что для повышения контрастности получаемых 2D-изображений необходимо:

- уметь различать на выходе исследуемого образца рассеянные и исходные γ -кванты;
- исключить регистрацию рассеянных γ -квантов.

Есть всего лишь одна возможность различить прямые и рассеянные γ -кванты — по величине их энергии. Это означает, что в качестве их источника должен быть использован γ -радионуклид. Линейные электронные ускорители и бетатроны автоматически исключаются из-за сплошного спектра тормозного излучения. Возникает вопрос о том, как одновременно измерять энергию и координату кванта с субмиллиметровой точностью? Координатные детекторы в виде матрицы из сцинтилляторов, применяемые в медицине при энергиях до 500 кэВ, обеспечивают пространственное разрешение в несколько мм при весьма низкой эффективности регистрации и высокой стоимости.

СПОСОБ ГАММА-РАДИОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В мировой практике распространены т.н. γ -телескопы (или комптоновские гамма-камеры (медицина, астрономия)), позволяющие получить изображение излучающего объекта [6] путем восстановления траекторий отдельных γ -квантов. Схематическое изображение γ -камеры приведено на рис. 5. Отбор событий для формирования изображения ведется по совпадению во времени срабатываний двух детекторов и равенству суммы энергий, оставленных в них энергии первичных квантов.

Не вдаваясь в подробности, можно сказать, что применение традиционной комптоновской γ -камеры для целей γ -интроскопии массивных объектов из тяжелых металлов с субмиллиметровым пространственным разрешением практически невозможно. Это обусловлено устройством координатного детектора полного поглощения. Обычно это матрица 8×8 оптически изолированных сцинтилляторов. К детектору полного поглощения предъявляются конкурирующие требования. Высокая эффективность регистрации требует сантиметровых размеров элементарных кристаллов в матрице, а позиционное разрешение — субмиллиметровых. Противоречие вроде бы снимается увеличением расстояния d до таких значений, чтобы угол, под которым из точки на рассеивателе видится один элемент поглотителя, составлял десятые доли градуса. При сечении элемента матрицы 6×6 мм (характерный размер кремниевого фотоумножителя) для получения эффективного сечения одного элемента поглотителя $0,1 \times 0,1$ мм расстояние между детекторами составляет

$$d = 3015 \text{ мм.} \quad (3)$$

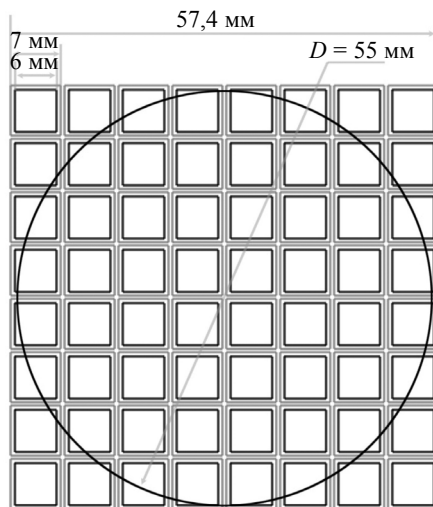


Рис. 7. Детектор-рассеиватель. Пустые квадраты — SiPM SensL.

При взаимодействии γ -кванта со сцинтиллятором возникает короткая сцинтилляционная вспышка с числом фотонов света, пропорциональным оставленной энергии. Для $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ световыход (LY) составляет 61000—65000 фотон/мэВ. Модуль сбора и обработки данных суммирует амплитуды сигналов от 64-х PDP и определяет энергию, оставленную в сцинтиляторе. Энергетическое разрешение координатного детектора по линии ^{137}Cs ($E_\gamma = 661,7$ кэВ) составляет 10 %. Эффективность конверсии исходных γ -квантов в комптоновские составляет 11,5 %.

Координаты точки взаимодействия определяются в реальном времени согласно выражениям:

$$X = \sum_{i=1}^{n=64} (x_i \times E_i) / \sum_{i=1}^{n=64} E_i, \quad (4a)$$

$$Y = \sum_{i=1}^{n=64} (y_i \times E_i) / \sum_{i=1}^{n=64} E_i, \quad (4б)$$

где x_i и y_i — координаты i -го SiPM; E_i — энергия (амплитуда) в канале i -го SiPM.

Благодаря процедуре «взвешивания», согласно выражениям (4), удастся определять координату с точностью до долей размеров SiPM. По нашим оценкам эффективный размер фотосенсора составляет не 6×6 мм, а 350×350 мм.

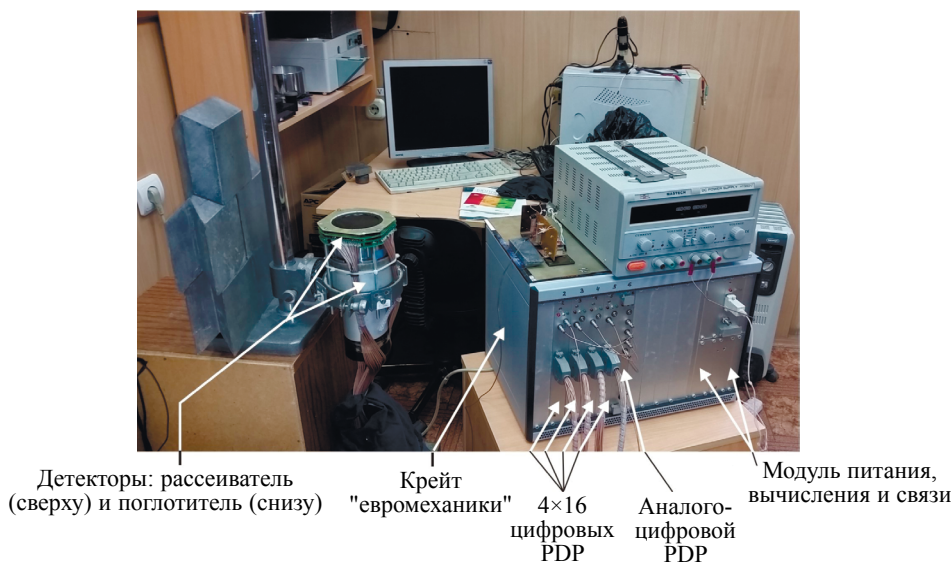


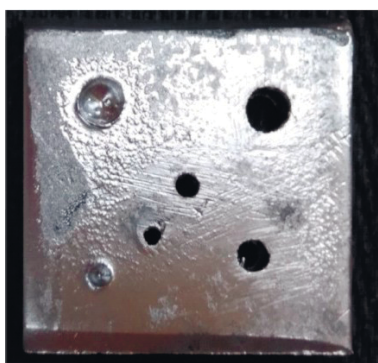
Рис. 8. Общий вид измерительного комплекса интроскопа.

Детектор полного поглощения представляет собой кристалл $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ в виде цилиндра размерами $\varnothing 70 \times 38$ мм с приклеенным к нему через световод из оргстекла вакуумным фотоумножителем (PMT) R6233 (Hamamatsu) с диаметром фотокатода 70 мм. Сигналы с него поступают на аналого-цифровой процессор детекторных импульсов, выполняющий те же функции, что цифровые PDP. Энергетическое разрешение спектрометра полного поглощения составляет 4 %.

Общий вид измерительного комплекса интроскопа показан на рис. 8. Все 65 процессоров детекторных импульсов, модуль сбора и обработки информации, источники питания детекторов и интерфейс для связи с компьютером посредством Ethernet размещены в одном крейте «евромеханики».

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ИСПЫТАНИЙ УСТАНОВКИ

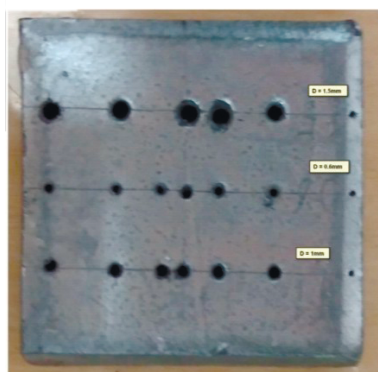
В качестве источника излучения использовался гамма-терапевтический аппарат «Агат» с радионуклидом ^{60}Co активностью ≈ 1000 Кюри. Просвечивались «сэндвичи», состоявшие из специально подготовленных свинцовых пластин толщиной 5 мм с нанесенными дефектами (рис. 9), Та-мультипинового коллиматора толщиной 30 мм (64 отверстия $\varnothing 1,0$ мм) и двух свинцовых защитных блоков общей толщиной 100 мм.



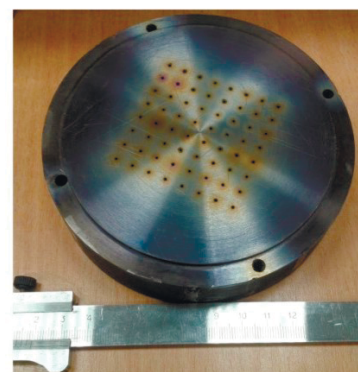
Образец 1: Pb, четыре сквозных отверстия диаметрами 4, 3, 2 и 1,5 мм и два отверстия (4 мм и 2 мм) глубиной 2 мм.



Образец 2: Pb, две перпендикулярные друг другу борозды глубиной 2 и 0,5 мм.



Образец 3: Pb, три линейки сквозных отверстий диаметрами 1,5; 0,6; 1,0 мм.



Та-коллиматор: толщина 30 мм; 64 отверстия диаметрами 1,0 мм.

Рис. 9. Исследовавшиеся образцы и Та-коллиматор.

Результаты измерений и обработки изображений приведены на последующих рисунках. К сожалению, из-за крайне ограниченного срока аренды мощного γ -излучателя не удалось обеспечить оптимальные условия измерений. На их результатах сказались геометрические факторы деградации пространственного разрешения: расстояние от собственно γ -радионуклида до «сэндвича» составляло всего около полутора метров (этого было бы достаточно при диаметре сечения радио-

нуклида в 1 мм); не удалось, как выяснилось позже, направить поток квантов перпендикулярно поверхности детектора-рассеивателя из-за того, что для увеличения расстояния головку аппарата пришлось устанавливать под отличным от 90° углом к горизонту (эллипсоидные отверстия коллиматора на изображениях).

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При планировании практического применения установки возникает ряд вопросов.

1. Как влияет толщина просвечиваемого объекта на чувствительность установки к размерам дефектов?

В соответствии с законом Бугера—Ламберта—Бера, описывающим ослабление потока γ -квантов веществом, мы имеем в каждой **точке** на кристалле-рассеивателе:

$$I_f = I_0 \times \exp(-v \times \rho \times L_s), \quad (5a)$$

$$I_d = I_0 \times \exp[-v \times \rho \times (L_s - L_d)], \quad (5b)$$

где I_0 — интенсивность γ -квантов первичного излучения источника в каждой точке на поверхности объекта, ph/s ; I_f — интенсивность *первичных* γ -квантов в точках на обратной стороне объекта над которыми в его теле нет микропустот; I_d — интенсивность *первичных* γ -квантов в «поддефектных» точках на обратной стороне объекта; v — массовый коэффициент ослабления, $см^2/г$; ρ — плотность вещества, $г/см^3$; L_s и L_d — толщины объекта и дефекта соответственно, $см$.

Отношение интенсивностей (контрастность в точке)

$$C_p = I_d / I_f = \exp(v \times \rho \times L_d). \quad (6)$$

Два важных вывода следуют из выражения (6):

- а) отношение интенсивностей никак не зависит от толщины исследуемого объекта;
- б) чем более плотным является объект и чем выше его Z , тем выше, при прочих равных условиях, оказывается контрастность — дефекты в Pu должны обнаруживаться проще, чем в U .

2. Как зависит чувствительность анализа от относительных размеров фотосенсоров (координатного разрешения)?

Предположим, что мы знаем точное расположение дефекта с площадью сечения S_d в перпендикулярной направлению облучения плоскости в исследуемом объекте. Поставим напротив дефекта с противоположной от излучателя стороны один элемент координатного детектора площадью S_{PM} (сцинтиллятор, совпадающий по размерам с размерами SiPM). Гамма-проекция дефекта перекрывает только часть SiPM, расположенного под ним, и очевидно, что скорости счета R_d от части детектора-рассеивателя, покрытой проекцией пустотного дефекта, и R_f от остальной его части будут соотноситься не просто как $C_p/1$. Очевидно, что

$$R_{f-d} = \varepsilon \times I_f \times (S_{PM} - S_d) / S_{PM}, \quad (7)$$

где R_{f-d} — скорость счета от «бездефектной» части элементарного детектора; ε — эффективность регистрации детектора-рассеивателя.

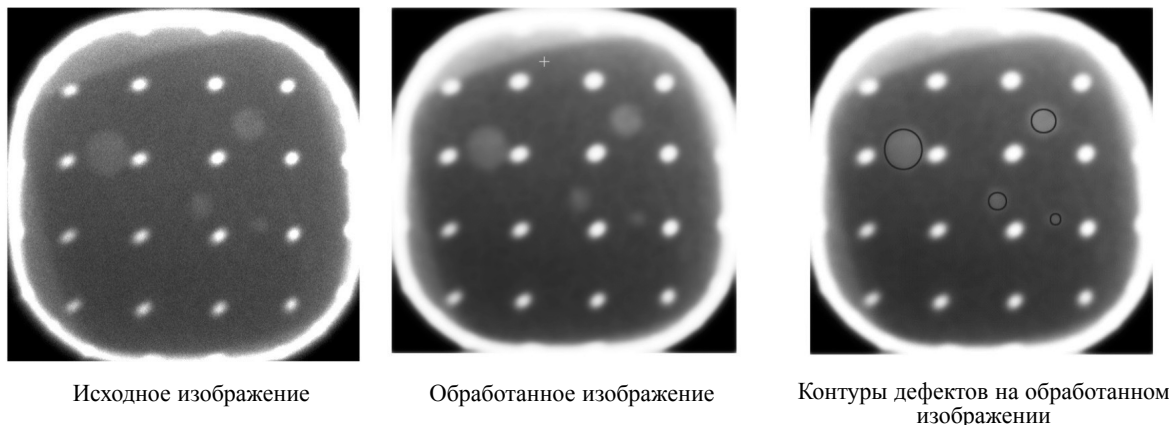


Рис. 10. Результаты измерения образца № 1.

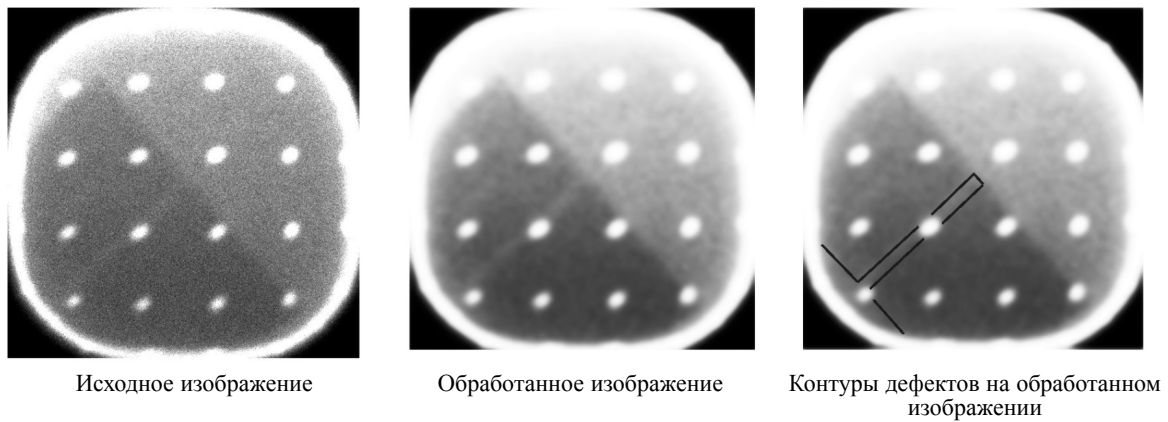


Рис. 11. Результаты измерения образца № 2.

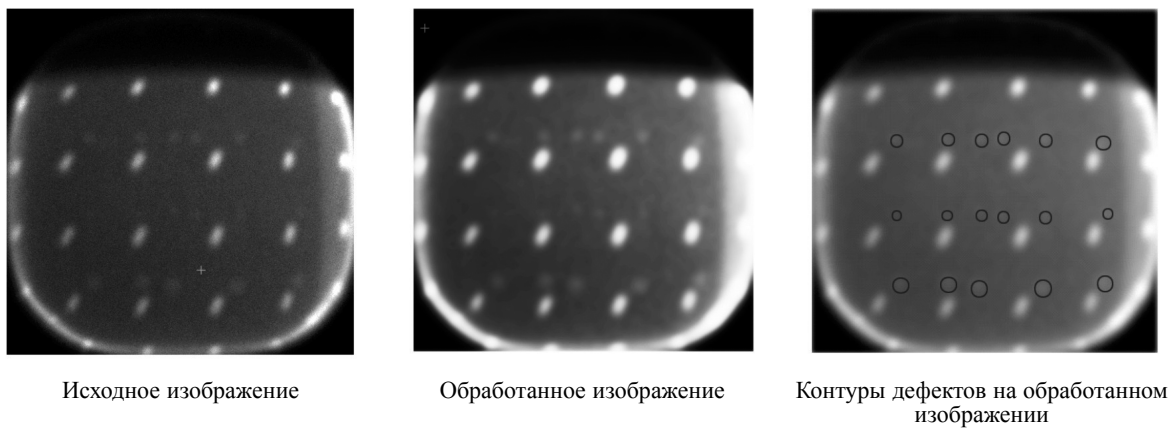


Рис. 12. Результаты измерения образца № 3. Тень обусловлена неудачной установкой свинцовой защиты, примененной для снижения паразитной статистической загрузки от рассеянного в воздухе излучения.

Скорость счета от «поддефектной» части элементарного детектора

$$R_d = \varepsilon \times I_f \times C_p \times S_d / S_{PM}. \quad (8)$$

Суммарная скорость счета по выходу SiPM под дефектом составит

$$R_{\Sigma_d} = R_{f-d} + R_d. \quad (9)$$

Контрастность измерений элементарным детектором C_e по аналогии с (6) дается выражением

$$C_e = (R_{f-d} + R_d) / R_{\Sigma_f}, \quad (10)$$

где R_{Σ_f} — скорость счета фотосенсором, над которым нет дефекта.

Для нахождения R_{Σ_f} необходимо в (6) и (8) положить $C_p = 1$, а в (7) и (8) — $S_d = 0$. Выполнив эти условия, получаем $R_{\Sigma_f} = \varepsilon \times I_f$.

Чрезвычайно важной характеристикой является относительная разность скоростей счета по выходу фотосенсора при наличии дефекта над ним и без него (дифференциальная контрастность):

$$DC = (R_{\Sigma_d} - R_{\Sigma_f}) / R_{\Sigma_f}. \quad (11)$$

Реальный координатный детектор-рассеиватель представляет собой матрицу 8×8 из SiPM (6×6 мм) и координата взаимодействия γ -кванта со сцинтиллятором находится “взвешиванием” сигналов нескольких одновременно засвеченных фотосенсоров. Как было упомянуто выше, за счет процедуры “взвешивания” вместо 64-х SiPM с размерами 6×6 мм мы имеем $293,88 \times 64$ виртуальных SiPM с эффективными размерами 350×350 мкм.

Таблица 1

Расчетные зависимости времен экспозиции от размеров дефектов

Сторона кубического дефекта, мм	Дифференциальная контрастность $DC=(R_{\Sigma d}-R_{\Sigma f})/R_{\Sigma f}$	Требуемая статистика по 1 SiPM			По всему рассеивателю N_{SD}	$3\sigma T_{meas}$ (99,8%), м (ч)	$2\sigma T_{meas}$ (95%), м (ч)	$1\sigma T_{meas}$ (68,3%), м (ч)
		N_v (виртуальный SiPM)	N_{3mm} (одиночный SiPM 3×3 мм)	N_{6mm} (одиночный SiPM 6×6 мм)				
0,25	0,01498804	$4,01 \cdot 10^4$	$294,4 \cdot 10^4$	$1177,3 \cdot 10^4$	$75,4 \cdot 10^7$	$1,26 \cdot 10^4$ (209)	$5,6 \cdot 10^3$ (92,9)	$1,4 \cdot 10^3$ (23,3)
0,40	0,04741511	$4,00 \cdot 10^3$	$294,1 \cdot 10^3$	$1176,5 \cdot 10^3$	$75,3 \cdot 10^6$	$1,25 \cdot 10^3$ (20,9)	560 (9,3)	139 (2,3)
0,55	0,06576977	$2,08 \cdot 10^3$	$152,9 \cdot 10^3$	$611,4 \cdot 10^3$	$39,1 \cdot 10^6$	$0,65 \cdot 10^3$ (10,9)	290 (4,8)	72,5 (1,2)
0,70	0,08444608	$1,26 \cdot 10^3$	$92,7 \cdot 10^3$	$370,9 \cdot 10^3$	$23,7 \cdot 10^6$	$0,40 \cdot 10^3$ (6,60)	175 (2,93)	44,0 (0,73)

Численные значения дифференциальной контрастности DC, требуемого числа событий N на каждый сенсор и времени экспозиции для достижения заданной статистической точности T_{meas} в функции от размеров дефектов содержатся в табл. 1. При расчетах положено, что скорость накопления отобранных координат составляет $10^3/\text{с}$ (экспериментальное значение).

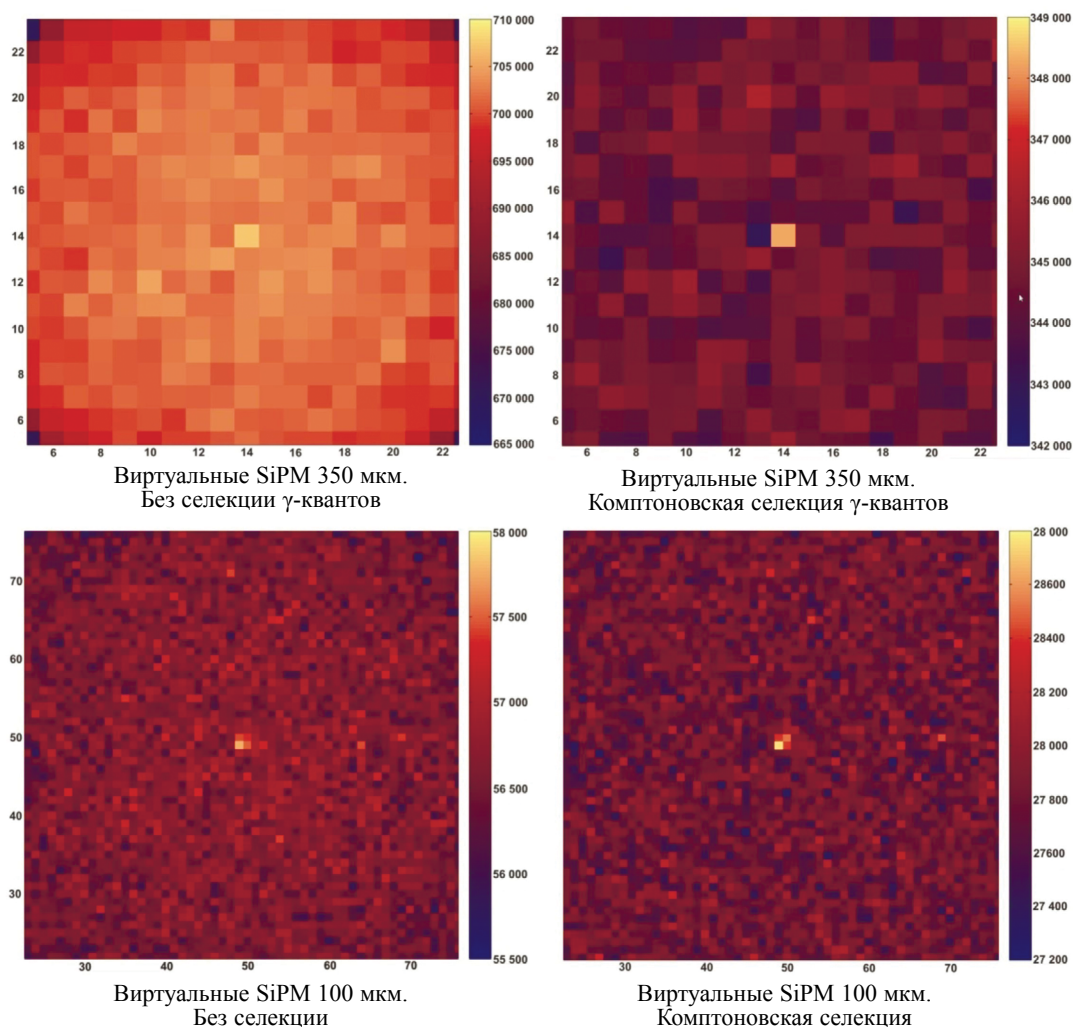
Из данных табл. 1 следуют выводы:

1. Нет смысла, с точки зрения времени экспозиции, пытаться обнаруживать дефекты с размерами в поперечнике меньшими, чем размеры виртуального фотосенсора — можно сравнить данные для дефекта со стороной 250 мкм и 400 мкм. Требуемая статистика отличается на порядок! Видно, что замена примененных SiPM на меньшие (3×3 мм) позволит почти вдвое увеличить координатную разрешающую способность интроскопа. Данные моделирования, показанные на рис.13, иллюстрируют сказанное.

2. Совершенно очевидно, что скорость накопления координат отобранных событий $\approx 10^3$ 1/с явно недостаточна. Можно проанализировать причины низкой скорости формирования изображения.

Из потока гамма-квантов с $E_\gamma = 1.33$ мэВ взаимодействуют с тонким кристаллом-рассеивателем (5 мм LaBr₃) по механизму комптоновского рассеяния лишь $\approx 11,5\%$, $0,35\%$ — полностью поглощаются в «рассеивателе», а остальные 88,15 % проходят без взаимодействия и попадают в кристалл полного поглощения. Таким образом, в первом приближении в детектор-поглотитель попадает почти 99 % потока квантов, направленных на кристалл-рассеиватель. Статистическая загрузка по входу электронного канала детектора-поглотителя оказывается в 8,4 раза выше, чем суммарная загрузка по всем 64-м каналам детектора-рассеивателя. Более того, детектор полного поглощения регистрирует значительный поток рассеянного в воздухе первичного излучения, требуется организация защиты большого кристалла от фонового излучения. Отсюда следует, что именно быстроедействие спектрометра с детектором-поглотителем в первую очередь определяет времена получения контрастных гамма-снимков.

Быстродействие созданного спектрометра полного поглощения характеризуется величинами максимальных статистических загрузок по входу $R_{i,max} \approx 1,9 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$ и по выходу $R_{o,max} \approx 7,0 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$ (определяет быстродействие интроскопа). При указанном значении $R_{o,max}$ длительность сформированных детекторных импульсов T_w составляет 525 нс, а максимум квазитрехугольных сигналов T_{peak} достигается через 200 нс после их возникновения. Естественным ограничением в сокращении T_w и, соответственно, увеличении $R_{o,max}$, является необходимость достаточно полного сбора фотонов света вспышки. Сцинтиллятор LaBr₃:Ce один из самых быстрых неорганических сцинтилляторов. Его постоянная времени высвечивания τ_F составляет всего 16 нс. Если $T_{peak} = 4\tau_F = 64$ нс, то в формировании спектрометрического импульса поучаствует 97 % фотонов вспышки. Есть возможность выполнить условие $T_w = 2T_{peak} = 128$ нс. В этом случае $R_{o,max} = 1/e \times T_w = \leq 2,87 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$. Это четырехкратное увеличение быстродействия канала полного поглощения. Следующий этап работ — увеличение быстродействия детектора-рассеивателя и его электронных каналов. Дело в том, что SiPM SensL имеют постоянную времени восстановления после образования лавины 50 нс. Полное восстановление, с точностью до 0,1 %, занимает $6,9 \times 50 = 345$ нс соответственно для этого канала $R_{o,max} \geq 1,05 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$. Знак $\geq$ употреблен вместо знака равенства из-за того, что при возникновении сцинтилляции засвечиваются не все 64 фотосенсора. Ситуация облегчается тем, что детектор-рассеиватель регистрирует лишь 12 % событий.



U, толщина 50 мм. Дефект в виде пустого куба со стороной 250 мкм

Рис. 13. Моделирование 0,25 мм дефекта в заготовке толщиной 5 см. Сопоставимые контрастности снимков достигаются при почти вдвое меньшей статистике, если применена селекция γ -квантов.

ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

1. Созданный измерительный комплекс опытной установки может практически использоваться для поиска дефектов с характерными размерами от 400 мкм при условии применения последующей матобработки изображений для компенсации недостаточной статистики.

2. Время экспозиции при достаточной активности источника, а также пространственное разрешение, «в идеале» не зависят от толщины объекта и размеров фотосенсоров, если эффективный размер фотосенсора (350×350 мкм) не превышает размер дефекта. Важны размеры дефекта, плотность и Z вещества объекта (чем выше, тем лучше). Есть практическая возможность уменьшения эффективного размера фотосенсоров до 200×200 мкм (замена сенсоров 6×6 мм на 3×3 мм с увеличением числа каналов регистрации).

3. Существуют реальные, технически реализуемые решения, позволяющие как минимум в 2-3 раза уменьшить время получения одного гамма-снимка.

4. В будущем возможна двухрежимная работа интроскопа:

а — быстрый поиск крупных дефектов в режиме классического интроскопа (отключен детектор полного поглощения, скорость набора возрастает на порядок);

б — тщательный просмотр подозрительных областей в режиме комптоновского γ -телескопа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Knoll G.F.* Radiation Detection and Measurement (3-rd Edition). John Wiley & Sons, Inc., 2000. 802 p.
2. *Marinho C.A., Rebello J., Lopes R.* Film replacement by digital techniques applied to weld inspection // Radiology and Radiography Methods. 2010. № 8. 15 p. http://www.ultrasonic.de/article/ecndt2010/reports/1_04_15.pdf
3. Неразрушающий контроль / Справочник. В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.1. М.: Машиностроение, 2008. 560 с.
4. *Jevremovic T.* Nuclear Principles in Engineering (2-nd edition). Springer, 2009. 546 p.
5. GEANT4. Simulation toolkit. <https://geant4.web.cern.ch>
6. *Kong Y., Brands H., Glaser T., Herbach Claus-M., Hoy L., Kreuels M., Küster M., Pausch G., Petzoldt J., Plettner C., Preston J., Roemer K., Scherwinski F., Teofilov N., Verity J., Wolf A., Lentering R. and Stein J.* A prototype Compton camera array for localization and identification of remote radiation sources // IEEE Trans. on Nucl. Sc. 2013. V. 60. № 2. P. 1066—1071.
7. Патент РФ 2680849 , G01T 1/36. Способ гамма-радиографической интроскопии / Игнатьев О.В., Горбунов М.А., Морозов С.Г., Купчинская Е.А., Купчинский А.В., Пулин А.А., Дудин С.В., Фофанов Д.А. Оpubл. 28.02.2019. Бюл. № 7. 2 с.