

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФОРМ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ

© 2020 г. С.П. Осипов^{1,*}, И.Г. Ядренкин², С.В. Чахлов^{1,**}, О.С. Осипов³, Е.Ю. Усачев⁴

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634028 Томск, пр-т Ленина, 30

²Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия 634003 Томск, пл. Соляная, 2

³Medialooks, Россия 236016 Калининград, ул. Александра Невского, 59

⁴МИРЭА — Российский технологический университет, Россия 119454 Москва, пр-т Вернадского, 78
E-mail: *osip1809@rambler.ru; **chakhlov@tpu.ru

Поступила в редакцию 12.06.2020; после доработки 22.06.2020

Принята к публикации 23.06.2020

Предложены алгоритмы моделирования пространственных форм объектов контроля и формирования изображений в системах цифровой радиографии. Алгоритмы являются основой имитационных моделей анализируемых систем. Имитационные модели предназначены для обоснования технической реализуемости задач контроля объектов и для выбора параметров и оценки характеристик систем цифровой радиографии. Для иллюстрации возможностей разработанных имитационных моделей были получены цифровые радиографические изображения некоторых объектов, включая эталоны чувствительности, пространственного разрешения, разрешающей способности, проникающей способности.

Ключевые слова: источники рентгеновского излучения, регистраторы рентгеновского излучения, проникающая способность, цифровая радиография, контрастная чувствительность, радиационный контраст, пространственное разрешение.

DOI: 10.31857/S0130308220080047

ВВЕДЕНИЕ

Системы цифровой радиографии (СЦР) широко применяются в науке, медицине, в досмотровом контроле, в различных отраслях промышленности, транспорта и строительства [1—6]. Возрастающие потребности в исследовании новых объектов, ранее считавшихся непригодными к контролю, и усиливающиеся требования потребителей к качеству контроля приводят к повышению значимости вопросов, связанных с проектированием СЦР. Анализируемые системы состоят из источников и регистраторов рентгеновского излучения, устройств поступательного и (или) вращательного перемещения (УП) объекта контроля (ОК) относительно неподвижной системы источник — регистратор. В ряде комплексов система источник — регистратор перемещается относительно ОК. Значимой частью СЦР являются алгоритмы и программы обработки информации.

Задача проектирования СЦР сводится к рациональному выбору параметров источника рентгеновского излучения (ИРИ), регистратора рентгеновского излучения (РРИ) и схемы сканирования. Отмеченный выбор определяется формой, размерами, структурой ОК и заданными потребителем характеристиками СЦР. К основным характеристикам СЦР [7—11] относятся: производительность; проникающая способность; контрастная чувствительность; пространственное разрешение; размер, материал и форма дефектов. Для определения вышеперечисленных характеристик в различных реализациях СЦР существуют специальные тестовые объекты [12—15] (ТО) — эталоны, описанные в соответствующих стандартах.

Для подтверждения реализуемости задач проектирования СЦР, предназначенных для контроля различных объектов, используются два основных подхода. Первый подход базируется на проведении масштабных натуральных экспериментов для конкретного образца контроля и характеризуется высокими материальными затратами. Второй подход связан с построением математических и компьютерных моделей цифровой радиографии (ЦР) и проведением на их основе вычислительных экспериментов по формированию цифровых радиографических изображений (ЦРИ) в ЦР. В настоящее время второй подход становится все более значимым в вопросах рационального выбора составляющих СЦР (ИРИ, РРИ, УП) [16—20]. К алгоритмам численной симуляции в СЦР необходимо выдвинуть несколько требований: реалистичность ЦРИ ОК; высокая производительность формирования ЦРИ; возможность учета параметров ИРИ, РРИ, УП и ОК. В качестве базовой модели формирования ЦРИ могут быть использованы модели из работ [8, 21, 22]. Сложность применения таких моделей обусловлена трудностью описания распределения плотности и эффективного атомного номера (ЭАН) по объему

ОК. Прямое использование таких распределений при моделировании изображений усложняет вычислительные алгоритмы и делает их малопродуктивными. Отсюда следует необходимость в совершенствовании методов моделирования ЦРИ на основе быстродействующих алгоритмов учета пространственных форм ОК. За основу может быть использован подход из работы [22], в котором ОК представляется в виде объединения и (или) замещения нескольких пространственных фигур. Отмеченный подход к формированию ЦРИ логично назвать аддитивным методом моделирования. Необходимо разработать упрощенный алгоритм формирования изображений в СЦР с учетом пространственных форм ОК и вспомогательных тестовых объектов (ТО).

1. АДДИТИВНЫЙ АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

1.1. Общее описание объекта контроля

Объект контроля занимает некоторую компактную часть трехмерного пространства $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^3$ и считается полностью определенным, если в каждой точке $(x, y, z) \in \mathbf{V}$ заданы плотность ρ и ЭАН Z . Отсюда следует, что множество \mathbf{V} представимо в виде объединения конечного числа непересекающихся структурных фрагментов $\mathbf{V}_n, n = 1 \dots N$:

$$\mathbf{V} = \bigcup_{n=1}^N \mathbf{V}_n; \quad \mathbf{V}_n \neq \emptyset; \quad \mathbf{V}_i \cap \mathbf{V}_j = \emptyset, i = 1 \dots N, j = 1 \dots N, i \neq j. \quad (1)$$

Пространственные распределения ρ и Z задаются выражениями:

$$\rho(x, y, z) = \begin{cases} \rho_n, & (x, y, z) \in \mathbf{V}_n \\ 0, & (x, y, z) \notin \mathbf{V}_n \end{cases}, \quad Z(x, y, z) = \begin{cases} Z_n, & (x, y, z) \in \mathbf{V}_n \\ 1, & (x, y, z) \notin \mathbf{V}_n \end{cases}. \quad (2)$$

Для использования приведенных характеристик ОК на практике необходимо описание границ структурных фрагментов B_n трехмерными поверхностями. В первом приближении можно рассмотреть модель мононаправленного источника излучения. Это допущение при необходимости может быть снято. Анализируемая задача связана с просвечиванием ОК рентгеновским или гамма-излучением, поэтому логично связать направление одной из осей системы координат с направлением распространения излучения, например z . При построении модели формирования ЦРИ ограничимся выпуклыми односвязными телами. Напомним, что пространственная фигура (тело) \mathbf{V}_s является выпуклой и односвязной, если выполняется следующее условие:

$$A = (x_1, y_1, z_1) \in \mathbf{V}_s, B = (x_2, y_2, z_2) \in \mathbf{V}_s, \forall C \in AB \Rightarrow C \in \mathbf{V}_s. \quad (3)$$

С учетом сказанного выше, для любого значения $n, n = 1 \dots N$, границы B_n описываются парой двумерных функций:

$$z = F_{n1}(x, y), z = F_{n2}(x, y). \quad (4)$$

Функции (4) являются удобными, так как позволяют оценить толщину n -го фрагмента ОК по лучу $H_n(x, y)$, соединяющему излучающую и детектирующую точки. С учетом (4) и условия $F_{n2}(x, y) > F_{n1}(x, y)$, формула для оценки $H_n(x, y)$ имеет следующий вид:

$$H_n(x, y) = F_{n2}(x, y) - F_{n1}(x, y). \quad (5)$$

Отметим, что условие непересекаемости объемов из (1) и условие (3) могут находиться в кажущемся противоречии друг с другом в случае замещения части одного пространственного объема другим. Но это противоречие применительно к модели формирования изображений в СЦР является разрешимым. Ниже продемонстрируем это, введя основную формулу рассматриваемого аддитивного алгоритма.

1.2. Основная формула аддитивного алгоритма формирования цифровых радиографических изображений

Все реализации СЦР базируются на экспоненциальном законе ослабления гамма-излучения с энергией E . Этот закон применительно к рассматриваемой задаче связывает ослабление гамма-

излучения с энергией E с параметрами однородного объекта по лучу, соединяющему источник фотонов и точку детектирования с координатами (x_d, y_d) :

$$I(E, x_d, y_d) = I_0(E, x_d, y_d) \exp(-\mu(E)H_d) = I_0(E, x_d, y_d) \exp(-P(E, x_d, y_d)), \quad (6)$$

здесь I, I_0 — интенсивность излучения с ослабляющим объектом и без него; H_d — толщина ОК по описанному выше лучу; $\mu(E)$ — линейный коэффициент ослабления (ЛКО); $P(E, x_d, y_d)$ — толщина ОК по лучу в длинах свободного пробега (д.с.п.). Отношение I к I_0 называют радиационной прозрачностью ОК для гамма-излучения.

Основная формула аддитивного алгоритма формирования ЦРИ базируется на оценке толщины ОК в д.с.п. $P(E, x_d, y_d)$, которая выводится из (6) с учетом (1), (2) и преобразования ЛКО μ в массовый коэффициент ослабления (МКО) излучения m :

$$P(E, x_d, y_d) = \sum_{n=1}^N c_n(x_d, y_d) m(E, Z_n) \rho_n H_n(x_d, y_d), \quad (7)$$

где c_n — коэффициент, равный +1 для наложения объемов и -1 для замещения.

Для ускорения процесса вычислений при моделировании ЦРИ ОК большого объема значения коэффициентов $c_n(x_d, y_d)$ вычисляются предварительно, а уровни их значений дополняются 0 для исключения необходимости вычисления $H_n(x_d, y_d)$ для ряда точек детектирования. Для некоторых объектов испытаний взаимное положение фрагментов не исчерпывается наложением или замещением, существует более общий случай, в котором наблюдается частичное физическое замещение объема одного фрагмента таким же объемом другого фрагмента. В случае частичного замещения коэффициенты c_n и выражение (7) будут иметь более сложный вид, что усложнит процесс симуляции. Для устранения этого негативного фактора существует подход в рамках аддитивности, в котором намеренно увеличивается число фрагментов за счет объемов замещающих фрагментов, что приводит к обязательному выполнению всех условий из (1).

Приведем формулу для вычисления аналогового сигнала (АС) на выходе радиационно-чувствительного преобразователя (РЧП) J для рентгеновского излучения с максимальной энергией E_{\max} , числовым энергетическим спектром $f(E, E_{\max})$. Фотоны регистрируются РЧП из материала с параметрами (ρ_s, Z_s) толщиной h_s . В этом случае искомая формула с точностью до коэффициентов преобразования энергии $C_E(x_d, y_d)$ выглядит следующим образом:

$$J(E_{\max}, x_d, y_d) = I(E_{\max}, x_d, y_d) + B(x_d, y_d) = \\ = C_E(x_d, y_d) N_0(x_d, y_d) \int_0^{E_{\max}} E_{\text{ab}}(E, h_s) f(E, E_{\max}) \exp(-P(E, x_d, y_d)) \varepsilon(E, h_s) dE + B(x_d, y_d), \quad (8)$$

где N_0 — обобщенный параметр, равный числу фотонов, попадающих на фронтальную поверхность соответствующей пикселю части РЧП за время формирования точки изображения; $E_{\text{ab}}(E, h_s)$ — среднее значение энергии, переданной РЧП зарегистрированным фотоном; $\varepsilon(E, h_s)$ — эффективность регистрации; B — темновой сигнал.

Отметим, что значение $E_{\text{ab}}(E, h_s)$ зависит от толщины РЧП h_s и от его поперечных размеров a_s и b_s [23], а также от степени радиационной обособленности объемов РЧП, в которых формируется информация для точки ЦРИ.

Целью данной работы является не только разработка аддитивного подхода к описанию пространственных форм ОК, но и разработка быстродействующей имитационной модели формирования ЦРИ. Ускорение вычислительного процесса существенно зависит от реализуемости устранения множественного повторения одного и того же набора операций. Для любой точки изображения и любого ОК в интегралах из формулы (8) есть повторяющаяся часть. Введем переменные $f_{\text{ab}}(E, E_{\max}, h_s)$ и $S_{\text{ab}}(E_{\max}, h_s)$:

$$f_{\text{ab}}(E, E_{\max}, h_s) = \frac{E_{\text{ab}}(E, h_s) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, h_s)}{S_{\text{ab}}(E_{\max}, h_s)}, \quad (9) \\ S_{\text{ab}}(E_{\max}, h_s) = \int_0^{E_{\max}} E_{\text{ab}}(E, h_s) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, h_s) dE.$$

Функция $f_{ab}(E, E_{\max}, h_s)$ представляет собой нормированное распределение поглощенной энергии от всех фотонов с энергией E для ИРИ с максимальной энергией E_{\max} , а $S_{ab}(E_{\max}, h_s)$ — поглощенная энергия зарегистрированного фотона из спектра рентгеновского излучения с максимальной энергией E_{\max} .

Выражение (8) с учетом формул (7) и (9) примет вид:

$$J(E_{\max}, x_d, y_d) = C_E(x_d, y_d) N_0(x_d, y_d) S_{ab}(E_{\max}, h_s) \times \int_0^{E_{\max}} f_{ab}(E, E_{\max}, h_s) \exp\left(-\sum_{n=1}^N c_n(x_d, y_d) m(E, Z_n) \rho_n H_n(x_d, y_d)\right) dE + B(x_d, y_d). \quad (10)$$

Выражение (10) и является основной формулой аддитивного алгоритма формирования цифровых радиографических изображений.

Приведем описание трансформации совокупности АС (10) в ЦРИ.

1.3. Трансформация совокупности аналоговых сигналов в цифровое радиографическое изображение

При описании трансформации будем придерживаться модели [8, 22]. На первом этапе АС I преобразуются аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) с разрядностью k_{ADC} в цифровые сигналы (ЦС) D :

$$D(E_{\max}, x_d, y_d) = \left[\frac{J(E_{\max}, x_d, y_d)}{\Delta} \right], \Delta = \frac{C_{ADC} J_{air}}{2^{k_{ADC}} - 1}, \quad (11)$$

здесь $[arg]$ — целая часть arg ; C_{ADC} , $C_{ADC} > 1$ — коэффициент защиты от превышения ЦС уровня $2^{k_{ADC}} - 1$; J_{air} — АС в случае ослабления воздухом.

На вход алгоритма калибровки в случае источника непрерывного излучения поступают три типа цифровых сигналов: темновые — D_B ; ослабление воздухом — D_{air} ; измерительные сигналы — D_m . Калибровка состоит из калибровки по «черному» и по «белому». При калибровке по «черному» устраняется вклад темновых сигналов, а в результате калибровки по «белому» оценивается радиационная прозрачность ОК. Для испытуемых объектов со значительным перепадом толщин АС изменяются в соответствии с (6) по экспоненциальному закону, поэтому для уменьшения диапазона изменения конечного информативного сигнала величину, обратную радиационной прозрачности (кратность ослабления [8]), логарифмируют. Результатом последней операции является оценка толщины ОК в д.с.п. $P_{eff}(E_{\max}, x_d, y_d)$ для ИРИ с максимальной энергией E_{\max} . Вся указанная последовательность преобразований описывается выражением:

$$P_{eff}(E_{\max}, x_d, y_d) = \ln \frac{D_{air}(E_{\max}, x_d, y_d) - D_B(x_d, y_d)}{D_m(E_{\max}, x_d, y_d) - D_B(x_d, y_d)}. \quad (12)$$

Выражения (1)–(12), дополненные учетом случайности величин $B(x_d, y_d)$, $N_0(x_d, y_d)$, $S_{ab}(E_{\max}, h_s)$, определяют полноценную математическую модель формирования ЦРИ.

Сделаем два важных замечания, существенно упрощающие процесс имитационного моделирования: 1) параметры распределений случайных величин (СВ) $D_B(x_d, y_d)$ (средние значения $\overline{D_B(x_d, y_d)}$ и среднеквадратические отклонения $\sigma D_B(x_d, y_d)$) определяются для аналога РРИ экспериментально; 2) произведение $C_E(x_d, y_d) N_0(x_d, y_d) S_{ab}(E_{\max}, h_s)$ в (10) будем рассматривать как единую случайную величину. Ее можно интерпретировать как энергию фотонов, поглощенную РЧП при ослаблении воздухом. В этом случае:

$$\overline{C_E(x_d, y_d) N_0(x_d, y_d) S_{ab}(E_{\max}, x_d, y_d)} \approx \overline{D_{air}(E_{\max}, x_d, y_d)}, \quad (13)$$

$$\sigma(C_E(x_d, y_d) N_0(x_d, y_d) S_{ab}(E_{\max}, x_d, y_d)) \approx \sigma(D_{air}(E_{\max}, x_d, y_d)).$$

Правые части в системе (13) также оцениваются экспериментально для аналога РРИ.

Будем считать, что СВ $D_B(x_d, y_d)$ и $D_{air}(x_d, y_d)$ распределены по Гауссу.

2. ПРИМЕРЫ ОПИСАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФОРМ ОБЪЕКТОВ И ИХ ЦИФРОВЫЕ РАДИОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

2.1. Тестовые объекты цифровой радиографии

Качество СЦР характеризуется рядом параметров, например, проникающей способностью, контрастной чувствительностью и пространственным разрешением. Для оценки этих параметров используются соответствующие эталоны СЦР. Ниже остановимся на описании пространственных форм тестовых объектов (ТО), позволяющем оценить тот или иной параметр СЦР и получить имитационные ЦРИ.

2.1.1. Эталон проникающей способности

Эталон проникающей способности служит для оценки предельных значений толщин ОК из стали, для которых цифровые радиографические изображения ОК обладают информативностью. Рассмотрим высокоэнергетические системы ЦР. Для описания ТО, предназначенного для оценки проникающей способности, воспользуемся американским стандартом для определения качества изображения рентгеновских и гамма-систем для проверки безопасности грузов и транспортных средств [14]. Вышеупомянутый ТО состоит из стальных ослабляющих пластин толщиной H_{st} и накладной центральной части, по форме напоминающей «наконечник стрелы» длиной 30 см и шириной 30 см (см. рис. 1).

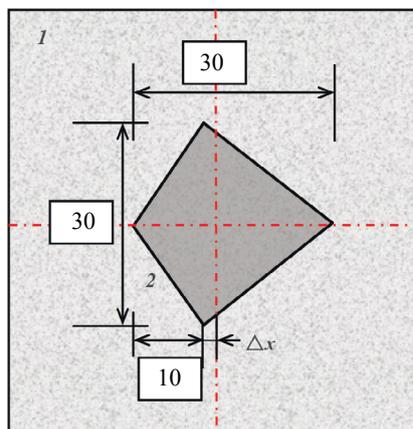


Рис. 1. Вид ТО для оценки проникающей способности [24]:
1 — стальная пластина размером 60×60 см², 2 — «наконечник стрелы».

Толщина «наконечника стрелы» H_a , согласно [14], удовлетворяет соотношению

$$H_a = 0,2(H_{st} + H_a). \quad (14)$$

По требованию стандарта оператор должен обнаружить на изображении не только «наконечник стрелы», но уверенно указать его пространственную ориентацию. Центры масс «наконечника стрелы» и основных стальных пластин должны совпадать.

Для описания ТО воспользуемся общим подходом, предложенным выше. Для удобства введем неподвижную декартову систему координат XOY , центр этой системы совпадает с центром основных пластин, оси OX , OY параллельны сторонам основных пластин ТО. Пусть центр ЦРИ размером $2A \times 2A$, $A > 30$, совпадает с точкой O . В соответствии с приведенным выше подходом имеем дело с тремя множествами: V_1 — множество точек над изображением; V_2 — множество точек основных пластин; V_3 — множество точек «стрелы наконечника».

Для обеспечения удобства описания вращения «стрелы наконечника» относительно неподвижных пластин введем декартову систему координат X_aOY_a , которая отличается от системы XOY поворотом на угол θ . Ось X_a направлена в сторону острия «наконечника». Уравнения связи координат x , y и x_a , y_a имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= x_a \cos \theta - y_a \sin \theta, \\ y &= x_a \sin \theta + y_a \cos \theta. \end{aligned} \quad (15)$$

Проекции множеств V_1, V_2, V_3 на плоскость изображения — prV_1, prV_2, prV_3 задаются следующим образом:

$$prV_1 = \{(x, y) : -A \leq x \leq A, -A \leq y \leq A\}, prV_2 = \{(x, y) : -30 \leq x \leq 30, -30 \leq y \leq 30\},$$

$$prV_3 = \left\{ (x_a, y_a) : \begin{cases} s = x_a - \Delta x \\ -1,5s \leq y_a \leq 1,5s, 0 \leq s \leq 10 \\ -15 + 0,75(s - 10) < y_a \leq 15 - 0,75(s - 10), 10 < s \leq 30 \end{cases} \right\}. \quad (16)$$

Формула для задания prV_3 работает совместно с (15), что придает ей универсальности. Выражение (7) для рассматриваемого примера трансформируется в следующую:

$$P(E, x_d, y_d) = \sum_{n=1}^3 \begin{cases} -1, (x_d, y_d) \in prV_1 \\ 1, (x_d, y_d) \in prV_2 \\ 1, (x_d, y_d) \in prV_3 \end{cases} \times m_{st}(E) \rho_{st} \times \begin{cases} 0, (x_d, y_d) \in prV_1 \setminus prV_2 \\ H_{st}, (x_d, y_d) \in prV_2 \setminus prV_3 \\ H_{st} + H_a, (x_d, y_d) \in prV_3 \end{cases}, \quad (17)$$

здесь m_{st}, ρ_{st} — МКО и плотность стали.

Выражения (16), (17) в совокупности с предложенной имитационной моделью позволяют построить реалистичные симуляции ЦРИ эталона проникающей способности.

В соответствии с (10), для построения имитационных изображений потребуется вычисление $N_x \times N_y$ интегралов, здесь N_x, N_y — размеры изображений в пикселях по осям X и Y соответственно. Например, для $N_x = N_y = 1000$ потребуется вычислить 10^6 интегралов, что весьма затратно по времени. Для ускорения вычислительного процесса применительно к исследуемому ТО просматривается следующий подход. Для данного ТО существуют всего три уровня толщины $0, H_{st}, H_{st} + H_a$. Соответственно для этих уровней вычисляются средние значения и среднеквадратические отклонения АС, которые в дальнейшем используются при имитационном моделировании ЦРИ, значения АС в каждой точке разыгрываются по закону Гаусса с соответствующими параметрами.

На рис. 2 приведены имитационные изображения ТО (см. рис. 1) при вариации угла θ для следующих условий: $A = 350$ мм; $E_{\max} = 9$ МэВ; $H_{st} = 160$ мм; $H_a = 40$ мм; материал РЧП — $CdWO_4$; $a_d = b_d = 1$ мм; $h_d = 10$ мм; $N_0 = 10^5$. Моделирование проводилось с помощью программы, написанной в системе для математических вычислений MathCad.

Изображения рассматриваемого ТО выглядят реалистично [11], время формирования ЦРИ размером 700×700 пикселей на ноутбуке с процессором Intel(R) Core(TM) i5-83000H CPU с частотой 2,30 ГГц не превосходит 5 с.

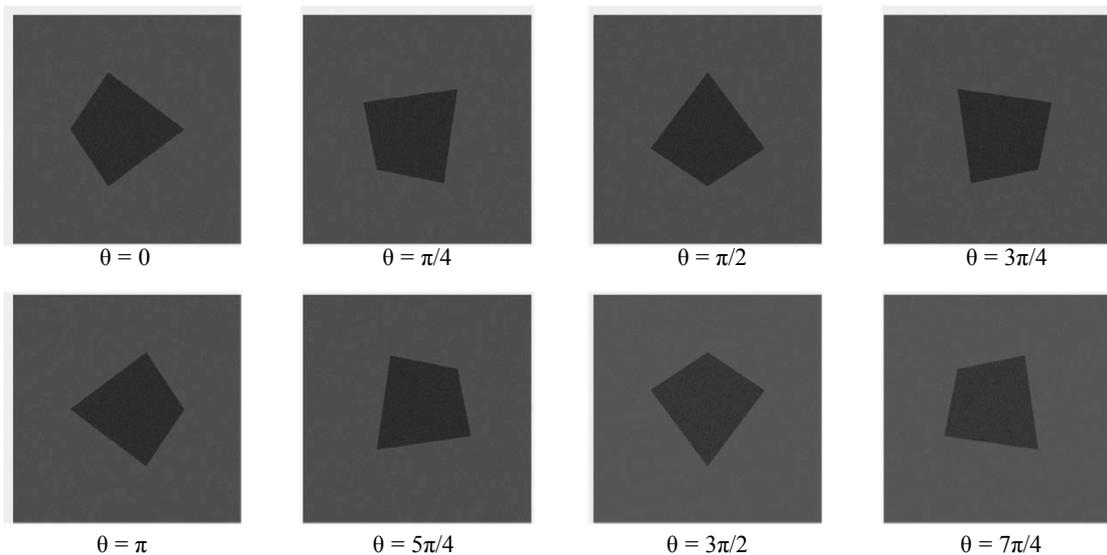


Рис. 2. Имитационные изображения тестового объекта для оценки проникающей способности: $A = 350$ мм; $E_{\max} = 9$ МэВ; $H_{st} = 160$ мм; $H_a = 40$ мм; РЧП — $CdWO_4$; $a_d = b_d = 1$ мм; $h_d = 10$ мм; $N_0 = 10^5$.

2.1.2. Эталон контрастной чувствительности

Контрастной чувствительностью для заданной толщины объекта называется отношение минимального приращения толщины, видимого на ЦРИ, к толщине объекта [14, 24]. Существуют эталоны для оценки контрастной чувствительности: ступенчатые; ступенчатые с отверстиями; канавочные; проволочные; накладные пластины.

Для иллюстрации рассмотрим аналог ступенчатого эталона Н13 по EN 462-2 с увеличенными размерами пластин (рис. 3). Эталон состоит из шести элементов толщиной H_a , равной 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3 мм, толщина ступени и диаметр главных отверстий для каждого элемента совпадают. Для имитационного моделирования ЦРИ были приняты следующие условия: размер изображения $A = 400$ мм; стальная пластина размером 350×350 мм² отцентрирована относительно оси X ; $E_{\max} = 9$ МэВ; толщина ослабляющей пластины $H_{st} = 100$ мм; материал РЧП — CdWO_4 ; $a_d = b_d = 0,2$ мм; $h_d = 0,1$ мм; $N_0 = 10^6$. Дополнительные отверстия имеют диаметры в два и четыре раза превосходящие толщины соответствующих пластин. На рис. 3 жирной точкой отмечено начало отсчета ступеней.

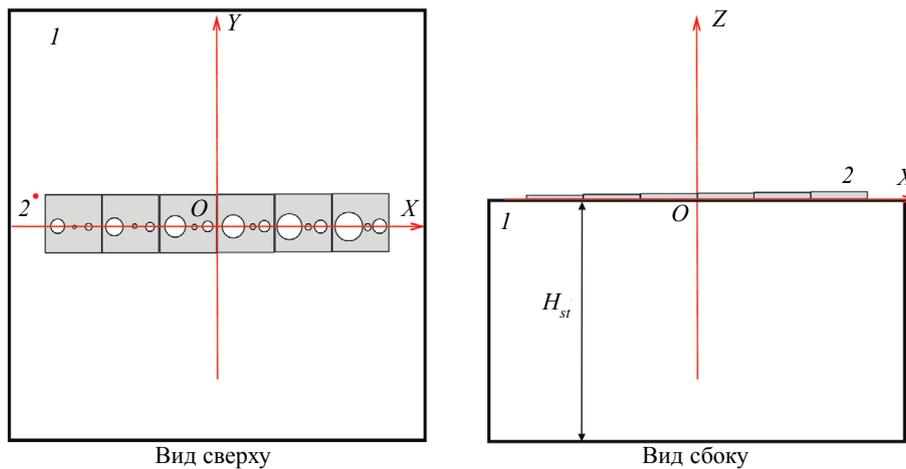


Рис. 3. Вид ТО для оценки контрастной чувствительности, аналог [24]:
1 — стальная пластина размером 35×35 см², 2 — ступенчатый эталон с отверстиями.

Общее количество фрагментов ТО — 26. Выберем поперечный размер пластин $A_a = B_a$, исходя из $H_{a \max} = \max(H_a)$. Можно выбрать $A_a = B_a = 8,8H_{a \max}$. Вращение эталона учитывается с помощью системы (15). Координаты краев ступеней по оси x находятся по формуле $x_{0_n} = -3A_a + (n-1)A_a$, $n = 1 \dots 6$. Для указания противоположного края эталона введем координату $x_{0_7} = 3A_a$. На ступени с номером n , $n = 1 \dots 6$, имеются три отверстия, радиусы R_{j_n} , $j = 1 \dots 3$, которых связаны с толщиной ступеней H_{a_n} соотношениями — $R_{1_n} = 2H_{a_n}$, $R_{2_n} = H_{a_n}/2$, $R_{3_n} = 2H_{a_n}$. Центры отверстий располагаются по оси ступенчатого эталона ($y = 0$) на расстоянии Δ_a от края каждой ступени $\Delta_a = 0,28A_a$; $0,6A_a$; $0,82A_a$. С учетом приведенных параметров геометрической схемы ТО выражения для описания проекций $\mathbf{pV}_1, \mathbf{pV}_2, \dots, \mathbf{pV}_{26}$ имеют вид:

$$\mathbf{pV}_1 = \{(x, y) : |x| \leq A, |y| \leq A\}, \mathbf{pV}_2 = \{(x, y) : |x| \leq 175, |y| \leq 175\}, i = 3 \dots 26,$$

$$\mathbf{pV}_i = \left\{ (x_a, y_a) : \left. \begin{array}{l} k = \left[\frac{i-2}{4} \right] + 1, iv = 4(k-1) + 2 \\ -y_0 \leq y_a \leq y_0, x_{0k} \leq x_a \leq x_{0k+1}, iv = i \\ L_1 = (x_a - x_{0k} - 1,5H_{a \max})^2 + y_a^2 \\ L_2 = (x_a - x_{0k} - 4,5H_{a \max})^2 + y_a^2 \leftarrow -y_0 \leq y_a \leq y_0, x_{0k} \leq x_a \leq x_{0k+1}, iv \neq i \\ L_3 = (x_a - x_{0k} - 7,5H_{a \max})^2 + y_a^2 \\ -y_0 \leq y_a \leq y_0, x_{0k} \leq x_a \leq x_{0k+1}, iv \neq i, (L_1 \geq 0 \vee L_2 \geq 0 \vee L_3 \geq 0) \end{array} \right\} \right. \quad (18)$$

В (18) $[arg]$ есть целая часть arg . Некоторая громоздкость выражения (18) оправдывается сложностью описываемого тестового объекта.

В результате объединения (7) и (18) получим:

$$P(E, x_d, y_d) = m_{st}(E) \rho_{st} \times \left(\sum_{n=1}^{26} \begin{cases} -1, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_1 \\ 1, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_2 \\ 1, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_{\lfloor \frac{n}{4} \rfloor + 1} \\ -1, (x_d, y_d) \in \bigcup_{i=1}^3 \mathbf{prV}_{\lfloor \frac{n}{4} \rfloor + 1 + i} \end{cases} \times \begin{cases} 0, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_1 \setminus \mathbf{prV}_2 \\ H_{st}, (x_d, y_d) \in \left(\mathbf{prV}_2 \setminus \mathbf{prV}_{\lfloor \frac{n}{4} \rfloor + 1} \right) \cup \left(\bigcup_{i=1}^3 \mathbf{prV}_{\lfloor \frac{n}{4} \rfloor + 1 + i} \right) \\ H_{st} + H_a_{\lfloor \frac{n}{4} \rfloor + 1}, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_{\lfloor \frac{n}{4} \rfloor + 1} \setminus \left(\bigcup_{i=1}^3 \mathbf{prV}_{\lfloor \frac{n}{4} \rfloor + 1 + i} \right) \end{cases} \right). \quad (19)$$

При моделировании воспользуемся подходом с ограниченностью количества уровней ЦС.

На рис. 4 приведены результаты имитации ЦРИ ТО при вращении эталона чувствительности для приведенных выше условий и вариацией его геометрического положения. Моделирование проводилось в системе для математических вычислений MathCad. Для лучшего восприятия диапазон изменения яркости откорректирован.

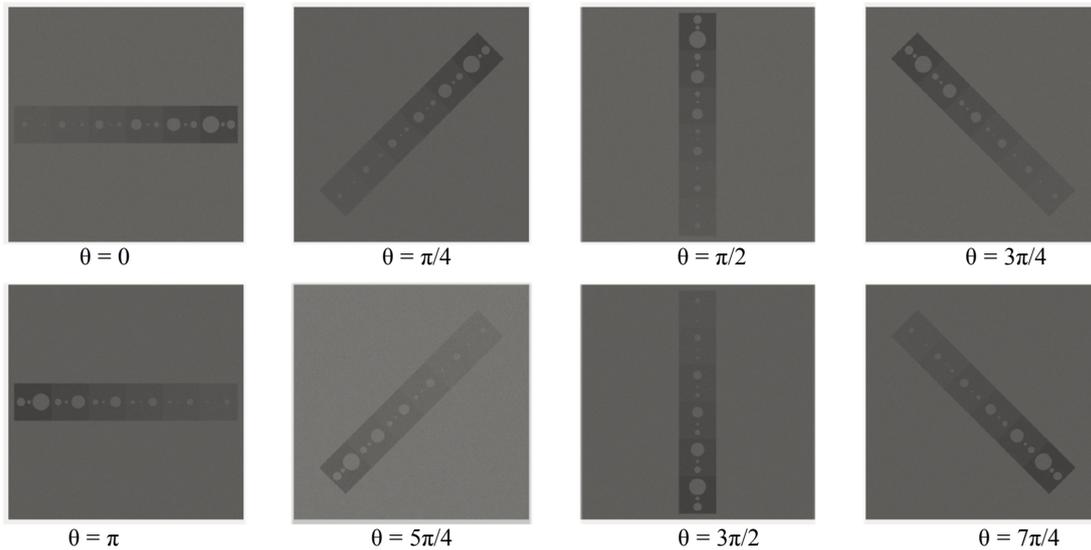


Рис. 4. Имитационные изображения тестового объекта для оценки контрастной чувствительности: $A = 400$ мм; $E_{\max} = 9$ МэВ; $H_{st} = 100$ мм; $H_a = 2, 2,5, 3,2, 4, 5, 6,3$ мм; РЧП — CdWO_4 ; $a_d = b_d = 0,2$ мм; $h_d = 0,1$ мм; $N_0 = 10^6$.

Время моделирования одного изображения составило около 70 с, что оправдано усложнением вычислений и увеличением изображения до 2000×2000 пикселей. Как и в первом случае качество имитации можно признать удовлетворительным [15, 19].

2.1.3. Канавочный эталон разрешающей способности

Для оценки разрешающей способности систем ЦР используют проволочные и канавочные эталоны [14, 24, 25]. Остановимся на канавочных эталонах. Эталон представляет собой стальную пластину толщиной h с несколькими группами канавок одной и той же глубины Δ . Общее число канавок должно быть кратно 3. В k -ой группе имеется три последовательные канавки шириной d_k (рис. 5), расстояние между канавками также равно d_k . Количество групп и шаг уменьшения (увеличения) определяется размерами пикселя.

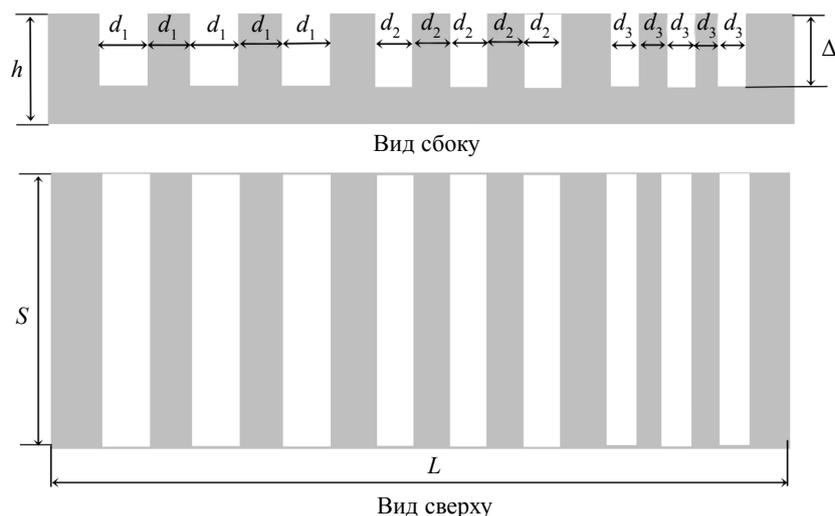


Рис. 5. Эталон для оценки пространственного разрешения.

Для иллюстрации рассмотрим аналог стального эталона пространственного разрешения с четырьмя группами канавок. Выбраны следующие параметры системы ЦР: $E_{\max} = 9$ МэВ; размер изображения — $A \times A = 200 \times 200$ мм²; эталон — стальная пластина размером $S \times L = 50 \times 150$ мм² толщиной $h = 30$ мм с канавками глубиной — $\Delta = 20$ мм; ширина канавок изменяется от $d_1 = 1$ мм до $d_4 = 4$ мм с шагом 1 мм; материал РЧП — CdWO_4 ; $a_d = b_d = 1$ мм; $h_d = 1$ мм; $N_0 = 10^4$. Для данного объекта существует 6 уровней цифровых сигналов при 14 фрагментах. Подход к описанию данного ТО близок по сложности к (18), (19) и соответствующая формула не менее громоздка, поэтому приводить ее не будем.

На рис. 6 приведены результаты имитационного моделирования цифровых радиографических изображений.

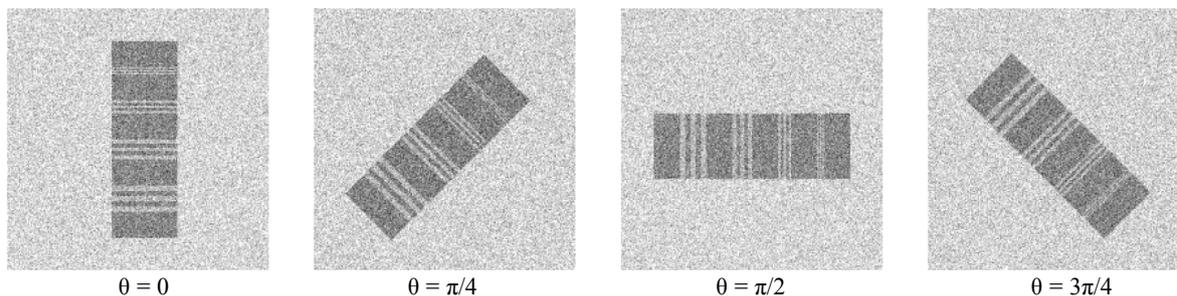


Рис. 6. Имитационные изображения тестового объекта для оценки пространственного разрешения: $E_{\max} = 9$ МэВ; РЧП — CdWO_4 ; $a_d = b_d = 1$ мм; $h_d = 1$ мм; $d_1 = 1$ мм; $d_2 = 2$ мм; $d_3 = 3$ мм; $d_4 = 4$ мм; $h = 30$ мм; $\Delta = 20$ мм; $N_0 = 10^4$.

Изображения ТО для оценки пространственного разрешения системы ЦР, приведенные на рис. 6, выглядят вполне реалистично [26, 27].

Для моделирования изображений за плоским ослабляющим барьером к модели ТО добавляется дополнительный фрагмент (барьер) и соответствующий уровень ЦС.

Следует отметить, что моделирование ЦРИ объектов с фрагментами с размерами, сопоставимыми с размерами пикселя, отличается высокой аналитической сложностью и вычислительной сложностью, связанными с необходимостью учета частичного перекрытия пикселей тенями отмеченных фрагментов. Для устранения этого при моделировании изображений подобных объектов эффективно применение метода трансформации изображений с мелкой апертурой в изображения с крупной (реальной) апертурой. Именно такой подход использован для имитационного моделирования изображений, представленных на рис. 6.

2.2. Примеры промышленных изделий

Промышленность производит огромное разнообразие изделий, поверхности таких объектов и элементов их внутренней структуры допустимо заменять некоторыми гладкими поверхностями, например, цилиндрическими, сферическими, эллиптическими, коническими и т.п.

Разумеется, с точки зрения рассматриваемых в статье вопросов фигуры с однородным содержанием не представляет интереса. Однако моделирование цифровых радиографических изображений таких объектов с дефектами может быть осуществлено с помощью предложенного выше метода. Рассмотрим несколько примеров.

2.2.1. Полый шар

Рассмотрим полый шар радиусом R_0 из циркония (Zr), тень которого полностью помещается на РЧП размером $2A \times 2A$. Введем систему координат XOY с осями, параллельными сторонам квадрата. Центр проекции шара на РЧП может не совпадать с центром квадрата $2A \times 2A$ — O . Пусть координаты проекции центра шара — (x_0, y_0) . По условию рассматриваемый объект является полым шаром. Пусть радиус внутренней сферы равен R_1 , а центр ее проекции смещен относительно внешней проекции на $(\Delta x, \Delta y)$.

Проекция множества точек $\mathbf{pG}(R, x_c, y_c)$, составляющих шар радиусом R с центром в точке x_c, y_c , на плоскость РЧП описывается выражением:

$$\mathbf{pG}(R, x_c, y_c) = \{(x, y) : (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 \leq R^2\}. \quad (20)$$

Очевидно, что ОК состоит из трех фрагментов, проекции которых $\mathbf{pV}_1, \mathbf{pV}_2, \mathbf{pV}_3$ определяются следующим образом:

$$\mathbf{pV}_1 = \{(x, y) : |x| \leq A, |y| \leq A\}, \mathbf{pV}_2 = \mathbf{pG}(R_0, x_0, y_0), \mathbf{pV}_3 = \mathbf{pG}(R_1, x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y). \quad (21)$$

Выражение (7) для рассматриваемого примера трансформируется в следующее:

$$P(E, x_d, y_d) = \sum_{n=1}^3 \begin{cases} -1, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_1 \\ 1, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_2 \\ -1, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_3 \end{cases} \times m_{Zr}(E) p_{Zr} \times \begin{cases} 0, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_1 \setminus \mathbf{prV}_2 \\ H_{ex}, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_2 \setminus \mathbf{prV}_3, \\ H_{in}, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_3 \end{cases}, \quad (22)$$

здесь H_{ex}, H_{in} — хорды для внешней и внутренней сфер, проходящие через точку (x_d, y_d) .

Моделирование проводилось для следующих условий: $E_{\max} = 4,5$ МэВ; размер изображения — $2A \times 2A = 100 \times 100$ мм²; $R_0 = 40$ мм; $x_0 = 0, y_0 = 0$; $R_1 = 25$ мм; $\Delta x = 0, \Delta y = 0$ и $\Delta x = 7$ мм, $\Delta y = 7$ мм; материал РЧП — $CdWO_4$; $a_d = b_d = 0,1$ мм; $h_d = 0,3$ мм; $N_0 = 10^3$. Для случая смещения внутренней сферы рассматривалось дополнительное введение сферы радиусом $R_2 = 5$ мм. На рис. 7 приведены результаты имитационного моделирования.

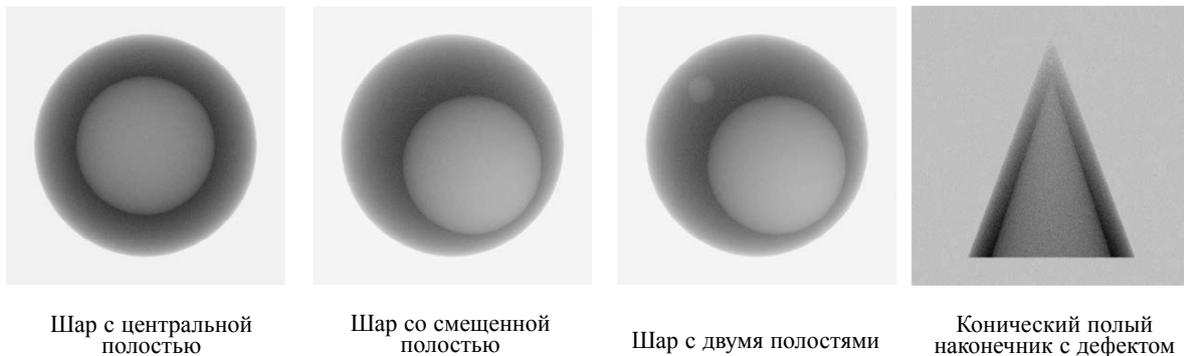


Рис. 7. Модельные цифровые радиографические изображения.

2.2.2. Полный конический наконечник

Во многих отраслях промышленности используются конические наконечники для обеспечения наибольшего проникновения объектов с этими наконечниками в твердую среду или для эффективного разрушения этой среды. Для обеспечения некоторых свойств наконечник выполняют полым. Основной причиной отказов изделий с коническими наконечниками являются дефекты в области острия наконечника.

Рассмотрим стальной наконечник длиной L с радиусом основания R , форма внутреннего воздушного конуса подобна внешней поверхности, радиус внутреннего конуса — R_a , в острие наконечника располагается сферический дефект радиусом r_d .

Свяжем начало системы координат O с точкой на границе РЧП, ось OY совпадает с осью конуса. Тень конуса полностью принадлежит поверхности РЧП размером $2A \times 2A$. Острие наконечника конуса совпадает с точкой $(0, y_c)$.

Проекция конуса с указанными выше параметрами $\mathbf{pG}(R, L, y_c)$ на плоскость РЧП описывается выражением

$$\mathbf{pG}_c(R, L, y_c) = \left\{ (x, y) : |x| \leq y \frac{L}{R}, y_c \leq y \leq y_c + L \right\}. \quad (23)$$

Очевидно, что ОК состоит из четырех фрагментов, проекции которых $\mathbf{pV}_1, \mathbf{pV}_2, \mathbf{pV}_3, \mathbf{pV}_4$ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{pV}_1 = \left\{ (x, y) : |x| \leq A, 0 \leq y \leq B \right\}, \mathbf{pV}_2 = \mathbf{pG}_c(R_0, L, y_c), \mathbf{pV}_3 = \mathbf{pG}_c \left(R_1, \frac{R_1 L}{R_0}, y_c + L - \frac{R_1 L}{R_0} \right), \\ \mathbf{pV}_4 = \mathbf{pG}_s(r_d, 0, y_s). \end{aligned} \quad (24)$$

Выражение (7) для рассматриваемого примера трансформируется в следующее:

$$P(E, x_d, y_d) = \sum_{n=1}^3 \begin{cases} -1, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_1 \\ 1, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_2 \\ -1, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_3 \\ -1, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_4 \end{cases} \times m_{zr}(E) \rho_{zr} \times \begin{cases} 0, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_1 \setminus \mathbf{prV}_2 \\ H_s, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_4 \\ H_{ex}, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_2 \setminus \mathbf{prV}_3 \setminus \mathbf{prV}_4 \\ H_{in}, (x_d, y_d) \in \mathbf{prV}_3 \end{cases}, \quad (25)$$

здесь H_{ex}, H_{in}, H_s — хорды для внешнего и внутреннего конусов и сферического дефекта, проходящие через точку (x_d, y_d) .

Моделирование проводилось для следующих условий: $E_{\max} = 1,25$ МэВ; размер изображения — 100×100 мм²; $R_0 = 30$ мм; $x_0 = 0, y_0 = y_c$; $R_1 = 12,5$ мм; $r_d = 1$ мм, $\Delta x = 0, \Delta y = 0$ и $\Delta x = 7$ мм, $\Delta y = 7$ мм; материал РЧП — CdWO_4 ; $a_d = b_d = 0,2$ мм; $h_d = 0,3$ мм; $N_0 = 10^3$.

Изображения, приведенные на рис. 7, подтверждают эффективность аддитивного метода моделирования ЦРИ с учетом пространственных форм ОК применительно к проектированию систем.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотренные выше примеры тестовых объектов и объектов контроля не полностью исчерпывают сложности пространственных форм реальных объектов. Тестовые объекты для оценки проникающей способности, контрастной чувствительности и пространственного разрешения применяются соответственно стандартам с указанием ориентации относительно источника и регистратора излучения. Фрагменты примеров ОК являются телами вращения и их описание не отличается сложностью.

Многие детали машин, механизмов и оборудованию имеет форму прямоугольных параллелепипедов. Для иллюстрации достаточно рассмотреть кубы. Радиационные тени кубов на плоскость РЧП при изменении ориентации их граней имеют более сложную форму, чем объекты из примеров. Отмеченные тени усложняются при наличии внутренних полостей в кубах, если эти полости имеют форму кубов и ориентацию в пространстве, отличающуюся от внешних кубов.

Логично ввести неподвижную декартову систему координат $XOYZ$ и подвижную систему координат $X_a O Y_a Z_a$, связанную с кубом. Точка O связана центром куба. Система координат $X_a O Y_a Z_a$ получается поворотом системы $XOYZ$. Пусть с поворотом относительно оси X связан угол θ , с осью Y — угол φ и с осью Z — угол χ . Соответствующие матрицы вращения $\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_y, \mathbf{M}_z$ имеют вид:

$$\mathbf{M}_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \mathbf{M}_y = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}, \mathbf{M}_z = \begin{pmatrix} \cos \chi & \sin \chi & 0 \\ -\sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Координаты (x, y, z) и (x_a, y_a, z_a) связаны соотношением:

$$\begin{pmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \quad (27)$$

В качестве матрицы \mathbf{M} выбираются матрицы $\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_y, \mathbf{M}_z$ или их произведения в зависимости от каких осей осуществляются повороты.

Введение системы координат $X_a O Y_a Z_a$ существенно облегчает проверку принадлежности точки кубу, вне зависимости от ориентации его граней относительно исходной системы координат $XOYZ$.

В качестве ОК рассмотрим пластину из циркония толщиной 10 мм размером $95 \times 95 \text{ мм}^2$ с дополнительным кубом размером 40 мм. Варьировали углы θ, φ и χ . Моделирование проводилось для следующих условий: $E_{\max} = 4,5 \text{ МэВ}$; размер изображения — $100 \times 100 \text{ мм}^2$; материал РЧП — CdWO_4 ; $a_d = b_d = 0,2 \text{ мм}$; $h_d = 0,3 \text{ мм}$; $N_0 = 10^4$. Моделирование осуществляли для цельного куба и куба с полостью в форме куба размером 10 мм.

Отметим, что рассматриваемая задача относится к вопросам машинного зрения и традиционно решается геометрическими методами. Геометрическое решение отличается громоздкостью и, соответственно, сложностью вычислений. Для данного примера моделирования для вычисления толщины $H(x_d, y_d)$ фрагмента \mathbf{G} по лучу $L(x_d, y_d)$ в качестве альтернативы был использован общий подход:

$$H(x_d, y_d) = \int_{L(x_d, y_d)} \begin{cases} 1, & (x_d, y_d, z) \in \mathbf{G} \\ 0, & (x_d, y_d, z) \notin \mathbf{G} \end{cases} dz. \quad (28)$$

Очевидно, что подход, основанный на (28), не отличается высокой производительностью, но он абсолютно универсален и интуитивно понятен для любых фрагментов ОК, разумеется, если они допускают аналитическое описание либо имеют численную модель [19].

На рис. 8 приведены результаты имитационного моделирования соответствующих радиографических изображений. Полученные изображения иллюстрируют эффективность предлагаемого

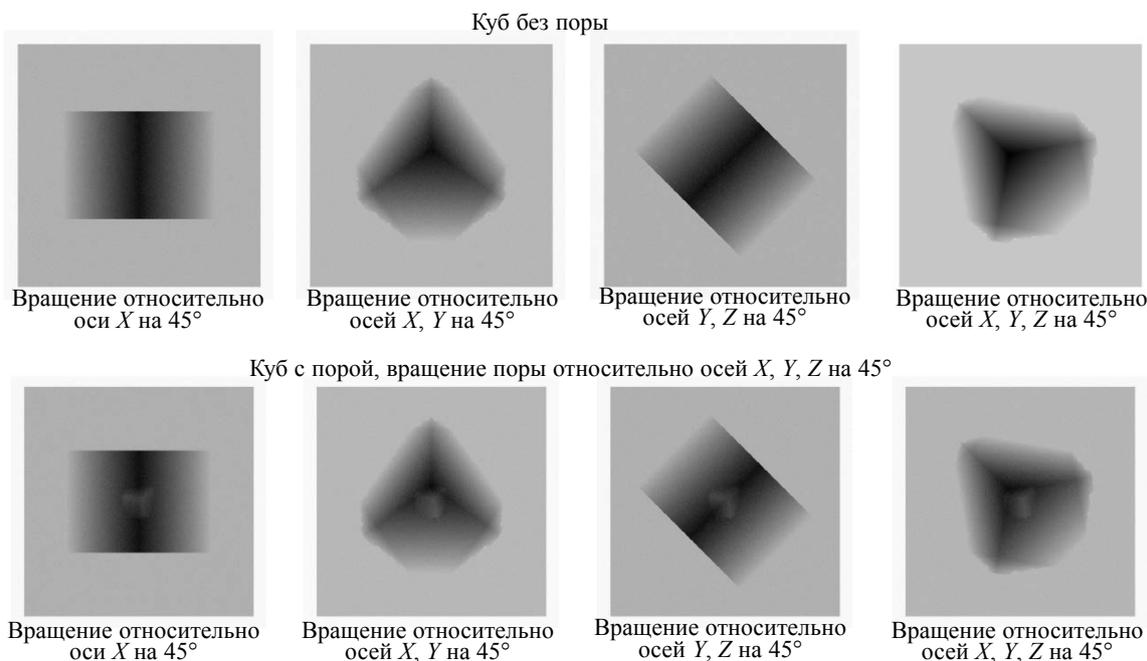


Рис. 8. Имитационные цифровые радиографические изображения кубов за ослабляющей пластиной (материал куба и пластины—цирконий).

подхода к имитационному моделированию достаточно сложных объектов контроля с фрагментами с различной пространственной ориентацией.

Очевидно, что предлагаемый подход к имитационному моделированию ЦРИ с учетом пространственных форм объектов контроля представляет особый интерес и в компьютерной томографии, особенно в связи с развитием аддитивных технологий производства технических изделий [28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к описанию пространственных форм объектов контроля применительно к имитационному моделированию цифровых радиографических изображений. Имитационные модели предназначены для обоснования технической реализуемости задачи контроля объектов и для выбора параметров и оценки характеристик соответствующих систем цифровой радиографии и компьютерной томографии на стадии их проектирования. Для иллюстрации возможностей предложенного подхода к описанию пространственных форм и эффективности разработанных алгоритмов были получены симуляции цифровых радиографических изображений некоторых объектов, включая эталоны чувствительности, пространственного разрешения, разрешающей способности, проникающей способности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Seeram E.* Digital radiography: an overview / Digital Radiography. Springer, Singapore, 2019. P. 1—19. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3244-9_1
2. *Yahaghi E., Movafeghi A., Rokrok B., Mirzapour M.* Defects detection of digital radiographic images of aircraft structure materials via geometric locally adaptive sharpening // Research in Nondestructive Evaluation. 2020. V. 31 (2). P. 107—115. <https://doi.org/10.1080/09349847.2019.1634226>
3. *Mery D.* Computer vision technology for X-ray testing // Insight-non-destructive testing and condition monitoring. 2014. V. 56. No. 3. P. 147—155. <https://doi.org/10.1784/insi.2014.56.3.147>
4. *Khorshidi A., Khosrowpour B., Hosseini S.H.* Determination of defect depth in industrial radiography imaging using MCNP code and SuperMC software // Nuclear Engineering and Technology. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.12.010>
5. *Siryabe E., Juliac E., Barthe A., Ferdinand C.* X-ray digital detector array radiology to infer sagging depths in welded assemblies // NDT & E International. 2020. V. 111. Article 102238. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102238>
6. *Du W., Shen H., Fu J., Zhang G., He Q.* Approaches for improvement of the X-ray image defect detection of automobile casting aluminum parts based on deep learning // NDT & E International. 2019. V. 107. Article 102144. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102144>
7. *Ewert U., Zscherpel U., Jechow M.* Essential parameters and conditions for optimum image quality in digital radiology / 18th World conference on nondestructive testing. Durban, South Africa, 2012. P. 16—20. www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/595_wcndtfinal00594.pdf
8. *Osipov S.P., Zhang G.L., Chakhlov S.V., Shtein M.M., Shtein A.M., Trinh V.B., Sirotyan E.* Estimation of parameters of digital radiography systems // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2018. V. 65. No. 10. P. 2732—2742. <https://doi.org/10.1109/TNS.2018.2870162>
9. *Yaffe M.J., Rowlands J.A.* X-ray detectors for digital radiography // Physics in Medicine & Biology. 1997. V. 42. No. 1. P. 1—39. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/42/1/001>
10. *Silvan A.S.S., Oliveira D.F., Gomes C.S., Azeredo S.R., Lopes R.T.* Evaluation of digital detector arrays systems for industrial radiography // Brazilian Journal of Radiation Sciences. 2019. V. 7. No. 2A. <https://doi.org/10.15392/bjrs.v7i2A.601>
11. *Oh K., Kim J., Kim S., Chae M., Lee D., Cha H., Lee B.* Evaluation and optimization of an image acquisition system for dual-energy cargo inspections // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2018. V. 65. No. 9. P. 2657—2661. <https://doi.org/10.1109/TNS.2018.2864787>
12. *Raad J.A., Kuiper A.* Industrial radiography image forming techniques (General Electric Company, Inspection Technologies). 2007. www.geinspectionstechnologies.com/en
13. *Deyhle H., Towsyfyhan H., Biguri A., Mavrogordato M., Boardman R., Blumensath T.* Spatial resolution of a laboratory based X-Ray cone-beam laminography scanning system for various trajectories // NDT & E International. 2020. V. 111. No. article 102222. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102222>
14. American national standard for determination of the imaging performance of X-ray and gamma-ray systems for cargo and vehicle security screening. Standard ANSI N42.46, 2008.
15. *Khan M., Brothers M., Gillis T.* Computed radiography for high resolution imaging applications of aircraft structures / 11th International Symposium on NDT in Aerospace — Paris-Saclay, France, 2019. https://www.ndt.net/article/aero2019/papers/fp_thu2c1_m_khan.pdf

16. *Haith M.I., Ewert U., Hohendorf S., Bellon C., Deresch A., Huthwaite P., Lowe M.J.S., Zscherpel U.* Radiographic modelling for NDE of subsea pipelines // *NDT&E Int.* 2017. V. 86. P. 113—122. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.11.006>
17. *Keller W.J., Pessiki S.* Enhancing radiographic imaging of cementitious materials in composite structures with photon attenuating inclusions // *Research in Nondestructive Evaluation.* 2019. V. 30. No. 4. P. 231—251. <https://doi.org/10.1080/09349847.2018.1475585>
18. *Kumar S., Menaka M., Venkatraman B.* Radiographic simulation and validation studies on weld joints of annular tanks and cylindrical tanks // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* IOP Publishing. 2019. V. 554. No. 1. Article 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/554/1/012008>
19. *Yao M., Kaftandjian V., Peterzol-Parmentier A., Schumm A., Duvauchelle P.* Hybrid Monte Carlo and deterministic simulation approach for modeling a computed radiography imaging chain from X-ray exposure to optical readout // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 2019. V. 941. Article 162328. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.06.069>
20. *Kengyelics S.M., Treadgold L.A., Davies A.G.* X-ray system simulation software tools for radiology and radiography education // *Computers in biology and medicine.* 2018. V. 93. P. 175—183. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2017.12.005>
21. *Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y.* The mathematical model of image, generated by scanning digital radiography system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* IOP Publishing, 2017. V. 168. No. 1. No. article 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/168/1/012042>
22. *Osipov S.P., Chakhlov S.V., Kairalapov D.U., Sirot'yan E.V.* Numerical modeling of radiographic images as the basis for correctly designing digital radiography systems of large-sized objects // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2019. V. No. 2. P. 136—149. <https://doi.org/10.1134/S1061830919020050>. [Осипов С.П., Чахлов С.В., Кайроланов Д.У., Сиrot'ян Е.В. Численное моделирование радиографических изображений — основа корректного проектирования систем цифровой радиографии крупногабаритных объектов // *Дефектоскопия.* 2019. No. 2. С. 43—55.]
23. *Zav'yalkin F.M., Osipov S.P.* Dependence of the mean value and fluctuations of the absorbed energy on the scintillator dimensions // *Soviet Atomic Energy.* 1985. V. 59. No. 4. P. 842—846. <https://doi.org/10.1007/BF01123317>
24. ASTM E1025 — Standard practice for design, manufacture, and material grouping classification of hole-type image quality indicators (IQI) used for radiology, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018. 37 p.
25. *Halmshaw R.* Radiographic techniques: principles / *Industrial Radiology.* Springer, Dordrecht, 1995. P. 111—145. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0551-4_7
26. *Rueckel J., Stockmar M., Pfeiffer F., Herzen J.* Spatial resolution characterization of a X-ray microCT system // *Applied Radiation and Isotopes.* 2014. V. 94. P. 230—234. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.08.014>
27. *Huda W., Abrahams R.B.* X-ray-based medical imaging and resolution // *American Journal of Roentgenology.* 2015. V. 204. No. 4. P. W393—W397. <https://doi.org/10.2214/ajr.14.13126>
28. *Du Plessis A., Yadroitsava I., Yadroitsev I.* Effects of defects on mechanical properties in metal additive manufacturing: A review focusing on X-ray tomography insights // *Materials & Design.* 2020. V. 187. Article 108385. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108385>