

АНАЛИЗ АПЕРТУРНОЙ ФУНКЦИИ РАССЕЙВАЮЩЕГО ОБЪЕМА КОЛЛИМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АЛЬБЕДНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ С КОЛЬЦЕВЫМ ДЕТЕКТОРОМ

© 2020 г. Е.Е. Журавский^{1,*}, Д.С. Белкин^{1,**}, Б.И. Капранов^{1,***}, С.В. Чахлов^{1,****}

¹Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30
E-mail: *zhuravskiy@tpu.ru; **Belkin@tpu.ru; ***introbob@mail.ru; ****chakhlov@tpu.ru

Поступила в редакцию 12.03.2020; после доработки 29.04.2020

Принята к публикации 06.05.2020

Рассмотрены особенности коллимационной системы томографа для контроля стальных изделий на комптоновском обратном рассеянии. Проведен анализ апертурных функций рассеивающего объема для кольцевого типа детектора с разными размерами пинхолов первичного и вторичного коллиматоров. Показана эффективность применения кольцевого типа детектора. Приведены рекомендации по выбору размеров пинхолов первичного и вторичного коллиматоров. Дана косвенная оценка возможной глубины сканирования стальных изделий.

Ключевые слова: комптоновская томография, коллимационная система, пинхол, неразрушающий контроль, радиационный контроль, дефектоскопия, приборостроение.

DOI: 10.31857/S0130308220060044

ВВЕДЕНИЕ

Радиационный контроль (РК) на комптоновском обратном рассеянии (КОР) применяется в различных областях промышленности: аэрокосмической, нефтегазовой, досмотровом контроле. РК на КОР применяется для выявления в действующих стальных нефтепродуктопроводах коррозионных и эрозионных разрушений [1—6], обнаружения арматуры в бетоне [7] — там, где применение других видов контроля является невозможным или их применение не обеспечивает требуемую достоверность результатов контроля [1, 8—12]. Одним из недавних исследований является разработка методики НК аэрокосмических материалов и изделий посредством цифровой радиографии (ЦР) на КОР [13,14] с применением коллиматора со спиральной щелью [15].

Также к передовым техническим решениям, повышающим производительность и достоверность контроля промышленных объектов (в том числе нефтегазового комплекса) при одностороннем доступе к объекту контроля (ОК), относится техническое решение [16]. Особенностью данного решения для выявления несплошностей является применение скинтилляционного детектора, выполненного в форме кольца, что повышает производительность сканирования за счет увеличения эффективности сбора однократно рассеянных фотонов. Подобная технология стала возможной благодаря применению нового WLS (wavelength — shifting) волокна для повышения эффективности сбора света со скинтиллятора. В исследовании [17] приведены результаты применения скинтилляционных детекторов на базе WLS волокна. В приведенных выше исследованиях отсутствует описание применяемых коллимационных систем (КС) для обратно-рассеянного излучения. Наиболее полно исследования КС для изделий с атомным номером $Z < 22$ и плотностью $2,7 \text{ г/см}^3$ описаны в [18]. В [19] показаны экспериментальные результаты по применению РК на КОР стальных изделий, а также приведен расчет параметров пинхола первичного коллиматора, однако полноценные исследования КС для стальных изделий с атомным номером $Z = 26$ отсутствуют. В известной установке для альбедной компьютерной томографии (АКТ) Гамбургской лаборатории ComScan фирмы «Philips», детектирование обратнорассеянного излучения осуществляется двумя прямоугольными матрицами детекторов. ComScan позволяет контролировать при одностороннем доступе изделия из стали с глубиной контроля до 3 мм, из алюминия с глубиной контроля до 10 мм, при напряжении на рентгеновской трубке $E_{\text{max}} = 160 \text{ кВ}$. Учитывая патент [16] и исследование [17], применение кольцевого детектора для РК на КОР однозначно повышает производительность контроля, за счет увеличения площади детектирования. Но исследование апертурных функций рассеивающего объема (АФРО) таких систем, в частности для контроля стальных изделий, следует провести.

ГЕОМЕТРИЯ РАССЕЙВАЮЩЕГО ОБЪЕМА

Рассмотрим закономерность формирования потока обратнорассеянного излучения от рассеивающего объема (РО) стального объекта. Для этого рассмотрим следующую геометрию формирования РО, показанную на рис. 1.

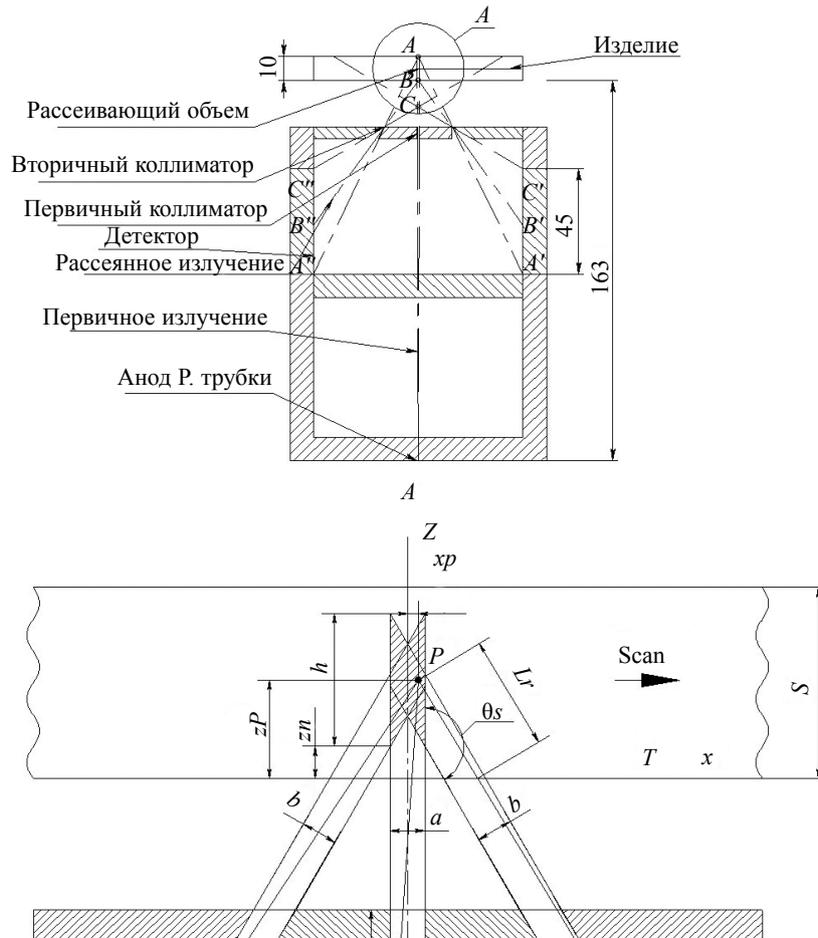


Рис. 1. Геометрия формирования потока обратнорассеянного излучения.

Излучение с эффективной энергией E_{eff} от анода рентгеновской трубки падает перпендикулярно на границу T и проходит внутрь среды в виде “карандашного” пучка, сформированного пинхолом первичного коллиматора диаметром a . В разработанной КС расстояние от анода рентгеновской трубки до рассеивателя составляет 163 мм. Рассеянный пучок формируется щелевым кольцевым пинхолом вторичного коллиматора шириной b , формирующим зону чувствительности детектора. Основной вклад в обратнорассеянное излучение дает однократное рассеяние, вследствие чего далее будем считать, что сигнал, регистрируемый детектором, определяется квантами, рассеянными в направлении детектора из зоны РО (заштрихованная фигура).

Форма РО (рис. 2) зависит от соотношения размеров a и b : первый случай имеет место, если $a < \frac{b}{\cos\alpha}$; второй случай — если $a > \frac{b}{\cos\alpha}$, где $\alpha = 180^\circ - \theta_s$, θ_s — средний угол рассеяния.

Апертурные функции РО (АФРО) вдоль оси сканирования x определяются следующими уравнениями:

$$\varphi(x) = \begin{cases} \frac{2b}{\sin\alpha} & \text{для } 0 \leq x < 0,5a - \frac{0,5b}{\cos\alpha} \\ \frac{b + a \cdot \cos\alpha - 2x \cdot \cos\alpha}{\sin\alpha} & \text{для } 0,5a - \frac{0,5b}{\cos\alpha} \leq x < 0,5a \\ \frac{b - a \cdot \cos\alpha + 2x \cdot \cos\alpha}{\sin\alpha} & \text{для } 0,5a \leq x < 0,5a + \frac{0,5b}{\cos\alpha} \\ \frac{2b}{\sin\alpha} & \text{для } 0,5a + \frac{0,5b}{\cos\alpha} \leq x < a \end{cases} \quad \left. \vphantom{\varphi(x)} \right\} \text{для } a > \frac{b}{\cos\alpha} \quad (1)$$

$$\left. \begin{cases} \frac{b + a \cdot \cos\alpha - 2x \cdot \cos\alpha}{\sin\alpha} & \text{для } 0 \leq x < 0,5a \\ \frac{b - a \cdot \cos\alpha + 2x \cdot \cos\alpha}{\sin\alpha} & \text{для } 0,5a \leq x < a \end{cases} \right\} \text{для } a < \frac{b}{\cos\alpha}$$

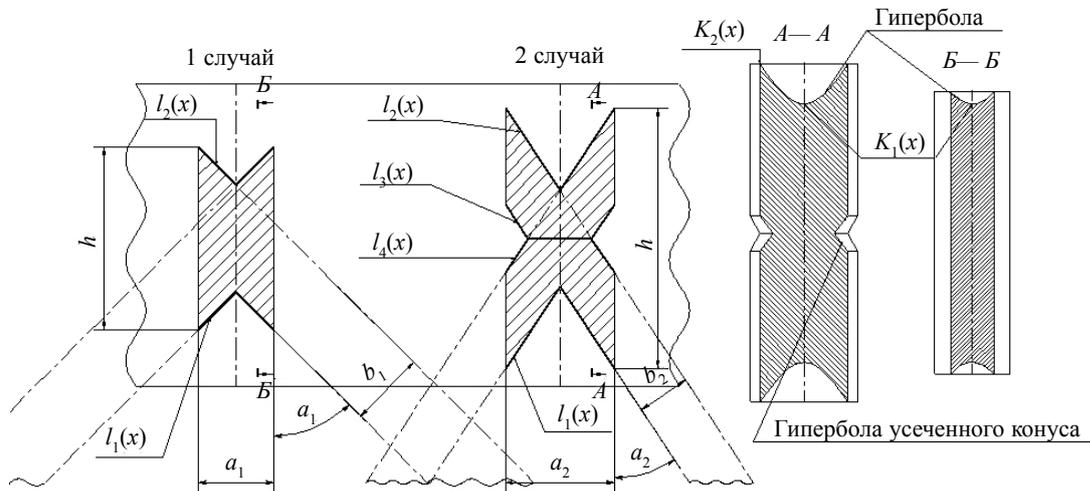


Рис. 2. Вариации РО.

Так как в разработанной конструкции применяется кольцевой детектор, форма РО представляет собой фигуру, образованную при вращении вокруг своей оси сечения РО (см. рис. 2) согласно уравнению (1). Итоговая фигура представляет собой цилиндр, с вырезанными с торцовых частей конусами. Для исследования АФРО по оси x весь РО можно разделить на элементы. Так как геометрический РО симметричен относительно оси z , то достаточно рассмотреть 1/4 часть РО. АФРО цилиндра определяется как

$$\varphi_c(x) = \varphi_o(x) \cdot h, \quad (2)$$

где $\varphi_o(x) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - \left(x - \frac{a}{2}\right)^2}$ — апертурная функция окружности диаметром a ;

$h = \left(\frac{a}{\operatorname{tg}\alpha} + \frac{b}{\sin\alpha}\right)$ — высота РО АФРО, вырезанного с торцовой грани конуса, определяется следующим уравнением:

$$\varphi_k(x) = \varphi_{ck}(x) - \varphi_g(x). \quad (3)$$

Здесь

$$\varphi_{ck}(x) = \frac{a \cdot \varphi_o(x)}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (4)$$

— апертурная функция цилиндра, пересекающего конус;

$$\varphi_g(x) = \begin{cases} \varphi_{gp}(x) \rightarrow 0 \leq x < 0,5a \\ \varphi_{gp}(a-x) \rightarrow 0,5a \leq x < a \end{cases} \quad (5)$$

— апертурная функция площади гиперболы, образованной при сечении конуса;

$$\varphi_{gp}(x) = 2 \int_0^{0,5\varphi_o(x)} k_1(x) \cdot \sqrt{1 + \frac{x^2}{k_2(x)^2}} dx \quad (6)$$

— уравнение гиперболы, образованной при сечении конуса, $k_1(x)$ — вершина гиперболы, $k_2(x)$ — точка пересечения ветви гиперболы основания сечения конуса (см. рис. 2), при значении $\varphi_o(0,5a)$ — вырожденная гипербола.

Итоговое уравнение АФРО для $a < \frac{b}{\cos \alpha}$:

$$\Phi_1(x) = \varphi_c(x) - 2\varphi_k(x). \quad (7)$$

Для варианта РО при условии $a > \frac{b}{\cos \alpha}$, уравнение (3) будет дополняться следующим параметром:

$$\varphi_{uk}(x) = \varphi_{cu}(x) - \varphi_{gu}(x). \quad (8)$$

Здесь

$$\varphi_{cu}(x) = \varphi_o(x) \cdot \left(\frac{a}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} - \frac{b}{2 \cdot \sin \alpha} \right) \quad (9)$$

— апертурная функция цилиндра, пересекающего усеченный конус;

$$\varphi_{gu}(x) = \begin{cases} \varphi_{gpu}(x) \rightarrow 0 \leq x < 0,5a \\ \varphi_{gpu}(a-x) \rightarrow 0,5a \leq x < a \end{cases} \quad (10)$$

— апертурная функция площади гиперболы, образованной при сечении конуса;

$$\varphi_{gpi}(x) = \begin{cases} \varphi_k(x) \rightarrow 0 \leq x < 0,5a - \frac{b}{2 \cdot \cos \alpha} \\ \varphi_k(x) - \left(\frac{b}{\sin \alpha} \cdot k_3(x) - 2 \int_0^{k_3(x)} k_1(x) \cdot \sqrt{1 + \frac{x^2}{k_2(x)^2}} dx \right) \rightarrow 0,5a - \frac{b}{2 \cdot \cos \alpha} \leq x < 0,5a \end{cases} \quad (11)$$

— уравнение гиперболы, образованной при сечении усеченного конуса, где

$$k_3(x) = \sqrt{\frac{b^2 \cdot k_2(x)^2}{4k_1(x)^2 \sin^2 \alpha} - k_2(x)^2} \quad \text{— предел интегрирования.}$$

Итоговое уравнение для второго случая:

$$\Phi_2(x) = \varphi_c(x) - 2[\varphi_k(x) + \varphi_{uk}(x)]. \quad (12)$$

АНАЛИЗ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО РО

Рассмотрим на рис. 1 точку P , координаты которой определяются величиной z_n , зависящей от расположения РО по высоте среды, величиной z_p , определяющей конкретное положение точки, и

величиной x_p . По мере удаления точки P вглубь объекта, интенсивность обратнорассеянного излучения от точки P будет экспоненциально убывать, вследствие чего действительный РО будет деформироваться. Для учета данного фактора необходимо рассмотреть зависимость интенсивности излучения на детекторе:

$$I(z, E_{eff}) = I_0(E_{eff}) \cdot \exp \left\{ -(z + zn) \left[\mu_1(E_{eff}) + \frac{\mu_2(E_p)}{\cos \alpha} \right] \right\}, \quad (13)$$

где I_0 — первоначальная интенсивность излучения; $\mu_1(E_{eff})$ и $\mu_2(E_p)$ — линейные коэффициенты ослабления первичного излучения и рассеянного от изделия соответственно; $\frac{z}{\cos \alpha}$ — путь, пройденный квантом при выходе из среды.

Так как интенсивность $I(z, E_{eff})$ не зависит от координаты x , определим полную $I(z, E_{eff})$ для РО с учетом геометрической цилиндрической формы РО. Для этого рассмотрим следующие уравнения, задающие геометрию РО для случая $a < \frac{b}{\cos \alpha}$ (см. рис. 2):

$$l_1(x) = \begin{cases} \frac{x}{\operatorname{tg} \alpha} \rightarrow 0 \leq x < 0,5a \\ \frac{a-x}{\operatorname{tg} \alpha} \rightarrow 0,5a \leq x < a \end{cases}; \quad l_2(x) = \begin{cases} \frac{b + a \cos \alpha - x \cos \alpha}{\sin \alpha} \rightarrow 0 \leq x < 0,5a \\ \frac{b + x \cos \alpha}{\sin \alpha} \rightarrow 0,5a \leq x < a \end{cases}. \quad (14)$$

И для случая $a > \frac{b}{\cos \alpha}$ (см. рис. 2):

$$l_3(x) = \begin{cases} \frac{b}{\sin \alpha} + \frac{x}{\operatorname{tg} \alpha} \rightarrow 0 \leq x < \frac{a}{2} - \frac{b}{2 \cos \alpha} \\ \frac{a}{2 \operatorname{tg} \alpha} + \frac{b}{2 \sin \alpha} \rightarrow \frac{a}{2} - \frac{b}{2 \cos \alpha} \leq x < \frac{a}{2} + \frac{b}{2 \cos \alpha}; \\ \frac{a}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{b}{\sin \alpha} - \frac{x}{\operatorname{tg} \alpha} \rightarrow \frac{a}{2} + \frac{b}{2 \cos \alpha} \leq x < a \end{cases};$$

$$l_4(x) = \begin{cases} \frac{a-x}{\operatorname{tg} \alpha} \rightarrow 0 \leq x < \frac{a}{2} - \frac{b}{2 \cos \alpha} \\ \frac{a}{2 \operatorname{tg} \alpha} + \frac{b}{2 \sin \alpha} \rightarrow \frac{a}{2} - \frac{b}{2 \cos \alpha} \leq x < \frac{a}{2} + \frac{b}{2 \cos \alpha} \\ \frac{2bx - 2ax(\sin^2 \alpha - 1) + 4bx \left(\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)^2 - 1 \right)}{a \sin(2\alpha) - 2b \sin \alpha} \rightarrow \frac{a}{2} + \frac{b}{2 \cos \alpha} \leq x < a \end{cases}. \quad (15)$$

С учетом (14) и (15) полная интенсивность $I(z, E_{eff})$ по оси z в зависимости от x будет равна:

$$I(z, E_{eff}) = \begin{cases} \int_0^{l_2(z)} I(z, E_{eff}) dz - \int_0^{l_1(z)} I(z, E_{eff}) dz \rightarrow a < \frac{b}{\cos \alpha} \\ \int_0^{l_3(z)} I(z, E_{eff}) dz + \int_0^{l_2(z)} I(z, E_{eff}) dz - \int_0^{l_4(z)} I(z, E_{eff}) dz - \int_0^{l_1(z)} I(z, E_{eff}) dz \rightarrow a > \frac{b}{\cos \alpha} \end{cases}. \quad (16)$$

Нормируем $I(z, E_{eff})$ по $\varphi(x) \rightarrow I_n(x, E_{eff}) = \frac{I(z, E_{eff})}{\varphi(x)}$, далее умножим $I_n(x, E_{eff})$ на АФРО (7), (12), в итоге получим уравнения АФРО с учетом геометрического ослабления в среде

$$\Phi_{1d} = I_n(x, E_{eff}) \cdot \Phi_1; \quad \Phi_{2d} = I_n(x, E_{eff}) \cdot \Phi_2. \tag{17}$$

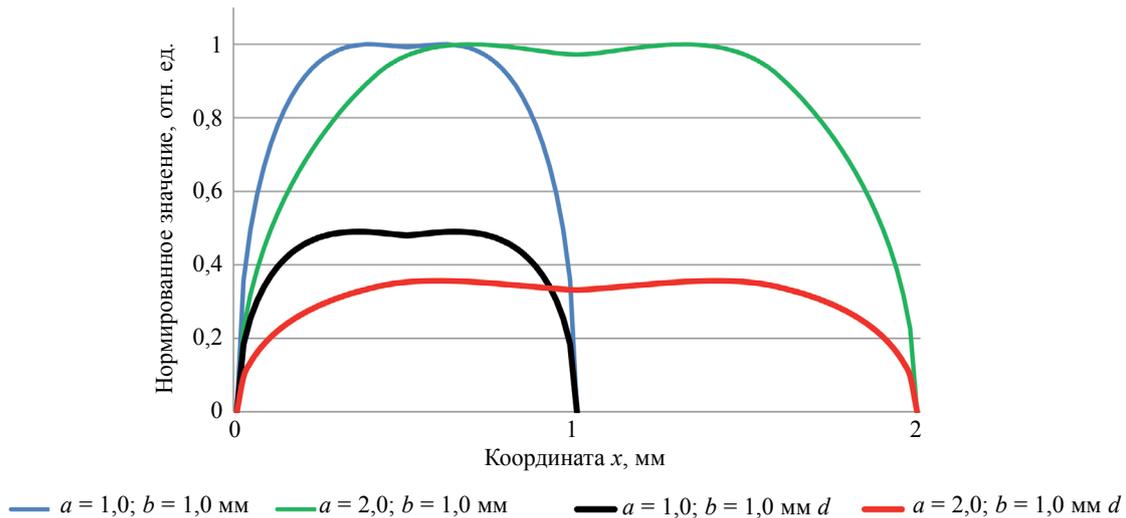


Рис. 3. Геометрические АФРО.

Уравнения (7), (12), (17) имеют следующий вид на рис. 3, где $a = 1,0; b = 1,0$ уравнения (7), $a = 2,0; b = 1,0$ уравнения (12), $a = 1,0; b = 1,0 d$ и $a = 2,0; b = 1,0 d$ уравнения (17) для $z_n = 0$.

АНАЛИЗ ОБЪЕМНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В [20] дано определение пространственно-статистической неопределенности (ОПСН) для описания информационной способности КС по направлению сканирования Δ . ОПСН представлено как $\delta_{cm} \cdot \delta_p$, где $\delta_{cm} = \frac{1}{\sqrt{N}}$ (N — количество квантов), так как N пропорционально объему V , учитывая малые размеры вокселя, представим δ_{cm} в следующем виде: $\delta_{cm} = \frac{K}{\sqrt{V}}$, где K — коэффициент пропорциональности; $\delta_{cm} = \frac{\Delta l}{2}$ — пространственно-разрешающая способность, определяющаяся половиной ширины апертуры на полувысоте по заданному направлению.

Таблица 1

Различные значения размеров щели коллиматора и пинхола

Диаметр пинхола первичного коллиматора a , мм	Ширина щели пинхола вторичного коллиматора b , мм
0,2	0,2
0,5	0,5
0,75	0,75
1,0	1,0
2,0	2,0

Исследуем зависимость ОПСН КС со средним углом 150° , исходя из уравнений (7), (12), (17) для размеров пинхолов из табл. 1, а также для залегания РО на глубине 5 мм. Эффективная энергия рентгеновского излучения 200 кэВ, энергия обратнорассеянного рентгеновского излучения

для угла 150° составляет 115 кэВ. Линейные коэффициенты ослабления равны 1,146 и 2,506 см^{-1} соответственно.

Зависимость ОПСН аперттуры по оси x представлена на рис. 4 и 5.

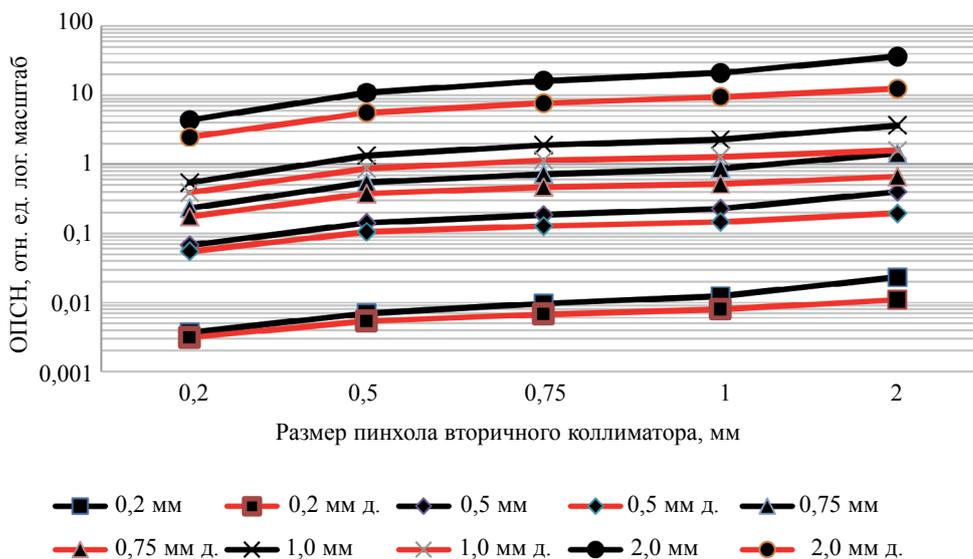


Рис. 4. Зависимость ОПСН от размеров пинхола первичного и вторичного коллиматора при угле детектирования 150° для геометрического и действительного РО.

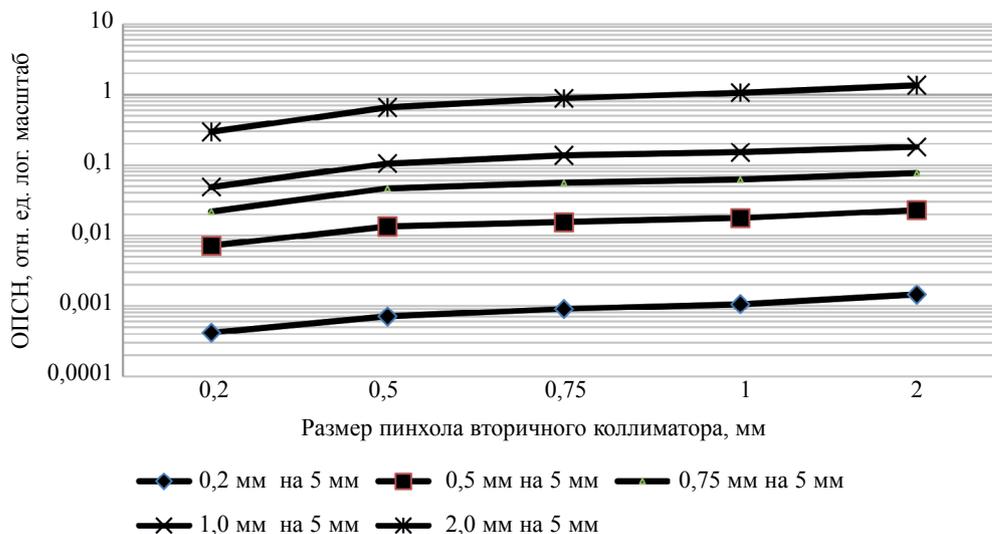


Рис. 5. Зависимость ОПСН от диаметров пинхола первичного и вторичного коллиматора при угле детектирования 150° для действительного РО на глубине залегания РО 5 мм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА АФРО КОЛЛИМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Экспериментальные исследования проводили с использованием модернизированного рентгеновского аппарата РАП-300-5 и сцинтиллятором ВГО в качестве детектора. Геометрия коллимационной системы, используемая в экспериментальном исследовании, представлена на рис. 1.

Конструкция КС разработана исходя из реализации трехкратного геометрического увеличения изображения контролируемого участка ОК. Зона отображения ОК выбрана таким образом, чтобы в нее входила толщина зоны контроля 10 мм и промежуток до передней границы зоны контроля (расстояние до стенки трубы). На рисунке зона детектирования имеет высоту 45 мм. С помощью

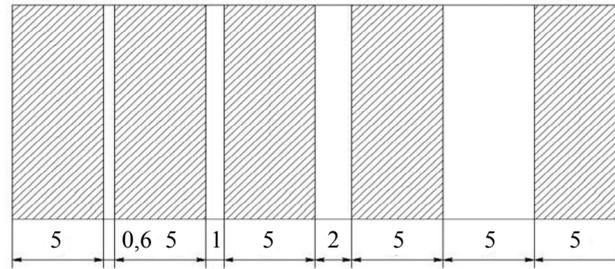


Рис. 6. Стальная пластинка с пропилами.

щелевого пинхола на зону детектирования (точки $A'C'$ или $A''C''$) переносится зона отображения (точки AC). Диаметр пинхола первичного коллиматора составляет 1,0 мм, ширина щели пинхола вторичного коллиматора составляет 1,0 мм. Стальная пластинка рис. 6 с пропилами облучалась рентгеновским излучением.

Полученный профиль сигнала представлен на рис. 7.

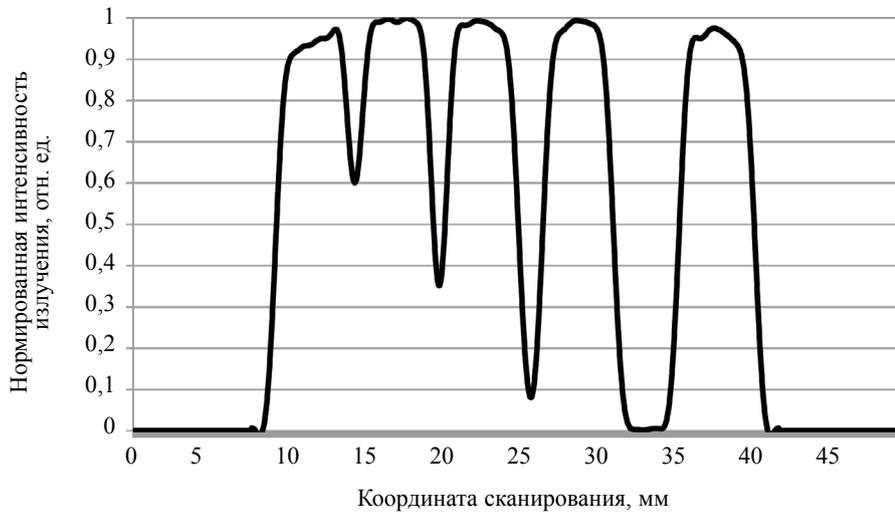


Рис. 7. Профиль сигнала от стальной пластины.

Переход АФРО через границу объекта осуществляется вдоль оси сканирования x , в результате физического взаимодействия апертуры РО с объектом образуются кванты рассеянного излучения из области геометрического перекрытия апертуры и объекта [18]. Удельный выход квантов из каждой области РО пропорционален электронной плотности объекта в этой области. Из чего следует, что общее число квантов, вышедшее из области геометрического перекрытия, пропорционально интегралу по площади перекрытия РО и плотности объекта $\rho(x, y)$, то есть

$$F_1(x) = 2 \int_0^{xt} \Phi(x - xt) \cdot \rho(xt) dx, \tag{18}$$

где $\int_0^{xt} \Phi(x - xt)$ — АФРО $\Phi_1(x)$ или $\Phi_2(x)$ соответственно.

Применив преобразование Фурье к (18) и лемму Бореля о свертке получим

$$h(\omega) = \frac{U(\omega)}{\rho(\omega)}, \tag{19}$$

а после обратного преобразования Фурье —

$$h(xt) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{U(\omega)}{\rho(\omega)} \exp(-j\omega xt) d\omega. \tag{20}$$

Для определения АФРО КС рассмотрим область, соответствующую переходу РО через пропил шириной 5 мм. Для того чтобы найти АФРО, необходимо геометрически сопоставить функцию сигнала от образца $U(x)$ и теоретическое изменение плотности $\rho(x)$ на рис. 7. Для этого приближенно воспользуемся следующей методикой. Координата начала изменения $\rho(x)$ будет определяться следующим значением: $x_1 = \frac{1}{10} \frac{dU}{dx}$, где $\frac{dU}{dx}$ — максимальное значение функции; координата конца изменения $\rho(x)$ x_2 определяется аналогично, но только с обратным знаком.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Спектр АФРО имеет высокочастотную составляющую. На рис. 8 приведен нефигурный АФРО и с фильтрацией высокочастотной составляющей спектра.

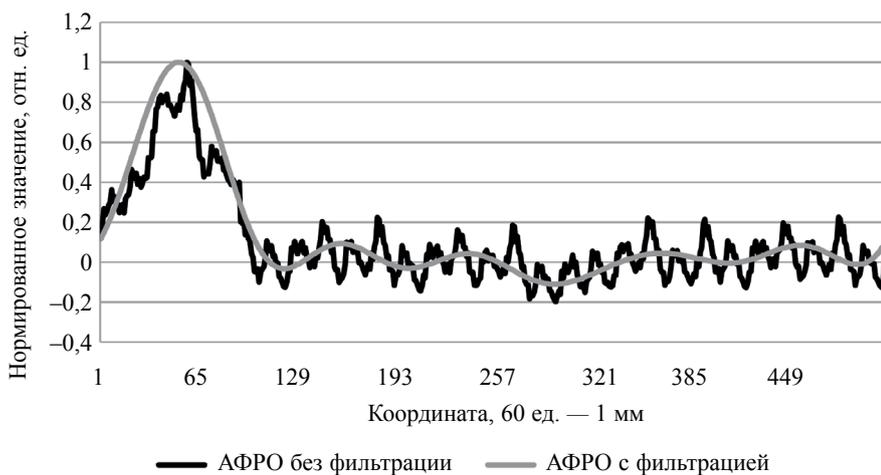


Рис. 8. Экспериментально определенный АФРО.

Форма АФРО сопоставима с формой геометрического и действительного АФРО согласно уравнению (11). Ширина АФРО равна двум диаметрам пинхола первичного коллиматора вследствие вклада многократно рассеянного излучения. Восстановим функцию $\rho(x)$ по сигналу от стального объекта, применяя фильтрованную и не фильтрованную АФРО на рис. 9.

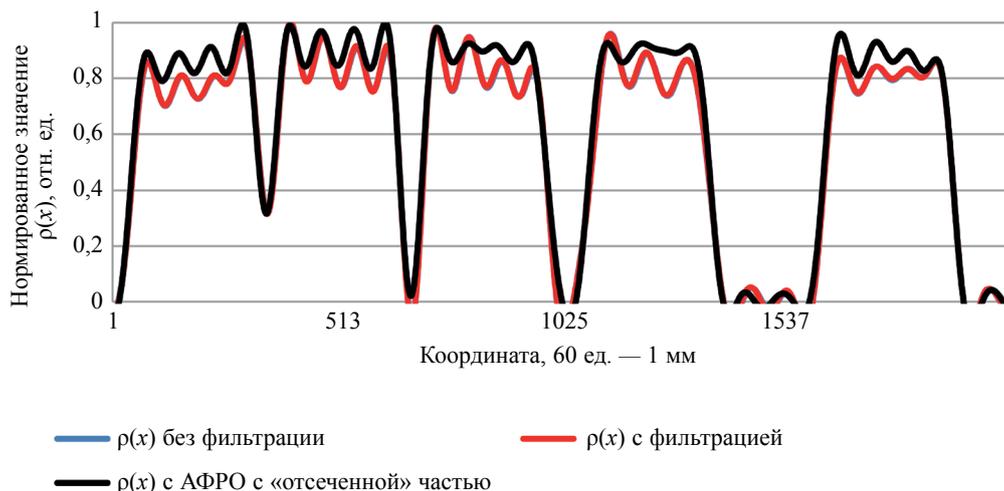


Рис. 9. Функция распределения плотности $\rho(x)$.

По реконструкции видно, что форма функции распределения плотности сопоставляется с реальным образцом. Ненулевое значение плотности для пропила 0,6 мм обусловлено недостаточно малым шагом сканирования, а также действительной шириной АФРО. Также видно, что восстановленное распределение плотности практически не меняется как для фильтрованного АФРО, так и без фильтрации. Изменение функции $\rho(x)$ происходит только при обнулении высокочастотной составляющей АФРО.

Смоделируем два разных сигнала от гипотетической стальной пластины с функцией распределения плотности $\rho(x)$ согласно уравнению (18) для АФРО с разными параметрами. Для первого сигнала АФРО — диаметр пинхола первичного коллиматора 1,0 мм, размер щели вторичного коллиматора 1,0 мм. Для второго сигнала АФРО — диаметр пинхола первичного коллиматора 2,0 мм, размер щели вторичного коллиматора 1,0 мм.

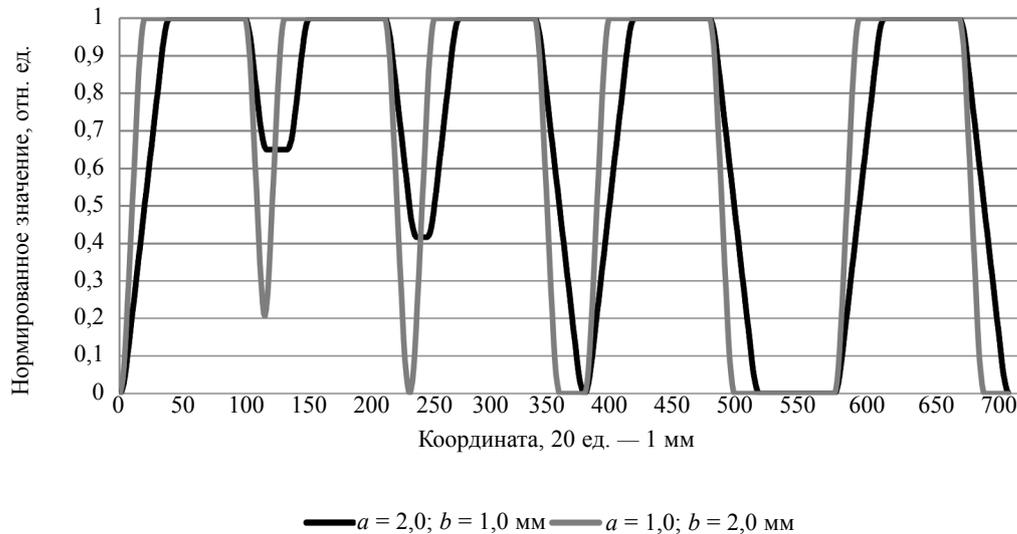


Рис. 10. Смоделированный сигнал согласно уравнению (18).

Размер пинхола первичного коллиматора 2,0 мм намеренно увеличен, так как ширина АФРО экспериментально определенного АФРО составила 2 диаметра пинхола первичного коллиматора. Форма сигнала для $a = 2,0; b = 1,0$ мм на рис. 10 сопоставляется по форме с рис. 7.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Получены формулы АФРО КС с кольцевым детектором для разного соотношения размеров пинхолов первичного и вторичного коллиматоров.

2. Анализ АФРО с различными размерами пинхолов первичного и вторичного коллиматоров показывает, что основное влияние на ОПСН оказывает диаметр пинхола первичного коллиматора. Влияние ширины щелевого пинхола вторичного коллиматора на ОПСН с ростом глубины залегания РО в среде уменьшается вследствие уменьшения объема РО, и как результат — ухудшение статистической неопределенности. Поэтому, размер пинхола вторичного коллиматора необходимо увеличивать для возможности контроля более глубоких слоев стального объекта.

3. Теоретическая функция распределения плотности и функция распределения плотности, полученная экспериментально, сопоставляются между собой, из чего следует, что основной вклад для реконструкции $\rho(x)$ по полученному сигналу на основании уравнения АФРО оказывает именно низкочастотная составляющая АФРО.

4. Смоделированная форма сигнала и форма сигнала, полученная экспериментально, сопоставляются, из чего следует, что можно смоделировать форму сигнала от несплошности заданного размера и залегающей на заданной глубине на основании математического моделирования по уравнениям (17) и (18).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abdul-Majid S., Balamesh A., Othmany D. A., Alassiaa A., Al-Huraibi H.* Corrosion Imaging and Thickness Determination Using Micro-Curie Radiation Sources Based on Gamma-Ray Backscattering: Experiments and MCNP Simulation // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2015. V. 26. No. 1. P. 43—59.
2. *Abdul-Majid S., Balamesh A.* Underwater Pipe Wall Thickness Measurements by Gamma Backscattering // retrieved on Aug. 2016. V. 30 // *Applied Radiation and Isotopes*. 2010. V. 68. No. 12. P. 2181—2188.
3. *Margret M., Menaka M., Subramanian V., Baskaran R., Venkatraman B.* Non-destructive inspection of hidden corrosion through Compton backscattering technique // *Radiation Physics and Chemistry*. 2018. V. 152. P. 158—164.
4. *Balamesh A., Salloum M., Abdul-Majid S.* Feasibility of a New Moving Collimator for Industrial Backscatter Imaging // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2018. V. 29. No. 3. P. 143—155.
5. *Margret M., Subramanian V., Baskaran R., Venkatraman B.* Detection of scales and its thickness determination in industrial pipes using Compton backscattering system // *Review of Scientific Instruments*. 2018. V. 89. No. 11. P. 113117. IND
6. *Sharma A., Sandhu B.S., Singh B.* Incoherent scattering of gamma photons for non-destructive tomographic inspection of pipeline // *Applied Radiation and Isotopes*. 2010. V. 68. No. 12. P. 2181—2188.
7. *Margret M., Menaka M., Venkatraman B., Chandrasekaran S.* Compton back scatter imaging for mild steel rebar detection and depth characterization embedded in concrete // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2015. V. 343. P. 77—82.
8. *Benitez D.S., Quek S., Gaydecki P., Torres V.* A preliminary magneto-inductive sensor system for real-time imaging of steel reinforcing bars embedded within concrete // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2008. V. 57. No. 11. P. 2437—2442.
9. *Baek S., Xue W., Feng M.Q., Kwon, S.* Nondestructive corrosion detection in RC through integrated heat induction and IR thermography // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2012. V. 31. No. 2. P. 181—190.
10. *Yamazaki K., Ishikawa K., Haga A., Muramatsu K., Kobayashi K., Sasaki H.* Impedance measurement using a resonance circuit for detecting steel bars and cables inside pliable plastic conduit tubes buried in concrete walls and slabs // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2010. V. 46. No. 6. P. 1963—1966.
11. *Yamazaki K., Ishikawa K., Haga A., Muramatsu K., Kobayashi K., Sasaki H.* Monitoring corrosion of rebar embedded in mortar using high-frequency guided ultrasonic waves // *Journal of engineering mechanics*. 2009. V. 135. No. 1. P. 9—19.
12. *Fan Y., Ji X., Cai P., Lu Q.* Non-destructive detection of rebar buried in a reinforced concrete Wall with wireless passive SAW sensor // *Measurement Science Review*. 2013. V. 13. No. 1. P. 25—28.
13. *Kolkoori S., Wrobel N., Zscherpel U., Ewert U.* A new X-ray backscatter imaging technique for non-destructive testing of aerospace materials // *NDT&E International*. 2015. V. 70. P. 41—52.
14. *O'Flynn D., Crews C., Fox N., Allen B.P., Sammons M., Speller R.D.* X-ray backscatter sensing of defects in carbon fibre composite materials // *Advanced Photon Counting Techniques XI*. International Society for Optics and Photonics. 2017. V. 10212. P. 102120R.
15. *Kolkoori S., Wrobel N., Osterloh K., Zscherpel U., Ewert U.* Novel X-ray backscatter technique for detection of dangerous materials: application to aviation and port security // *Journal of Instrumentation*. 2013. V. 8. No. 09. P. P09017.
16. *Shinji Nomura, Kazunori Tejima, Ikuo Wakamoto.* Scattered X-ray type defect detector, and X-ray detector. JP. Patent No. 2001208705A. 03 August 2001.
17. *Ignatiev N.G., Orlov I.E., Ergashev D.E.* Experimental studies of scintillation detectors based on WLS fibers // *Instruments and Experimental Techniques*. 2016. V. 59. No. 6. P. 789—793.
18. *Капранов Б.И.* Разработка метода и средств реконструктивной комптоновской томографии / Дис. ... д-ра техн. наук. Томск: Томский политехнический университет, 2000.
19. *Журавский Е.Е., Капранов Б.И., Белкин Д.С., Чахлов С.В., Штейн А.М.* Расчет параметров пинхола коллимационной системы альбедной компьютерной томографии стальных изделий // *Дефектоскопия*. 2020. № 2. С. 42—49.
20. *Капранов Б.И., Короткова И.А., Чахлов В.Л., Филинов В.Н., Маклашевский В.Я.* Анализ систем сканирования в комптоновской томографии. Возможные области применения // *Известия Томского политехнического университета*. 2003. Т. 306. № 1. С. 122—127.