

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ — ОСНОВА КОРРЕКТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2019 г. С.П. Осипов^{1,*}, С.В. Чахлов^{1,**}, Д.У. Кайралапов¹, Е.В. Сиротьян¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634028 Томск, пр-т Ленина, 30
E-mail: *osip1809@rambler.ru; **chakhlov@tpu.ru

Поступила в редакцию 07.05.2018; после доработки 19.10.2018;
принята к публикации 26.10.2018

Разработана математическая модель формирования цифровых радиографических изображений крупногабаритных объектов, учитывающая время сканирования, параметры источника и регистратора тормозного излучения объекта контроля, геометрической схемы сканирования. Предложен высокопроизводительный алгоритм численного моделирования цифровых радиографических изображений, применение которого позволило получить реалистичные изображения крупногабаритных ступенчатых и клиновидных тестовых объектов и объектов контроля, характерных для трубопроводного транспорта. Продемонстрировано обоснование выбора времени сканирования и разрядности аналогово-цифрового преобразователя. Показано, что численное моделирование радиографических изображений является основой корректного выбора параметров систем цифровой радиографии применительно к контролю крупногабаритных объектов.

Ключевые слова: тормозное излучение, цифровая радиография, регистраторы тормозного излучения, разрядность аналогово-цифровых преобразователей, эталоны чувствительности, математическое моделирование.

DOI:10.1134/S0130308219020052

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая радиография (ЦР) широко применяется для контроля объектов ответственного назначения [1—5]. Под такими объектами понимаются технические изделия, эксплуатируемые в жестких условиях, к которым предъявляются высокие потребительские требования по уровням безотказности, долговечности и безопасности. Достижение высоких потребительских характеристик испытываемых изделий возможно только в процессе их производства при должном уровне параметров соответствующих технических средств неразрушающего контроля. Анализируемые объекты отличаются друг от друга размерами, формой, материалами, ограниченностью доступа к областям интереса, поэтому применение универсальных систем ЦР не представляется возможным, причем многие из подобных объектов контроля (ОК) ранее считались непригодными к контролю, в частности, крупногабаритные литые изделия [3, 5, 6]. Многие крупногабаритные ОК отличаются сложностью внутренней пространственной формы. Значительная часть дефектов крупногабаритных ОК может быть обнаружена и идентифицирована методом ЦР. Внушительные размеры ОК обуславливают необходимость применения в системах ЦР высокоэнергетических источников тормозного излучения (ИТИ) [5, 7—10] — бетатронов и линейных ускорителей. Каждый из отмеченных ИТИ обладает своими достоинствами и недостатками. К достоинствам малогабаритных бетатронов относятся их небольшие размеры, масса и высокая стабильность параметров импульсов тормозного излучения, а главным их недостатком является небольшая мощность излучения. В ряде случаев отмеченный недостаток для конечных потребителей таковым не является в силу менее жестких требований к радиационной защите по сравнению с линейными ускорителями. В качестве регистраторов тормозного излучения (РТИ) в системах ЦР применяются линейные, панельные и матричные детекторы [11—14]. Основным достоинством систем ЦР с панельными и матричными регистраторами является их относительно высокая производительность. Главный же недостаток упомянутых регистраторов связан со сложностью ограничения вклада излучения, рассеянного в ОК, в интегральный поток регистрируемого излучения. Он проявляется в ЦР низким радиационным контрастом и невысоким пространственным разрешением [15, 16]. Указанные негативные эффекты заметнее для крупногабаритных ОК. Для уменьшения вклада рассеяния до приемлемых уровней в системах ЦР на базе линейных РТИ пучок фотонов ограничивают щелевыми коллиматорами [13, 17, 18]. Наиболее эффективна одновременная коллимация ИТИ и РТИ. Недостатком систем ЦР с линейными регистраторами является низкая производительность, которая связана с построчным формированием радиографических изображений (РИ) ОК. Во многих РТИ элементы радиационно-оптических преобразователей (РОП) не обособлены от радиации и оптического излучения. Не являются исключением и дорогие линейные регистраторы, в которых первичный преобразователь излучения реализован

в виде полоскового поликристаллического экрана. Обособление элементов РОП приводит к существенному удорожанию РТИ, при производстве которых прослеживается негативная тенденция, связанная с тем, что повышение их собственного пространственного разрешения сопровождается резким снижением эффективности регистрации и производительности систем ЦР.

Существуют два подхода к проектированию систем ЦР применительно к контролю уникальных объектов, отличающихся степенью привлечения научных исследований. В первом обоснованность достижения заданных параметров контроля проверяется экспериментальным путем на имеющейся аппаратуре. В случае близости целей контроля проектирование систем ЦР сводится к повторению или улучшению имеющихся аналогов. Улучшение заключается в использовании более совершенных комплектующих — ИТИ и РТИ, электромеханических устройств перемещения, а также специализированного программного обеспечения, адаптированного к ОК. Второй базируется на научном обосновании проектирования систем ЦР, которое заключается в построении математической модели системы ЦР, численном моделировании, экспериментальной проверке адекватности построенной модели и разработке корректных рекомендаций по выбору компонентов систем ЦР. Математическая модель должна учитывать закономерности испускания, взаимодействия с материалом ОК и регистрации излучения и отслеживать всю последовательность трансформации информации с учетом шумов и смещений средних значений оцениваемых параметров ОК, что позволит осуществить необходимый комплекс технических воздействий и калибровочных процедур с целью повышения качества контроля.

Первый подход связан с традиционным методом «проб и ошибок», поэтому он отличается значительными временными и материальными затратами. Наиболее целесообразным и актуальным для проектирования систем ЦР является подход, основанный на разработке математических моделей формирования цифровых РИ с целью обоснования возможности неразрушающего контроля крупногабаритных ОК методом цифровой радиографии и корректного выбора параметров ИТИ и РТИ.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Математическая модель систем ЦР базируется на математической модели формирования цифровых РИ, которая должна связать цифровые РИ с параметрами основных элементов системы ЦР — ИТИ, ИРИ, ОК с учетом соответствующей геометрической схемы радиографического контроля.

1.1. Геометрическая схема радиографического контроля

На рис. 1 приведена типичная геометрическая схема формирования РИ ОК методом сканирующей ЦР с указанием основных характерных размеров.

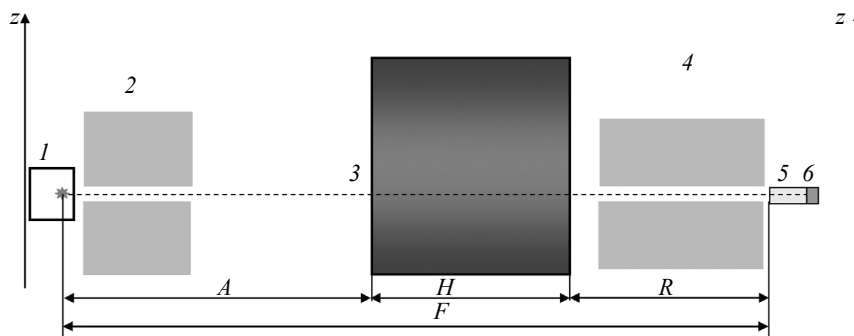


Рис. 1. Геометрическая схема формирования РИ ОК:

1 — ИТИ; 2 — щелевой коллиматор ИТИ; 3 — ОК; 4 — щелевой коллиматор РТИ; 5 — РОП; 6 — многоканальный ФП.

Верный пучок тормозного излучения от источника 1 ограничивается щелевыми коллиматорами ИТИ и РТИ. Строки цифрового РИ формируются линейным РТИ за время измерения t_d , направление сканирования z . Количество элементов M в строке совпадает с количеством фотодетекторов в фотопреобразователе (ФП). Количество строк в РИ N определяется временем измерения t_d и протяженностью ОК L .

Математическая модель формирования итоговых изображений в системах ЦР состоит из двух частей. Первая часть связана с формированием совокупности аналоговых сигналов (АС) и их трансформацией в цифровые сигналы (ЦС) без учета шумовой составляющей. Упомянутая совокупность АС представляет собой дискретное распределение поглощенной энергии тормозного излучения по линейному РТИ. Во второй части математической модели осуществляется моделирование шумов.

1.2. Детерминированная модель формирования цифровых РИ

В настоящее время существует несколько основных вариантов получения цифровых РИ ОК в системах ЦР, каждый из которых однозначно определяется используемым регистратором фотонного излучения. В системах ЦР наиболее часто применяются комбинированные РТИ, состоящие из двух звеньев: РОП и многоканального ФП. В РОП энергия тормозных фотонов, испытавших взаимодействие с материалом РОП, превращается в энергию света. В ФП свет трансформируется в электрические сигналы, которые поступают на вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). В качестве РОП используются сцинтилляционные кристаллы, моно- или поликристаллические экраны. Соотнесем с элементом ФП некоторую часть объема РОП и назовем ее элементарным чувствительным объемом. Выше отмечено, что применительно к формированию РИ в ЦР все виды комбинированных регистраторов можно разделить по уровням световой и радиационной обособленности элементарных чувствительных объемов. Для РТИ на основе экранов уровни радиационной и оптической обособленности минимальны. Сцинтилляционные монокристаллы в РОП линейных регистраторов не имеют взаимной световой связи, натекание же вторичных фотонов и электронов в соседние чувствительные элементы может быть весьма существенным. С учетом закономерностей взаимодействия тормозного излучения и вторичных электронов с веществом могут быть предложены два подхода к уменьшению взаимного радиационного влияния элементарных чувствительных объемов. В первом подходе уровень радиационного влияния уменьшают введением радиационных защитных экранов между элементами РОП, второй связан с удалением указанных объемов друг от друга. Реализация этих подходов на практике приводит к появлению «мертвых зон», которые устраняются специальной процедурой сканирования ОК.

При описании процесса формирования цифровых радиографических изображений в цифровой радиографии будем придерживаться подхода из [19]. Сделаем два важных ограничения: ИТИ — импульсные, РТИ — линейные.

На выходе линейного РТИ имеется совокупность АС, соответствующая одной строке цифрового РИ. Световая энергия от элемента РОП толщиной h_d собирается каналом ФП с площади фронтальной поверхности $a_d \times b_d$. Пусть на нее падает по нормали поток тормозного излучения с максимальной энергией E_m и плотностью потока N_0 . Энергетический спектр $g(E, E_m)$ представляет собой нормированное распределение частиц по энергии. Объект контроля имеет массовую толщину ρH и изготовлен из материала с эффективным атомным номером Z . Аналоговый сигнал $J(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d)$ на выходе канала ФП, формируемый за время t , с точностью до коэффициента преобразования C_T равен поглощенной энергии тормозного излучения

$$J(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d) = C_T (I(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d) + tn) = \\ = tC_T \left(N_0 a_d b_d \int_0^{E_m} E_{ab}(E, a_d, b_d, h_d) g(E, E_m) \exp(-m(E, Z) \rho H) \varepsilon(E, h_d) dE + n \right), \quad (1)$$

здесь $E_{ab}(E, a_d, b_d, h_d)$ — среднее значение поглощенной энергии фотона с энергией E , испытавшего взаимодействие с чувствительным объемом РОП; $\varepsilon(E, h_d)$ — энергетическая зависимость эффективности регистрации тормозного излучения; $m(E, Z)$ — энергетическая зависимость массового коэффициента ослабления (МКО) фотонов материалом ОК; n — энергетический эквивалент интенсивности темнового сигнала в канале регистратора.

Для импульсных ИТИ время формирования строки изображения t ратно $1/\nu$, где ν — частота следования импульсов тормозного излучения.

Выражение (1) справедливо для случая ориентации элемента РОП на центр ИТИ.

Проведение натурных экспериментов для анализа зависимостей $E_{ab}(E, a_d, b_d, h_d)$ влечет за собой значительные временные и материальные затраты. Поэтому исследованию зависимостей методом вычислительного эксперимента на основе моделирования методом Монте-Карло нет альтернативы [20]. В системах ЦР на основе высокоэнергетических ИТИ применяются линейные регистраторы со значительной толщиной РОП с отсутствием оптической связи между чувствительными объемами.

Преобразование АС в ЦС осуществляется аналогово-цифровыми преобразователями. Для АЦП с разрядностью l ЦС изменяется от нуля до $2^l - 1$. Интервал квантования Δ связан с диапазоном изменения ЦС соотношением

$$\Delta = \frac{I(E_m, Z, 0, a_d, b_d, h_d)}{C(2^l - 1)}. \quad (2)$$

Значение коэффициента C в выражении (2) меньше единицы, он предназначен для ограничения цифровых сигналов уровнем $2^l - 1$ при заметных флуктуациях аналоговых сигналов.

Приведем конечное выражение для вычисления ЦС $J_d(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d)$

$$\begin{aligned} J_d(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d) &= \text{int} \left(\left(I(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d) + tn \right) / \Delta \right) = \\ &= \text{int} \left(t \left(N_0 a_d b_d \int_0^{E_m} E_{ab}(E, a_d, b_d, h_d) g(E, E_m) \exp(-m(E, Z) \rho H) \varepsilon(E, h_d) dE + n \right) / \Delta \right), \end{aligned} \quad (3)$$

здесь функция int — целая часть числа.

Для практической оценки ЦС необходимо знать все энергетические зависимости в подынтегральном выражении (3). Энергетические спектры тормозного излучения можно описать формулой Шиффа [21] или выражениями из [22]. В практических приложениях низкоэнергетическая составляющая тормозного излучения отсекается предварительной фильтрацией [23]. Для расчета энергетического спектра ИТИ $g(E, E_m)$ воспользуемся формулой, учитывающей предварительную фильтрацию фотонов,

$$g(E, E_m) = \frac{(E_m - E) \exp(-m_f(E) \rho_f h_f)}{E \int_0^{E_m} \frac{E_m - E}{E} \exp(-m_f(E) \rho_f h_f) dE}, \quad (4)$$

здесь $m_f(E)$ — энергетическая зависимость МКО излучения для материала фильтра; $\rho_f h_f$ — массовая толщина фильтра. Формула (4) близка к ряду описаний энергетических спектров, приведенных в [22].

Зависимость эффективности регистрации от энергии имеет вид

$$\varepsilon(E, h_d) = 1 - \exp(-m_d(E) \rho_d h_d), \quad (5)$$

где $m_d(E)$ — энергетическая зависимость МКО излучения для материала РОП с массовой толщиной $\rho_d h_d$.

Коэффициенты ослабления гамма-излучения вычисляются на основе баз данных по взаимодействию гамма-излучения с веществом [24].

Зависимость $E_{ab}(E, a_d, b_d, h_d)$ может быть рассчитана на основе данных из [20], полученных для цилиндрических сцинтилляторов, с учетом рекомендаций [25, 26].

Для оценки ЦС необходимо определить N_0 — плотность потока фотонов, пересекающих фронтальную поверхность РТИ в случае отсутствия ОК в единицу времени. Для ИТИ мощностью P_m выражение для вычисления N_0 имеет вид

$$N_0 \approx \frac{C_p P_m f(E_m, \varphi)}{F^2(\varphi)}, \quad (6)$$

здесь C_p — коэффициент перевода мощности ИТИ к размерности $1/\text{с}$; φ — угол между осью тормозного излучения и направлением на элементарный чувствительный объем РОП; $F(\varphi)$ — расстояние от центра ИТИ до указанного объема РОП; $f(E_m, \varphi)$ — угловое распределение тормозного излучения с максимальной энергией E_m .

Конкретный вид функции $F(\varphi)$ определяется пространственной формой РТИ, которая может характеризоваться линией, соединяющей центры элементарных объемов РОП или их блоков. На практике используют несколько таких линий: прямая; две пересекающиеся прямые (Г-образный регистратор); дуга окружности. Во всех трех случаях не возникает сложностей в описании функции $F(\varphi)$, которая находится из элементарных геометрических соображений.

Выражения (1), (3), (6) не учитывают ослабление излучения воздухом. При необходимости оно может быть легко учтено.

Выражения (1) используются для описания всех возможных типов аналоговых сигналов: темновых — $J(E_m, Z, \infty, a_d, b_d, h_d)$; опорных — $J_r(E_m, Z_{air}, 0, a_d, b_d, h_d)$; ослабление воздухом — $J(E_m, Z_{air}, 0, a_d, b_d, h_d)$; измерительных — $J(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d)$.

Аналоговые сигналы преобразуются в соответствующие цифровые: $J_d(E_m, Z, \infty, a_d, b_d, h_d)$; $J_{rd}(E_m, Z_{air}, 0, a_d, b_d, h_d)$; $J_d(E_m, Z_{air}, 0, a_d, b_d, h_d)$; $J_d(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d)$.

Одна строка формируемого РИ представляет собой совокупность ЦС с многоканального линейного РТИ. Пусть линия, определяющая пространственную форму регистратора, принадлежит вертикальной плоскости. Для определенности свяжем строку изображения с вертикалью, а столбец — с горизонталью. На исходном цифровом РИ J_d будут выделяться горизонтальные и вертикальные полосы. Горизонтальные полосы связаны с неоднородностью темновых сигналов и коэффициентов преобразования поглощенной энергии в электрический сигнал по линейному регистратору, то есть от канала к каналу, вертикальные обусловлены флуктуациями мощности излучения от импульса к импульсу. Следует также отметить нелинейную зависимость исходных аналоговых сигналов от профиля массовой толщины ОК, что приводит к сложности визуального анализа теней на цифровых РИ объектов, которые существенно отличаются от плоскопараллельного барьера. Для устранения (снижения) влияния указанных факторов на качество визуального изображения ОК над первичным цифровым РИ J_d осуществляют ряд последовательных преобразований. На первом этапе проводится калибровка «по-черному» всех групп цифровых сигналов, сводящаяся к вычитанию значений темновых сигналов, на втором осуществляется нормировка на показания с опорного детектора, третий представляет собой калибровку «по-белому», в которой трансформированные измерительные ЦС нормируются на трансформированные ЦС для ослабления по воздуху, на четвертом преобразованные сигналы логарифмируются. Промежуточное изображение I_d после третьего этапа представляет значительный интерес.

Трансформации исходного цифрового радиографического изображения J_d в итоговое изображение Y описываются соотношением

$$Y(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d) = -\ln \left(\frac{J_d(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d) - J_d(E_m, Z, \infty, a_d, b_d, h_d)}{J_{rd}(E_m, Z_{air}, 0, a_d, b_d, h_d) - J_d(E_m, Z, \infty, a_d, b_d, h_d)} \right) + \\ + \ln \left(\frac{J_d(E_m, Z_{air}, 0, a_d, b_d, h_d) - J_d(E_m, Z, \infty, a_d, b_d, h_d)}{J_{rd}(E_m, Z_{air}, 0, a_d, b_d, h_d) - J_d(E_m, Z_{air}, \infty, a_d, b_d, h_d)} \right). \quad (7)$$

Специфика выражения (7) заключается в том, что оно не допускает упрощений, так как измерения без ОК и с ним проводятся в различные временные интервалы.

Совокупность формул (1)–(7) представляет собой детерминированную математическую модель систем ЦР и описывает связь параметров ЦС с регистраторов тормозного излучения с основными параметрами системы формирования РИ. Указанные формулы могут послужить основой для разработки алгоритма численного моделирования РИ в ЦР.

Ниже рассмотрим шумовую составляющую модели формирования цифровых РИ, которая необходима для оценки уровней шумов по всему изображению ОК и внесения соответствующих искажений в результаты численного моделирования.

1.3. Модель шумов в цифровых радиографических изображениях

Дисперсия аналогового сигнала (1) оценивается следующим образом:

$$\sigma^2 J(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d) = \sigma^2 I(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d) + \sigma^2 (tn). \quad (8)$$

Применение импульсных ИТИ в системах ЦР обуславливает интегральный режим регистрации, для которого дисперсия информационной части аналогового сигнала $\sigma^2 I(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d)$ вычисляется по формуле

$$\sigma^2 I(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d) = \frac{\eta^2(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d)}{N(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d)} I^2(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d), \quad (9)$$

здесь $N(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d)$ — число фотонов, зарегистрированных детектором; $\eta(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d)$ — коэффициент накопления флуктуаций [20, 25].

Число фотонов $N(E_m, Z, \rho H)$ может быть оценено с помощью выражения

$$N(E_m, Z, \rho H, a_d, b_d, h_d) \approx \frac{C_P P_m f(E_m, \Phi) a_d b_d t}{F^2(\Phi)} \int_0^{E_m} g(E, E_m) \exp(-m(E, Z) \rho H) \varepsilon(E, h_d) dE. \quad (10)$$

Выражения (8)—(10) позволяют оценить распределение уровня шумов в исходных РИ и разработать блок их зашумления для реализации алгоритма численного моделирования формирования РИ.

Выражения (1)—(10) описывают краткую математическую модель процесса формирования РИ в ЦР на основе импульсного ИТИ.

Высокоточные оценки средних уровней темновых сигналов и сигналов без ТО, а также сигналов с опорного детектора необходимы для эффективного функционирования описываемых систем. Высокая точность достигается для штатного РТИ вовлечением в оценки выборок большого объема, а также введением в проектируемые системы опорного детектора, близкого к понятию «детектора полного поглощения».

Предложенная математическая модель может быть использована для непосредственного численного моделирования цифровых РИ сложных ОК. Для этого необходимы высокопроизводительные вычислительные системы. Обоснуем этот вывод. Моделирование итогового ЦС в единственной точке изображения сводится к вычислению не менее чем двух интегралов. Пусть численное моделирование производится для изображения размером 2000×2000 пикселей, тогда для моделирования единственного РИ необходимо вычислить 8 млн интегралов. Вывод можно считать подтвержденным.

Ниже обсудим подходы к реализации высокопроизводительного алгоритма численного моделирования цифровых РИ.

2. ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для значительной части объектов ответственного назначения можно сделать допущение об однородности материала (сталь, бронза, дюралюминий), которое позволяет провести необходимый комплекс предварительных калибровочных измерений на тестовых объектах (ТО) из этих материалов с фрагментами различной толщины. В результате обработки полученных измерений строятся необходимые интерполяционные зависимости, описывающие зависимость параметров ослабления тормозного излучения от толщины тестового объекта. Сделаем необходимые разъяснения.

2.1. Замена вычисления интегралов аналитическими функциями

Согласно выражению (1), АС I для конкретного ОК существенно зависит от ρH . Функция $I(\rho H)$ является гладкой и убывает монотонно с ростом ρH , поэтому для натурального или виртуального ТО на этапе калибровок может быть построена точная интерполяция $I_{\text{int}}(\rho H)$. Аналогичные соображения могут быть высказаны и относительно построения функции $N_{\text{int}}(\rho H)$.

Необходимо отметить, что точность интерполяций существенным образом зависит от количества ступеней в тестовом образце i_0 и от соответствующего набора $(\rho H)_i, i = 1 \dots i_0$.

Применение импульсных ИТИ в системах ЦР с линейным РТИ обуславливает необходимость применения специализированного опорного канала.

Численное моделирование РИ с размерами $A \times B$ невозможно без описания функций $(\rho H)(z, x)$, $0 \leq z \leq A$ и $0 \leq x \leq B$, то есть массовой толщины ОК по лучу, соединяющему центр ИТИ и точку с координатами (z, x) .

2.2. Описание функции $(\rho H)(z, x)$ для простейших форм ОК

К простейшим формам ОК следует отнести прямоугольный параллелепипед, клин, конус, цилиндр, шар и эллипсоид. Ряд можно продолжить и далее. Для моделирования внутренней структуры сложных ОК предпочтительным является подход последовательного замещения, который позволяет достаточно просто описать сложные технические объекты. Здесь и ниже будем рассматривать ОК, однородные по материалу.

В цифровой радиографии в качестве ТО используются ступенчатые объекты. Для лучшего анализа влияния некоторых структурных элементов систем ЦР на качество формируемых РИ необхо-

можно использовать также клиновидные объекты. Для исследования чувствительности систем ЦР применяют проволоочные и канавочные эталоны чувствительности. Для численного моделирования наиболее просто описываются канавки, причем размещать их на виртуальных ТО не составляет труда.

2.2.1. Описание функции $(\rho H)^*(z, x)$ для ступенчатых ТО с канавками

Вначале зададим координаты угловой точки тени эталона (z_c, x_c) и размеры эталона $Z \times X$, $z_c + Z < A$ и $x_c + X < B$, высоту и ширину ступени $\Delta H, \Delta z$. В этом случае функция $(\rho H)^*(z, x)$ вне $S = [z_c, z_c + Z] \times [x_c, x_c + X]$ равна нулю, а для $(z, x) \in S$

$$(\rho H)^*(z, x) = \rho \Delta H \Delta z \left(\text{int} \left[\frac{z - z_c}{\Delta z} + 1 \right] + 1 \right) + (\rho H)_{\min}. \quad (11)$$

На виртуальном объекте, определяемом выражением (11), осуществим замещение части объемов канавками глубиной, кратной Δh . С k -й канавкой, $k = 1 \dots k_0$, связано множество $S_k = [z_c, z_c + Z] \times [x_c + \Delta x + k\Delta_0, x_c + \Delta x + k\Delta_0 + \Delta_p]$, здесь $x_c + \Delta x$ — смещение первой полосы от края ТО; Δ_p — ширина каждой полосы; Δ_0 — расстояние между полосками.

Вне канавок функция $(\rho H)(z, x) = (\rho H)^*(z, x)$, а для $(z, x) \in S_k$

$$(\rho H)(z, x) = (\rho H)^*(z, x) - \rho \Delta h k. \quad (12)$$

2.2.2. Описание функции $(\rho H)(z, x)$ для клиновидных ТО с канавками

Пусть тень однородного клиновидного ТО с изменением массовой толщины ρH в диапазоне от $(\rho H)_{\min}$ до $(\rho H)_{\max}$ определяется множеством $S = [z_c, z_c + Z] \times [x_c, x_c + X]$. Функция $(\rho H)^*(z, x)$ вне S равна нулю, для $(z, x) \in S$

$$(\rho H)^*(z, x) = (\rho H)_{\min} + \frac{(\rho H)_{\max} - (\rho H)_{\min}}{Z} (z - z_c). \quad (13)$$

Двумерная функция $(\rho H)(z, x)$ для клиновидного объекта с канавками описывается выражением (12) с подстановкой функции $(\rho H)^*(z, x)$ (13). Для более сложных ОК подход к построению искомой функции не отличается от продемонстрированного выше подхода.

2.3. Численное моделирование радиографических изображений

Зависимости $(\rho H)^*(z, x)$ в совокупности с (1)–(10) являются основой численного моделирования радиографических изображений.

Выше сказано, что аналоговый сигнал равен сумме двух независимых случайных величин — информативного и темнового сигналов.

Средние значения $\overline{nt}$ и среднеквадратичные отклонения σ_{nt} темновых сигналов индивидуальны для каждого канала РТИ. Темновые сигналы имеют распределение, близкое к нормальному, с параметрами $\overline{nt}$ и σ_{nt} . Розыгрыш случайной величины (СВ) nt осуществляется по формуле

$$nt = \max(0; \overline{nt} + \sigma_{nt} \xi_N), \quad (14)$$

здесь и далее ξ_N — СВ, распределенная по нормальному закону с нулевым средним и единичным среднеквадратическим отклонением. Все языки программирования имеют датчики случайных чисел, распределенных по нормальному закону.

При розыгрыше информативного сигнала $I(z, x)$ учитывается выражение (9), связывающее средние значения и дисперсию сигнала,

$$I(z, x) = \max \left(0, I_{\text{int}}(\rho H(z, x)) \left(1 + \frac{\eta \xi_N}{\sqrt{N_{\text{int}}(\rho H(z, x))}} \right) \right). \quad (15)$$

Результаты розыгрышей по формулам (14), (15) суммируются, оцифровываются, калибруются, линеаризуются и поступают на блок трансформации цифровых матриц в полутоновые изображения.

Алгоритм численного моделирования итоговых РИ отличается высоким быстродействием и может быть использован для получения реалистичных изображений ОК для любого набора па-

раметров ИТИ, РТИ, геометрической схемы контроля. Продемонстрируем это для специализированных тестовых объектов (ТО) и крупногабаритных объектов, характерных для трубопроводного транспорта.

3. ПРИМЕРЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТО И ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

3.1. Исходные данные и предварительные расчеты

Исследуем ОК переменного профиля с толщиной до 450 мм по стали. Для таких ОК приемлемым ИТИ является бетатрон на 9 МэВ [27] с мощностью поглощенной дозы излучения 15 сГр/мин на 1 м и частотой следования импульсов $\nu = 400$ 1/с.

В качестве РТИ рассматривался штатный РТИ комплекса высокоэнергетической ЦР Томского политехнического университета. Материал РОП — CdWO_4 . Поперечные размеры элементарного объема РОП составляют $a_d \times b_d = 4 \times 6$ мм², толщина — $h_d = 35$ мм, разрядность АЦП — $l = 16$.

Расстояние от центра ИТИ до РТИ по оси пучка — $F = 5100$ мм, минимальное расстояние от регистратора до объекта контроля по горизонтали — $R_h = 750$ мм.

Для указанной выше мощности поглощенной дозы тормозного излучения число фотонов N_1 , пересекающих площадку 1 см² на 1 м от источника за 1 с, приблизительно равно $N_1 \approx 4,6 \cdot 10^5$. Число фотонов N_{1m} , попадающих на фронтальную поверхность элементарного чувствительного объема по оси пучка, близко к 9840. Число фотонов для периферийных каналов рассчитывается с учетом углового распределения излучения $f(\varphi)$ [28—30] и соответствующих расстояний от центра ИТИ до каналов $F(\varphi)$.

Приведенных исходных и предварительных данных достаточно для численного моделирования РИ в соответствии с изложенным подходом.

3.2. Описание объектов

Объекты, для которых проектируются системы ЦР, изготовлены из стали. Для построения калибровочных кривых для компенсации немоноэнергетичности традиционно предусматривается сканирование ТО в виде ступенчатого эталона с различной толщиной H , изготовленного из материала, близкого к материалу ОК по плотности и эффективному атомному номеру Z . Для рассматриваемого случая $Z = 26$, $\rho = 7,86$ г/см³. Такой принцип организации ТО позволяет сформировать калибровочные функции, но затрудняет анализ влияния разрядности АЦП на качество контроля. Помимо ступенчатых тестовых объектов, рассмотрим дополнительный ТО в форме клина с изменяющимся профилем массовой толщины ρH , перекрывающим весь интересующий диапазон изменения ρH .

В качестве объекта для численного моделирования цифровых РИ может быть взято тело вращения с осевым отверстием (рис. 2а), в максимально обобщенном виде повторяющим контуры ОК, изображения которых приведены на рис. 2а—в.

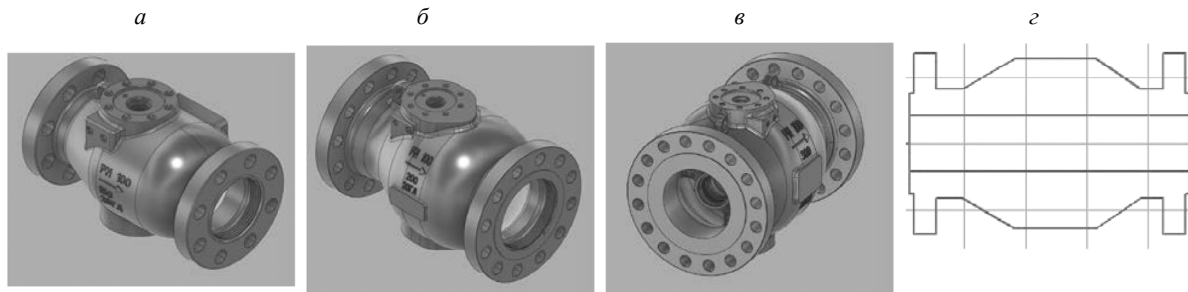


Рис. 2. Внешний вид образцов ОК (а — в) и обобщенная схема сечения ОК (z).

Из анализа изображений ОК можно сделать вывод о том, что максимальная толщина ОК $d_{\text{ст}}$ по стали на просвет определяется диаметрами фланца D_f и центрального отверстия d_c . Параметр $d_{\text{ст}}$ называют максимальной хордой по стали. Именно она и определяет для рассматриваемого случая пригодность ОК к контролю методом ЦР. Вычислительная формула для нахождения $d_{\text{ст}}$ имеет вид

$$d_{\text{ст}} = \sqrt{D_f^2 - d_c^2}. \quad (16)$$

На производительность контроля существенно влияет протяженность ОК (L).

В табл. 1 приведены параметры ОК, изображения которых представлены на рис. 2.

Таблица 1

Параметры объектов контроля

Объект	Параметры				
	D_p , мм	d_c , мм	d_{cr} , мм (16)	ρH_{max} , г/см ²	L , мм
1	265	92	249	195	457
2	430	200	381	299	657
3	585	280	514	404	838

Для иллюстрации влияния разрядности АЦП на качество контроля на рис. 3 приведены результаты оценки толщины ОК в длинах свободного пробега (д.с.п.) с толщиной, изменяющейся в диапазоне от 0 до 430 мм для разрядности АЦП 16, 20 и 24.

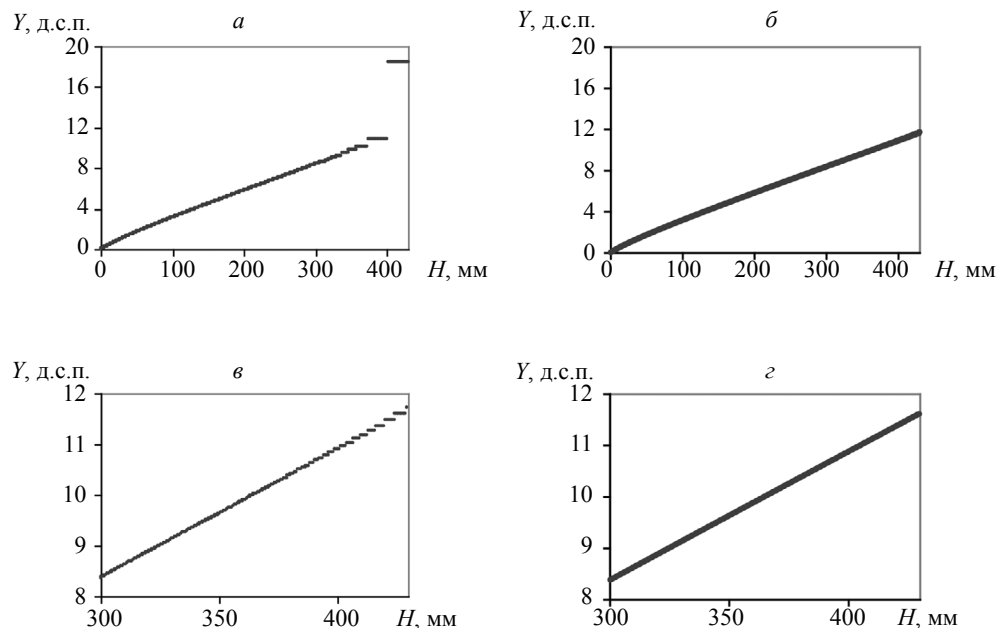


Рис. 3. Зависимость толщины объекта контроля в д.с.п. Y от H , мм:
а — $l = 16$; б, в — $l = 20$; г — $l = 24$.

Для $l = 16$ и толщин $H \geq 300$ мм по стали функция $Y(H)$ становится ступенчатой, что не позволяет оценить H с приемлемой точностью. График на рис. 3в подтверждает предположение о том, что увеличение разрядности АЦП до $l = 20$ разрядов не позволит оправдать ожидания высокой чувствительности к изменению толщины для H , превышающих 350 мм по стали.

3.3. Численное моделирование радиографических изображений

3.3.1. Численное моделирование РИ ступенчатых ТО из стали

В качестве ОК для численного моделирования был выбран ступенчатый ТО из стали с толщиной ступени 20 мм. Объект перекрывает диапазон толщин по стали от 30 до 430 мм. В тестовом объекте вырезаны канавки шириной 10 пикселей поперек ступенек. Глубина канавок изменяется с шагом 2 мм от 2 до 32 мм. Численное моделирование проводилось для условий, описанных выше. Для иллюстрации количество импульсов тормозного излучения и разрядность АЦП варьировались.

Результаты численного моделирования в виде РИ и соответствующих диаграмм (по толщине ТО) по двум ортогональным направлениям приведены на рис. 4—6.

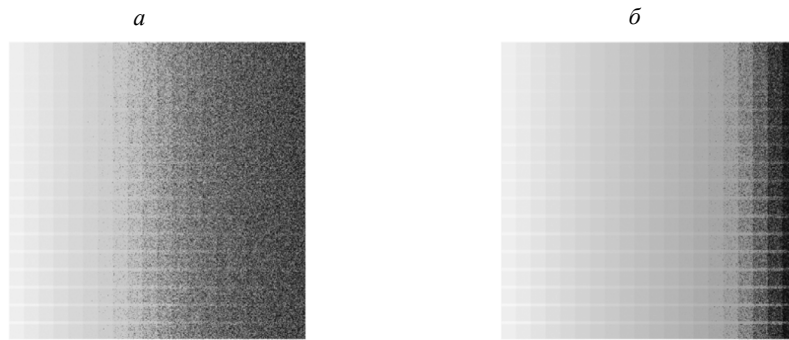


Рис. 4. Результаты численного моделирования радиографических изображений ТО, $k = 16$:
 a — 1; b — 100 импульсов.

На рис. 5б, z представлены зависимости распределения толщины ОК Y в д.с.п. для толщин ступеней 50, 90, 130 и 170 мм по стали.

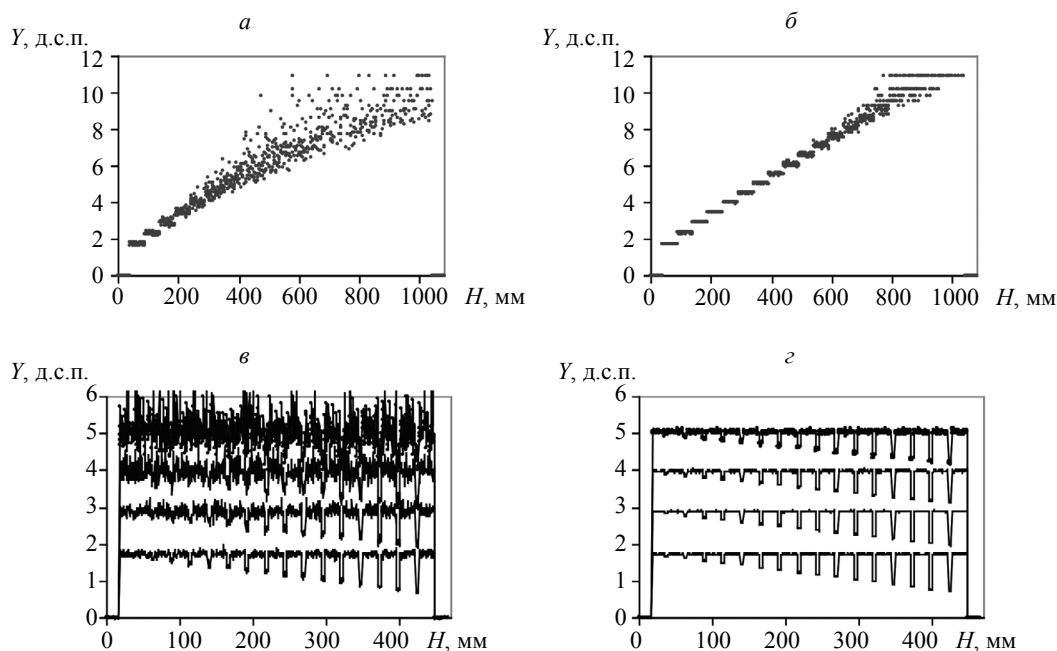


Рис. 5. Толщина ТО в д.с.п., $k = 16$; $a, в$ — 1; $б, г$ — 100 импульсов:
 $a, б$ — по строкам; $в, г$ — по столбцам.

Из анализа данных (см. рис. 3—5) можно сделать вывод о достижимости для описываемой системы ЦР чувствительности к изменению толщины на уровне 2,5 % при аналоговом интегрировании 100 импульсов тормозного излучения.

Для разрядности АЦП $l = 16$ получить приемлемые результаты по чувствительности к изменению толщины для толщин ОК, превышающих 320 мм, невозможно.

3.3.2. Численное моделирование РИ клиновидных ТО из стали

Применение клиновидных ТО в ЦР позволяет на стадии калибровок наглядно очертить область использования метода, что способствует определению предельной толщины ОК $H_{\lim}$ по стали, которая должна быть существенно меньше проникающей способности (ПС) H_{pp} излучения по стали. В стандартах отсутствует строго определенное понятие «проникающая способность». На практике его применяют с учетом фиксированного ИТИ, РТИ, расстояния между ними и времени измерения [31]. В [31] ПС связывается с реальными характеристиками РТИ, что существенно ограничивает область применения систем ЦР по размерам ОК. Слово «ограничение» не несет отрицательного оттенка, так как речь идет о реалистичности задачи проектирования.

Рассмотрим один из подходов, связанный с ограничениями на область применения систем ЦР. Пусть АЦП имеет разрядность l , тогда максимальное значение ЦС $D_{\max}$ с учетом коэффициента переполнения C вычисляется по формуле $D_{\max} = (2^l - 1)/C$. Введем параметр $D_{\min}$, который равен ЦС за ОК с максимальной толщиной по стали. Очевидно, что значение $D_{\min} = 0$ свидетельствует об отсутствии ЦС. Так как имеется намерение увидеть на фоне объекта некий эталон, например, ступенчатый эталон чувствительности, то необходимо выделить некоторое значение $D_{\min} > 1$. Уравнение связи $D_{\min}$, $D_{\max}$ и максимальной толщины ОК в д.с.п. $y_{\max}$ выглядит следующим образом:

$$\text{int}(D_{\max} \exp(-y_{\max})) = D_{\min}. \quad (17)$$

Здесь величина $y_{\max}$ ограничивает диапазон максимальных толщин ОК, для которых возможно применение систем ЦР. Она зависит от параметров систем ЦР, ОК, разрядности АЦП и значения $D_{\min}$.

Для демонстрации было проведено численное моделирование РИ клиновидного ТО с толщиной от 30 до 430 мм, суммировалось 400 импульсов. Зона неопределенности в изображении Y отменялась, если выполнялось ограничение: $y_{ix, iy} \geq y_{\max}$.

На рис. 6 приведены изображения клиновидного ТО (разрядность — $l = 16, 20, 24$; минимальный сигнал — $D_{\min} = 25$ и 100). На рис. знак $\blacktriangleleft$ с указанием мм показывает верхнюю границу максимальной толщины ОК из стали.

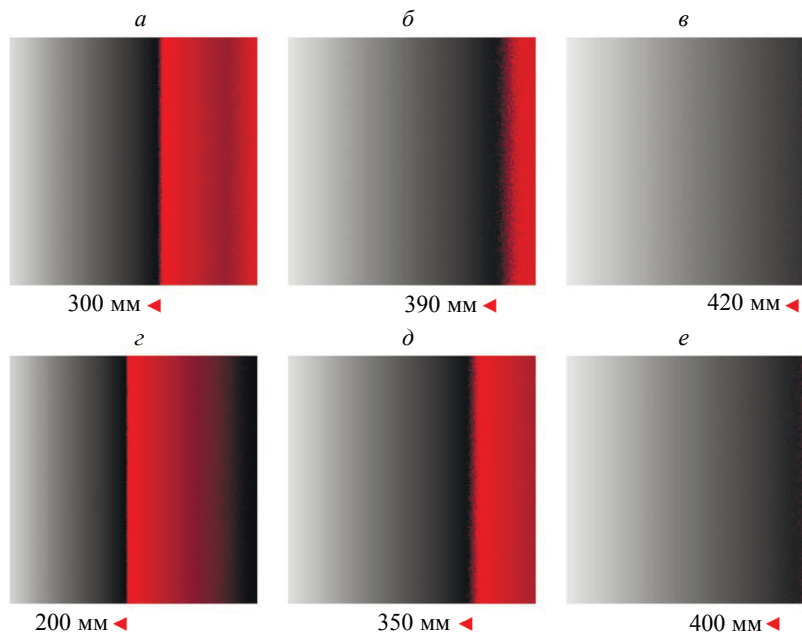


Рис. 6. Изображения клиновидного ТО. $D_{\min} = 25$, разрядность: $a - l = 16$; $б - l = 20$; $в - l = 24$. $D_{\min} = 100$, разрядность: $г - l = 16$; $д - l = 20$; $е - l = 24$.

Видно, что применение АЦП с разрядностью меньше 24 в системах ЦР не позволяет контролировать ОК из стали толщиной 430 мм с необходимым уровнем качества, причем для приведенных выше условий время формирования одной строки изображения не может быть менее 1 с. При численном моделировании было принято, что калибровка «по-черному» уже проведена. Это означает, что на практике ограничения на максимальную толщину ОК могут быть более жесткими.

3.3.3. Численное моделирование РИ объектов контроля

Для иллюстрации была проведена серия вычислительных экспериментов для времени формирования одной строки РИ 1 с. Помимо размеров ОК варьировались разрядность АЦП l с учетом данных, приведенных на рис. 6, минимальный цифровой сигнал за ОК с увеличением его толщины изменяли от $D_{\min} = 100$ до $D_{\min} = 25$. Результаты численного моделирования РИ моделей ОК (рис. 7) подтвердили ожидания относительно пригодности к контролю объектов, представленных на рис. 2.

Приведенные результаты численного моделирования РИ (рис. 4—7) крупногабаритных ступенчатых, клиновидных ТО и объектов, характерных для трубопроводного транспорта, подтверждают выводы из [32—34] о значимости математического и численного моделирования при проектировании систем ЦР.

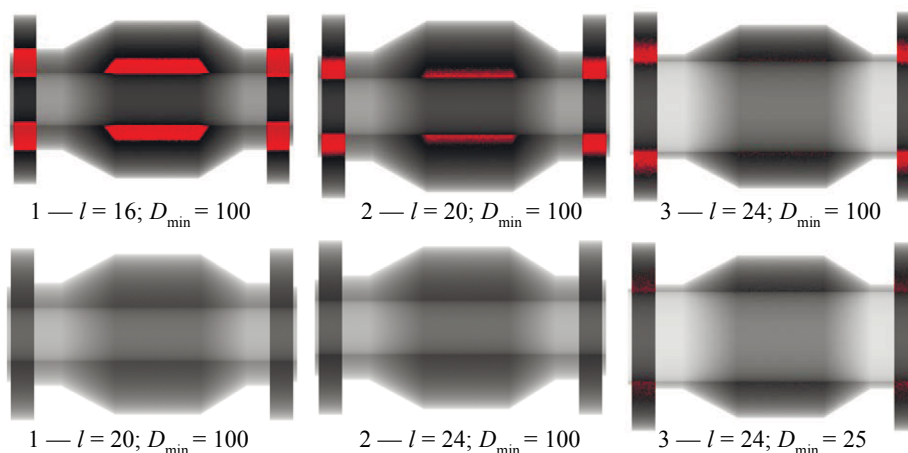


Рис. 7. Результаты численного моделирования РИ моделей ОК с 1 по 3.

ВЫВОДЫ

В статье разработана математическая модель формирования цифровых радиографических изображений крупногабаритных объектов контроля, учитывающая время сканирования, параметры источника и источника тормозного излучения, геометрической схемы контроля, объекта контроля. На основе разработанной математической модели предложен высокопроизводительный алгоритм численного моделирования цифровых радиографических изображений. Применение численного моделирования позволило получить реалистичные изображения крупногабаритных ступенчатых и клиновидных тестовых объектов и объектов контроля, характерных для трубопроводного транспорта. Для анализируемых объектов продемонстрировано обоснование выбора времени сканирования и разрядности аналогово-цифрового преобразователя. Показано, что численное моделирование радиографических изображений является основой корректного выбора параметров систем цифровой радиографии применительно к контролю крупногабаритных объектов.

Исследование проводилось в рамках гранта Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clayton J.E., Virshup G., Davis A. Enhanced image capabilities for industrial radiography applications using megavoltage x-ray sources and digital flat panels // Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2008. International Society for Optics and Photonics. 2008. V. 6935. no. article 69351D.
2. Estre N., Eck D., Pettier J.L., Payan E., Roure C., Simon E. High-energy X-ray imaging applied to nondestructive characterization of large nuclear waste drums // Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA), 2013 3rd International Conference on. IEEE. 2013. P. 1—6.
3. Remakanthan S., Moideenkutty K.K., Gunasekaran R., Thomas C., Thomas C.R. Analysis of defects in solid rocket motors using X-Ray radiography // E-Journal of Non-destructive Testing. 2015. V. 20. P. 6.1—6.8.
4. Martz H.E., Logan C.M., Schneberk D.J., Shull P.J. X-ray Imaging: fundamentals, industrial techniques and applications. London: CRC Press, 2016. 592 p.
5. Hamm R.W., Hamm M.E. (ed.). Industrial accelerators and their applications. London: World Scientific, 2012. 420 p.
6. Manoir Industries. Quality Control. URL: http://www.manoir-industries.com/site/en/ref/Quality-Control_57.html
7. Kozlov S.G., Kuropatkin Y.P., Nizhegorodtsev V.I., Savchenko K.V., Selemir V.D., Urlin E.V., Shamro O.A. Mobile x-ray complex based on ironless pulsed betatrons. X-ray complex conception for small-angle tomography // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 199. No. 1. no. article 012116.
8. Ghose B., Mall V., Dhere B., Kankane D. Digital radiography of solid rocket propellant with 4-Mev linac x-ray using computer radiography (CR) system // National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation. 2011.
9. Kutsaev S., Agustsson R., Arodzero A., Boucher S., Hartzell J., Murokh A., O'Shea, Smirnov A.Y. Electron accelerators for novel cargo inspection methods // Physics Procedia. 2017. V. 90. P. 115—125.
10. Martins M.N., Silva T.F. Electron accelerators: History, applications, and perspectives // Radiation Physics and Chemistry. 2014. V. 95. p. 78—85.

11. *Granfors P.R., Aufrichtig R.* Performance of a 41×41 cm² amorphous silicon flat panel x-ray detector for radiographic imaging applications // *Medical physics*. 2000. V. 27. No. 6. P. 1324—1331.
12. *Von Wittenau A.E., Logan C.M., Aufderheide M.B., Slone D.M.* Blurring artifacts in megavoltage radiography with a flat-panel imaging system: Comparison of Monte Carlo simulations with measurements // *Medical physics*. 2002. V. 29. No. 11. P. 2559—2570.
13. *Michael K.T.* The application of quantitative data analysis for the assessment of flat panel x-ray detectors in digital radiography as part of a quality assurance programme // *Biomedical Physics & Engineering Express*. 2017. V. 3. No. 3. no. article 035004.
14. *Yaffe M.J., Rowlands J.A.* X-ray detectors for digital radiography // *Physics in Medicine and Biology*. 1997. V. 42. No. 1. P. 1—39.
15. *Jaffray D.A., Battista J.J., Fenster A., Munro P.* X-ray scatter in megavoltage transmission radiography: Physical characteristics and influence on image quality // *Medical physics*. 1994. V. 21. No. 1. P. 45—60. DOI: 10.1118/1.597255.
16. *Stritt C., Plamondon M., Hofmann J., Flisch A., Sennhauser U.* Performance quantification of a flat-panel imager in industrial mega-voltage X-ray imaging systems // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2017. V. 848. P. 73—80.
17. *Kotwaliwale N., Singh K., Kalne A., Jha S.N., Seth N., Kar A.* X-ray imaging methods for internal quality evaluation of agricultural produce // *Journal of food science and technology*. 2014. V. 51. No. 1. P. 1—15.
18. *Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Касьянов С.В., Осипов С.П.* Оценка эффективности щелевой коллимации высокоэнергетического источника излучения при радиометрическом контроле крупногабаритных объектов // *Дефектоскопия*. 2006. № 2. С. 40—45.
19. *Osipov S.P., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Shtein A.M., Strugovtsev D.V.* About accuracy of the discrimination parameter estimation for the dual high-energy method // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* / RTEP2014. Tomsk, 2015. V. 81. no. article 012082.
20. *Завьялкин Ф.М., Осипов С.П.* Зависимость среднего значения и флуктуаций поглощенной энергии от размеров сцинтиллятора // *Атомная энергия*. 1985. Т. 59. Вып. 4. С. 281—283.
21. *Schiff L.I.* Energy-angle distribution of thin target bremsstrahlung // *Physical review*. 1951. V. 83. P. 252—253.
22. *Ali E.S.M., Rogers, D.W.O.* Functional forms for photon spectra of clinical linacs // *Physics in medicine and biology*. 2011. V. 57. P. 31—50.
23. *Liu Y., Sowerby B.D., Tickner J.R.* Comparison of neutron and high-energy X-ray dual-beam radiography for air cargo inspection // *Applied Radiation and Isotopes*. 2008. V. 66. No. 4. P. 463—473.
24. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements $Z = 1$ to 92. URL: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>
25. *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.
26. *Завьялкин Ф.М., Осипов С.П.* Расчет функций рассеяния линейки сцинтилляционных детекторов // *Атомная энергия*. 1986. Т. 60. Вып. 2. С. 146—148.
27. URL: <http://www instauro.co.uk/products-2/betatrns/ixb9m/>
28. *Norreys P.A., Santala M., Clark E., Zepf M., Watts I., Beg F.N., Krushelnick K., Tatarakis M., Dangor A.E., Fang X., Graham H., McCanny T., Singha R.P., Ledingham K.W.D., Creswell A., Sanderson D.C.W., Magill J., Machacek A., J. Wark J.S., Allott R., Kennedy B., Neely D.* Observation of a highly directional γ -ray beam from ultrashort, ultraintense laser pulse interactions with solids // *Physics of Plasmas*. 1999. V. 6. No. 5. P. 2150—2156.
29. *Takagi H., Murata I.* Energy spectrum measurement of high power and high energy (6 and 9 MeV) pulsed X-ray source for industrial use // *Journal of Radiation Protection and Research*. 2016. V. 41. No. 2. P. 93—99.
30. *Sandlin S.* X-ray inspection setups for the disposal canister lid weld / Working Report. Finland: Posiva Oy, 2010. 23 p.
31. *Ямный К.О.* Повышение эффективности систем интроскопии крупногабаритных объектов с применением источников низкоинтенсивного излучения / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.11.2013. Минск: БГУ. 2016. 25 с.
32. *Schumm A., Bremnes O., Chassignole B.* Numerical simulation of radiographic inspections: fast and realistic results even for thick components / *Proceedings of the 16 th world conference of Non-Destructive Testing*, Montreal. 2004.
33. *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 International*. 2017. V. 86. P. 113—122.
34. *Haith M.I.* Radiographic imaging of subsea pipelines. A thesis for the degree of Engineering Doctorate. London: Imperial College, Department of Mechanical Engineering, 2016. 150 p.