

С. П. Осипов¹, А.К. Темник², В.С. Воронова¹

(¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,
²Национальный исследовательский Томский политехнический университет;
e-mail: osip1809@rambler.ru)

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ

Проведён анализ проблем формирования и обработки изображений при неразрушающем контроле стальных канатов методом дуальных энергий. Полученные результаты могут быть использованы для повышения безопасности и долговечности подъёмно-транспортных машин, лифтов и подъёмников.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, стальной канат, цифровая рентгенография, метод дуальных энергий, импульсный рентгеновский аппарат.

S. P. Osipov, A.K. Temnik, V. S. Voronova

NONDESTRUCTIVE TESTING OF STEEL ROPES BY METHOD DUAL ENERGY

The analysis of the problems of the generating and processing images in nondestructive testing of steel ropes by method dual energy considered. The results obtained can be used to improve the safety and durability of handling machines, elevators and lifts.

Key words: nondestructive testing, steel rope, digital radiography, the method of dual energy, pulsed X-ray machine.

Обеспечение безопасности и надёжности **подъёмно-транспортных машин и оборудования (ПТМ)**, а также лифтов и подъёмников, в процессе их эксплуатации невозможно без применения соответствующих методов неразрушающих испытаний. Стальные канаты являются одними из наиболее важных тяговых элементов, существенно влияющих на безопасность и надёжность ПТМ. В настоящее время для выявления производственных и эксплуатационных дефектов стальных канатов применяют оптико-визуальные, магнитные, ультразвуковые, электрические и другие методы неразрушающих испытаний [1-3].

С помощью оптико-визуальных методов выявляются поверхностные дефекты стальных канатов (обрывы проволочек, коррозионные поражения). Магнитные и ультразвуковые методы также позволяют выявить указанные дефекты в приповерхностном слое канатов.

Для испытаний канатов большого диаметра возможно применение классической рентгенографии, недостатком которой является использование рентгеновских пленок, что не позволяет оперативно выдавать заключения о техническом состоянии стальных канатов. Кроме того, стоимость проведения подобных работ является достаточно высокой, так как используются дорогостоящие расходные материалы.

В настоящее время широко развивается цифровая рентгенография, отличительной особенностью которой является высокая производительность и способность выявлять различного рода дефекты [4, 5]. Особенно широки области применения одной из разновидностей цифровой рентгенографии – *метода дуальных энергий* [6-7]. В литературе недостаточно данных для научного обоснования применения метода дуальных энергий для дефектоскопии стальных канатов.

Рассмотрим вопросы, связанные с формированием и обработкой изображений при неразрушающем контроле стальных канатов методом дуальных энергий. Метод дуальных энергий основан на формировании двух цифровых рентгеновских изображений, полученных для двух, специальным образом подобранных, максимальных энергий рентгеновского излучения, и последующей их обработке с одновременным получением информации о плотности и эффективном атомном номере материала объекта испытаний.

Существуют различные способы реализации метода дуальных энергий. Указанный в работе [8] способ является наиболее эффективным, так как в нём используется одна линейка детекторов, и формирование двух изображений осуществляется за одно сканирование. Сканирование может быть дискретным и непрерывным. При дискретном сканировании объект испытаний перемещается относительно системы "источник излучения – линейка радиометрических детекторов", смещаясь на каждом шаге на фиксированное расстояние – Δl . При непрерывном сканировании строка изображения формируется за интервал времени Δt .

На рис. 1 приведена структурная схема комплекса цифровой рентгенографии для контроля стальных тросов на основе метода дуальных энергий. Для реализации этого метода для испытания стальных канатов воспользуемся рекомендациями из работы [8] относительно источника излучения. В указанных рекомендациях предлагается применять импульсный источник рентгеновского излучения, причем система управления должна делить поток импульсов на пакеты. В каждом пакете импульсов присутствует n_1 импульсов с максимальной энергией рентгеновского излучения E_1 и n_2 импульсов с максимальной энергией E_2 .

Для определённости примем следующее соотношение между энергиями – $E_1 < E_2$. Регулируемыми параметрами источника рентгеновского излучения являются максимальные энергии E_1 и E_2 , число импульсов в пакете $n_0 = n_1 + n_2$ и доля импульсов с первой энергией $p = n_1/n_0$. Заметим, что во временной интервал, необходимый для формирования одной строки изображения, должно укладываться целое число пакетов импульсов.

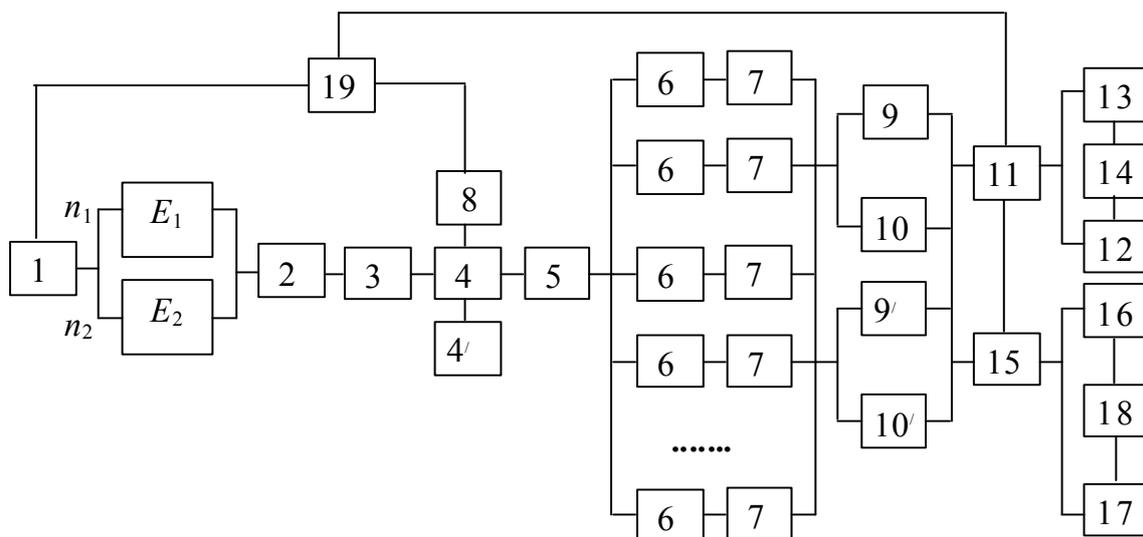


Рис. 1. Структурная схема контроля стальных канатов методом дуальных энергий:

- | | |
|---|--|
| 1 – источник излучения; | 11 – блок трансформации радиационных изображений; |
| 2 – биологическая защита источника излучения; | 12, 13 – конечные полутоновые изображения метода дуальных энергий; |
| 3 – коллиматор источника излучения; | 14 – субъективный блок анализа изображений и принятия решений; |
| 4 – объект контроля (канат); | 15 – блок совместной обработки изображений каната и эталона; |
| 4' – эталон каната; | 16, 17 – изображения дефектов; |
| 5 – коллиматор линейки детекторов; | 18 – объективный блок анализа и принятия решений; |
| 6 – радиометрические детекторы; | 19 – блок управления системой |
| 7 – аналогово-цифровой преобразователь; | |
| 8 – протягивающее устройство; | |
| 9, 10 – цифровые радиационные изображения каната; | |
| 9', 10' – цифровые радиационные изображения эталона каната; | |

Включение в систему регулирования параметров E_1 , E_2 , n_0 , p обусловлено необходимостью контроля стальных канатов различной конструкции в широком диапазоне изменений диаметра. Дополнительным регулируемым параметром является V – скорость протягивания стального каната между источником рентгеновского излучения и линейкой радиометрических детекторов. Введение регулировки этого параметра позволяет изменять производительность контроля и иметь возможность более детального просмотра "подозрительных" участков каната. Временной параметр Δt также регулируется. Его значение определяется скоростью сканирования, длиной участка каната, облучающегося в процессе формирования единичной строки изображения.

Блок биологической защиты предназначен для уменьшения воздействия рентгеновского излучения на персонал. Для уменьшения доли излучения, рассеянного в объекте контроля, в формируемые рентгенографические изображения применяются коллиматоры источника излучения и линейки радиометрических детекторов. Коллиматор источника излучения и биологическую защиту целесообразно совмещать.

Процесс формирования и обработки информации в методе дуальных энергий осуществляется в несколько этапов. Остановимся на основных этапах применительно к контролю стальных канатов.

Формирование цифровых теневых рентгенографических изображений

Для более полного понимания процесса формирования цифровых теневых радиографических изображений рассмотрим упрощенную геометрическую схему рентгенографического сканирования стального каната (рис. 2).

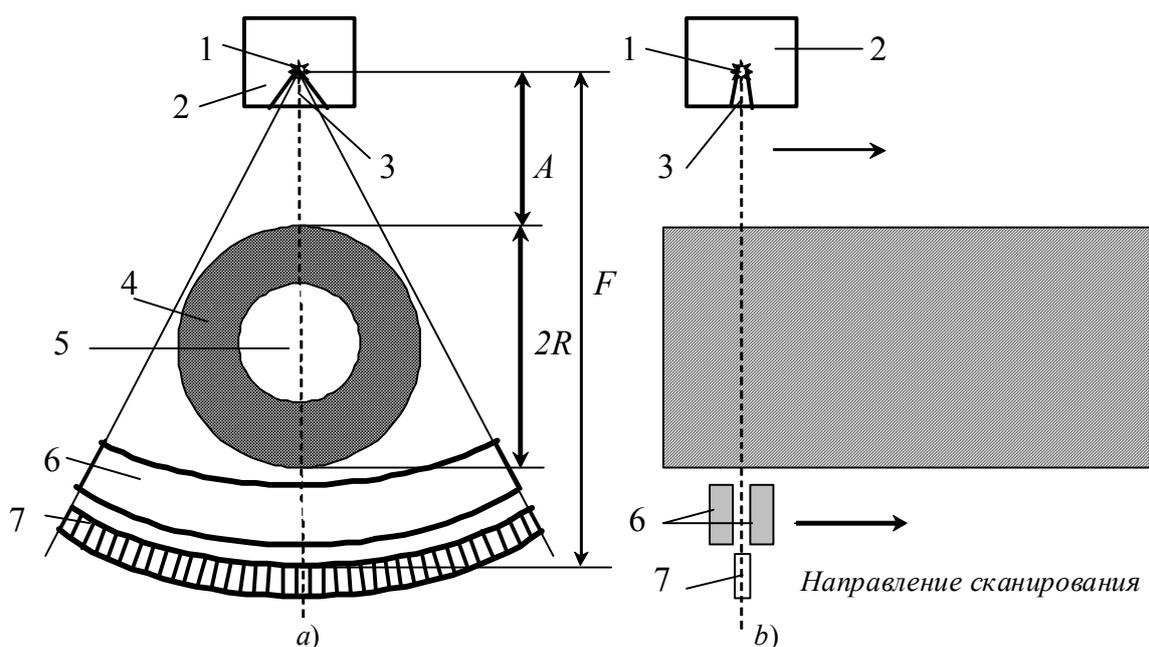


Рис. 2. Геометрическая схема сканирования стального каната:
a – сечение системы контроля в направлении, перпендикулярном направлению сканирования;
b – сечение системы контроля в направлении сканирования

В первом приближении объект контроля (канат) можно представить в виде стальной цилиндрической оболочки радиусом R , внутри которой содержится стальной сердечник. Система радиационного контроля стальных канатов состоит из следующих основных составляющих: источника рентгеновского излучения – 1, биологической защиты – 2 со встроенным коллиматором источника – 3, объекта контроля – 4 с сердечником – 5, коллиматора – 6 линейки детекторов – 7.

Единичные детекторы из линейки детекторов имеют поперечные размеры $a \times a$ и расположены от источника излучения на одинаковом расстоянии F . Кроме этого, геометрическая схема контроля характеризуется расстоянием от источника излучения до объекта контроля – A и параметром l – длиной дуги, которая касается лобовых поверхностей детекторов.

Цифровое радиационное изображение \mathbf{P} представляет собой числовую матрицу, размерность матрицы $m \times n$, здесь $m \ll n$. Значение m совпадает с количеством детекторов в линейке, а значение n определяется длиной каната L и либо шагом смещения линейки Δl , либо временем дискретизации (интегрирования) Δt и скоростью перемещения каната V относительно системы "источник излучения – блок детектирования". Заметим, что значение параметра l связано с размером детектора и величиной m простейшим соотношением:

$$l \approx ma. \quad (1)$$

Разумеется, соотношение (1) справедливо для линейки детекторов, в которой единичные детекторы почти плотно прилегают друг к другу.

На величину параметра l накладывается ограничение:

$$l > 2F \arcsin \frac{R}{R+A}. \quad (2)$$

Значение n находится с помощью одного из выражений:

$$n = \frac{L}{\Delta l}, \quad n = \frac{L}{V\Delta t}. \quad (3)$$

В первом приближении можно считать, что радиометрические детекторы являются детекторами полного поглощения.

В методе дуальных энергий на предварительном этапе формируются два цифровых теневых радиационных изображения $\mathbf{P}(E_k) = \{P_{ij}(E_k), i = 1 \div m; j = 1 \div n\}$, $k = 1, 2$ для рентгеновского излучения с двумя максимальными энергиями E_1 и E_2 . Здесь индекс i обозначает номер детектора, а индекс j – номер шага сканирования (номер строки изображения). Процесс формирования предварительных изображений можно разделить на две стадии.

Первая стадия – это получение теневых радиационных изображений объекта контроля $\mathbf{G}(E_k) = \{G_{ij}(E_k), i = 1 \div m; j = 1 \div n\}$, то есть распределений поглощённой энергии по детекторам линейки через интервалы времени длительностью Δt для рентгеновского излучения с максимальными энергиями E_1 и E_2 :

$$G_{ij}(E_k) = \frac{a^2}{4\pi F^2} \cdot \int_0^{E_k} f(E, E_k) e^{-\int_0^{h(i,j)} \mu(E, x, i, j, k) dx} dE, \quad k = 1, 2, \quad (4)$$

где $f(E, E_k)$ – энергетический спектр рентгеновского излучения с максимальной энергией E_k ;

$h(i, j)$ – толщина объекта контроля по линии, соединяющей источник излучения и центр i -го детектора на j -ом шаге сканирования;

$\mu(E, x, i, j, k)$ – распределение линейного коэффициента ослабления излучения с энергией E по толщине x объекта контроля по линии, соединяющей источник излучения и центр i -го детектора на j -ом шаге сканирования.

Для устранения влияния геометрического ослабления формируются два тневых изображения без объекта контроля при той же геометрической схеме контроля – $G_0(E_1)$ и $G_0(E_2)$.

Вторая стадия процесса формирования предварительных изображений связана с преобразованием аналоговых изображений $G(E_k)$, $G_0(E_k)$ в цифровые радиационные изображения $Q(E_k)$:

$$Q_{ij}(E_k) = \left[\frac{G_{ij}(E_k)}{\Delta G} \right], \quad Q_{0ij}(E_k) = \left[\frac{G_{0ij}(E_k)}{\Delta G} \right] \quad (5)$$

где ΔG – шаг квантования;

квадратные скобки означают целую часть расчётного числа.

Преобразование (5) осуществляет на практике аналогово-цифровой преобразователь, основной характеристикой которого является разрядность k_0 , связанная с числом уровней квантования K_0 соотношением $K_0 = 2^{k_0}$.

Совместная обработка изображений $Q_0(E_k)$ и $Q(E_k)$, $k = 1, 2$ приводит к получению цифровых тневых изображений $T(E_k)$

$$T_{ij}(E_k) = \frac{Q_{ij}(E_k)}{Q_{0ij}(E_k)}. \quad (6)$$

На следующем этапе из изображений $T(E_k)$, $k = 1, 2$ формируются два новых изображения, этот этап и есть собственно метод дуальных энергий.

Метод дуальных энергий

Выше уже указано, что метод дуальных энергий основан на совместном анализе двух радиографических изображений объекта контроля, полученных для двух, специальным образом подобранных энергий рентгеновского излучения. Заметим, что нет необходимости получать оптические изображения для двух энергий. Совместно анализируются изображения $T(E_1)$ и $T(E_2)$.

В методе дуальных энергий [6] используется представление линейного коэффициента ослабления излучения с энергией E ($E < 1,022$ МэВ) – $\mu(E)$ в виде суммы

$$\mu(E) = Xg_1(E) + Yg_2(E), \quad (7)$$

где $g_1(E)$ – функция, описывающая энергетическую зависимость сечения фотоэффекта;

$g_2(E)$ – функция, описывающая энергетическую зависимость сечения некогерентного рассеяния;

X, Y – коэффициенты, зависящие от характеристик ослабляющего излучение вещества.

Особенности процесса получения изображений X и Y для источников рентгеновского излучения подробно рассмотрены в работе [9]. Система уравнений для трансформации изображений $T(E_1)$ и $T(E_2)$ в X и Y записывается следующим образом:

$$\begin{cases} \int_0^{E_1} f(E, E_1) \exp(-X_{ij}g_1(E) - Y_{ij}g_2(E))dE = T_{ij}(E_1) \\ \int_0^{E_2} f(E, E_2) \exp(-X_{ij}g_1(E) - Y_{ij}g_2(E))dE = T_{ij}(E_2) \end{cases} \quad (8)$$

В работе [9] предлагается для решения системы интегрально-параметрических уравнений (8) использовать метод Ньютона или метод касательных.

Возможны два варианта следующего этапа. Первый вариант может быть связан с анализом и обработкой изображений X и Y оператором. В этом случае изображения X и Y преобразуются в цифровые полутоновые изображения X_{Π} и Y_{Π} .

Другим вариантом этапа является совместная обработка изображений X и Y специализированными алгоритмами обработки информации с целью обнаружения и идентификации дефектов.

Вариант 1. Формирование цифровых полутоновых изображений в методе дуальных энергий. На этом этапе из изображений X и Y формируются цифровые полутоновые изображение X_{Π} и Y_{Π} (оптические изображения), представляющее собой матрицы яркостей $X_{\Pi ij}$ и $Y_{\Pi ij}$ в точках с координатами i, j , где $i = 1 \div m$, $j = 1 \div n$.

Алгоритм преобразования изображений X и Y в оптические изображения X_{Π} и Y_{Π} описывается следующими выражениями:

$$X_{\Pi ij} = M \frac{X_{ij} - S_{X0}}{S_{X1} - S_{X0}}, \quad Y_{\Pi ij} = M \frac{Y_{ij} - S_{Y0}}{S_{Y1} - S_{Y0}}, \quad (9)$$

где S_{X0} , S_{Y0} – уровни "чёрного" в изображениях X и Y соответственно;

S_{X1} , S_{Y1} – уровни "белого" в изображениях X и Y ;

M – число уровней (градаций) "серого".

Распространённым является подход, при котором $S_{X0} = \min\{X(i, j), i = 1 \div m, j = 1 \div n\}$, $S_{Y0} = \min\{Y(i, j), i = 1 \div m, j = 1 \div n\}$, а $S_{X1} = \max\{X(i, j), i = 1 \div m, j = 1 \div n\}$, $S_{Y1} = \max\{Y(i, j), i = 1 \div m, j = 1 \div n\}$.

Несоблюдение этого правила может привести к потере информации. Изменение уровней "чёрного" и "белого" может быть связано с необходимостью уменьшения влияния цифрового шума при переходе от исходного радиационного изображения к цифровому оптическому изображению. Для большинства современных систем визуализации число градаций $M = 256$, однако, есть

системы с числом градаций серого до 9600. Пределом для человеческого глаза [10] является $M = 200$. Для систем корректировки изображений повышение числа градаций может быть весьма полезно, так как в этом случае практически не происходит потери информации при использовании различных алгоритмов преобразования оптической информации.

Полученные на рассматриваемом этапе изображения X_{II} и Y_{II} анализируются человеком-оператором с целью выявления дефектов канатов. Первое изображение позволяет выявить дефекты, вызванные отклонением атомного номера материала локальных неоднородностей. По второму изображению преимущественно обнаруживаются дефекты, обусловленные отклонением плотности материала локальной неоднородности. Если дефект уверенно выделяется по второму изображению, то он уверенно выявляется и по первому изображению. Обратное выполняется не всегда. Обрывы проволок обнаруживаются по первому и второму изображениям. Коррозия же проволок или сердечника каната чаще обнаруживается в результате анализа второго изображения.

Вариант 2. Совместная обработка изображений X и Y специализированными алгоритмами. Трудности анализа и расшифровки изображений в рассматриваемой задаче связаны со спецификой объекта контроля. Стальные канаты отличаются многообразием типов. Одной из наиболее сложных конструкций стальных канатов с сердечником является двойная свивка, состоящая из прядей, свитых в один или несколько концентрических слоёв. В свою очередь, каждая прядь состоит из свитых проволок. Отсюда следует, что, в отличие от модели оболочки с внутренним содержимым, стальные канаты имеют более сложную внутреннюю структуру, результирующие изображения которой сложны для непосредственного анализа и интерпретации. Кроме этого, яркости в изображениях каната для граничных и центральных областей существенно различаются, что приводит к различию вероятностей обнаружения дефектов в центре и на периферии изображения каната.

Указанные трудности можно преодолеть, если учесть следующее – для качественно изготовленных канатов суммарная площадь сечения проволок практически не меняется по длине каната, площадь сечения сердечника также практически неизменна. Профили сечения каната с цилиндрическим сердечником отличаются друг от друга лишь поворотом относительно оси на некоторый угол.

Задачей этапа обработки информации является не только обнаружение дефектов, но и определение их размеров в направлении сканирования и в перпендикулярном направлении, а также получение идентификационных параметров дефектов. В данном случае под идентификацией дефектов будем понимать тип дефектов (обрыв, коррозия, потеря сечения и т.д.). Кроме этого, дефектом также является изменение профиля сечения каната, в нашем случае указанное изменение оценивается методом сравнения построчных профилей изображений испытуемого каната и эталона.

Для повышения вероятности обнаружения дефектов можно предложить формирование некоторых конечных изображений X_K и Y_K на основе совместной обработки изображений эталонных образцов канатов X_{Σ} и Y_{Σ} и изображений испытуемых канатов X и Y . Изображение эталонного образца имеет меньшую длину, чем изображение испытуемого каната. Этот недостаток устраняется следующим образом: изображение эталонного образца "склеивается" в цифровом виде со своей копией без изменения ориентации. Длина увеличенного изображения эталона каната должна совпадать с длиной испытуемого каната.

Процедура формирования конечных изображений X_K и Y_K описывается выражениями:

$$X_{Kij} = X_{ij} - X_{\Sigma ij}, Y_{Kij} = Y_{ij} - Y_{\Sigma ij}, i = 1 \div n; j = 1 \div m. \quad (10)$$

Длина эталонного образца должна быть не менее шага свивки, а ориентация эталонного образца и начального участка испытуемого каната по азимутальному углу осуществляется по минимальному отклонению профиля сечений.

Конечные изображения X_K и Y_K будут представлять собой отклонения изображений испытуемого каната и эталона, то есть изображения дефектов. Алгоритмы обработки информации основаны на последовательном анализе строк изображений и могут быть легко реализованы. В рассматриваемом варианте этапа анализ изображений осуществляется автоматически, и заключение о дефектности каната выдается также автоматически. При необходимости автоматически формируется документ с полным описанием обнаруженных дефектов каната с указанием типов дефектов, их размеров, удалённости от начала каната.

Выражения (1)-(8) описывают процесс формирования конечных цифровых изображений при неразрушающем контроле стальных канатов методом дуальных энергий. На основе предложенного могут быть разработаны алгоритмы обработки первичных радиационных изображений, полученных для двух источников рентгеновского излучения с различными максимальными энергиями, с целью повышения вероятности обнаружения дефектов различного типа стальных канатов.

Литература

1. *Минеев А.В., Афанасов В.И., Зайцев А.Н.* Особенности проведения контроля технического состояния талевых канатов в условиях Ванкорского месторождения // Территория Нефтегаз, 2010. № 2. С. 18, 19.
2. *Мироненко А.С., Шпаков И.И.* Неразрушающий контроль стальных канатов пассажирских канатных дорог // Подъёмные сооружения. Специальная техника, 2006. № 5. С. 52-54.
3. *Нифадьев В.И., Шамсутдинов М.М., Токарев А.В., Юданов В.А., Савченко С.А.* Обнаружение мест дефектов и порывов проволок стальных канатов // Вестник КрГУ, 2002. Т. 2. № 4. С. 120-123.
4. *Ванг Карйи, Ченг Яюю.* Разработка рентгеновской цифровой системы визуализации и сбора данных // Дефектоскопия, 2009. № 5. С. 90-96.
5. *Кузелев Н.Р., Коровкин Д.Ю.* Радиоскопический метод неразрушающего контроля // Безопасность окружающей среды. Инновации и безопасность, 2008. № 3. С. 54-57.

6. **Francois Berthiaume, Pierre Gravel, Jacques A de Guise.** Bone enhancement in digital dual energy radiographs from normalization with a synthetic background image // *Physics in Medicine and Biology*, 2008. 53. С. 1259-1275.

7. **Щетинин С.А., Чахлов С.В., Усачёв Е.Ю.** Использование метода двухэнергетической цифровой радиографии для портативных рентгенотелевизионных систем // *Контроль. Диагностика*, 2006. № 2. С. 49-52.

8. **Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Касьянов С.В., Осипов С.П.** Исследование возможности применения малогабаритных бетатронов для идентификации веществ объектов контроля методом дуальных энергий // *Контроль. Диагностика*, 2008. № 8. С. 46-52.

9. **Недавний О.И., Осипов С.П., Сидуленко О.А.** Вычислительные аспекты двухэнергетической цифровой рентгенографии // *Дефектоскопия*, 2002. №3. С. 81-85.

10. **Гуржиев А.Н., Гуржиев С.Н., Кострицкий А.В.** Отображение цифрового рентгеновского снимка на экране компьютера: проблемы и пути решения // *Радиология – практика*, 2005. № 3. С. 52-55.