

4. Uwe EWERT. Strategies for Film Replacement in Radiography -Approaches Used in the New Standards. Available at: <http://www.dir2011.com/Portals/dir2011/BB/we11.pdf>
5. Submission 510(k) – 1470 PGA, К 122928, jan. 30 2013. [http://www.accessdata.fda.gov/cdrh\\_docs/pdf12/K122928.pdf](http://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf12/K122928.pdf)
6. Submission 510(k) – SDX-4336 CP, К 102321, feb. 11 2013. [http://www.accessdata.fda.gov/cdrh\\_docs/pdf10/K102321.pdf](http://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf10/K102321.pdf)
7. Чахлов С.В. Программный комплекс "Диада 4.6". Описание и инструкция по эксплуатации – М.:МИРЭА– 2010– 99 с.

## **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ ДЛЯ ДОСМОТРОВОГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ**

*Удод В.А.<sup>1,2</sup>, Ван Я.<sup>1</sup>, Осипов С.П.<sup>1</sup>, Чахлов С.В.<sup>1</sup>, Темник А.К.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Томский политехнический университет,

<sup>2</sup>Томский государственный университет,

### **Введение**

Одной из главных угроз обществу в XXI веке является терроризм. В подтверждение этому достаточно упомянуть масштабные террористические акты на транспорте [1,2]: 2001 г. – атака на башни-близнецы, США; 2009 – 2010 гг. – взрывы в метро, подрыв поезда Невский экспресс, Россия; 2011 г. – теракт в аэропорту Домодедово (Россия). В качестве ответной меры в России и за рубежом на современном этапе сформировалось отдельное научно-техническое направление, именуемое «антитеррористической диагностикой», призванное обеспечить безопасность пассажирских и грузовых перевозок [2–6].

Спектр задач, решаемых на основе систем антитеррористической диагностики (систем досмотрового контроля объектов) очень широк и включает в себя, в частности, задачи обнаружения взрывчатых, отравляющих и радиоактивных веществ, а также взрывных устройств, всех видов оружия и поражающих элементов [2].

Существующие виды досмотрового оборудования могут быть разделены на следующие большие группы [6]:

1. Технические средства и системы, обеспечивающие выявление объектов по их визуально воспринимаемым образам (по внешнему виду, изображению внутренней структуры, тепловому изображению и др.). К ним относятся:

- оптические увеличительные приборы (лупы), досмотровые зеркала, технические эндоскопы, бороскопы и видеоскопы;
- досмотровые телевизионные системы;
- тепловизоры;
- досмотровые радиационные системы.

2. Технические средства и системы, обеспечивающие выявление объектов по признаковым свойствам материалов и веществ (по электропроводности, магнитной или диэлектрической проницаемости, плотности, химическому составу, наличию нелинейных электромагнитных свойств, радиоактивного излучения и др.). К ним относятся:

- металлоискатели;
- приборы нелинейной радиолокации;
- приборы ультразвуковой эхолокации;
- обнаружители наркотических и взрывчатых веществ (дрейфспектрометры, газоанализаторы, приборы радиационной гамма-квантовой и корпускулярной интроскопии, комплекты химических реактивов, иммунохимические диагностикумы);

– устройства контроля радиационной обстановки.

3. Технические средства и системы, обеспечивающие выявление объектов по признакам работы в них механизмов и электронных устройств (по характерным звукам, вибрациям, электромагнитным излучениям и др.). К этим средствам относится аппаратура обнаружения радиоизлучений (в том числе, побочных электромагнитных излучений), акустических и виброакустических сигналов.

4. Комплексные досмотровые системы, обеспечивающие совмещение функций и возможностей двух или нескольких видов досмотрового оборудования в одной системе. К этим системам можно отнести металлоискатели со встроенным датчиком ионизирующего излучения, мобильные роботизированные комплексы и другие совмещенные системы.

Как следует из многочисленных публикаций (например, [5–10]), в настоящее время среди различных видов досмотровых систем одно из доминирующих положений занимают системы цифровой рентгенографии (СЦР). Описание их современного состояния, опыта практического использования, а также перспектив дальнейшего развития и будет представлено ниже.

#### **Системы цифровой рентгенографии для досмотрового контроля объектов**

Термин «цифровая рентгенография» означает совокупность методов неразрушающего радиационного контроля и диагностики, при которых радиационное изображение просвечиваемого объекта контроля (ОК) преобразуется на определенном этапе в цифровой сигнал. В дальнейшем этот цифровой сигнал заносится в память компьютера и перераспределяется там в двумерный массив измерительных данных, который может подвергаться различным видам цифровой обработки (контрастирование, масштабирование, препарирование, сглаживание и т.п.) и, наконец, воспроизводится на экране дисплея в виде полутонного изображения, непосредственно воспринимаемого оператором [11,12].

Основные усилия специалистов в сфере радиационного досмотрового контроля направлены на создание высокоэффективных источников и детекторов ионизирующего излучения, а также на разработку алгоритмов и программного обеспечения для обработки результатов регистрации излучения. Так, например, в Институте неразрушающего контроля Томского политехнического университета (ИНК ТПУ), совместно с ООО «Фотон», были созданы следующие источники ионизирующего излучения [13]:

– ускорители заряженных частиц – бетатроны МИБ – 7,5Д и РХВ – 9Д (Шток – Т), используемые для досмотрового контроля грузовых автомобилей;

– рентгеновские аппараты РАП 160-2Д, РАП 200-4Д, РАП 300-4Д, используемые для досмотрового контроля легковых автомобилей.

В той же работе [13] отмечается, что в досмотровых СЦР для регистрации прошедшего через ОК излучения чаще всего применяются три основных типа детекторов:

– люминесцентные экраны совместно с ПЗС-камерой;

– люминесцентные экраны совместно с фотодиодной матрицей;

– сцинтилляционные кристаллы в комплексе с фотодиодной линейкой.

В ИНК ТПУ была также разработана оригинальная специализированная программа «Диада», предназначенная для визуального воспроизведения внутренней структуры ОК. Указанная программа была успешно использована в различных системах цифровой радиографии, в частности, – для обнаружения недопустимых радиоэлектронных элементов в печатных платах.

В [14] проведен анализ требований, предъявляемых к измерителям (мониторам) мощности дозы тормозного излучения бетатронов, предназначенных для использования в досмотровых системах и при контроле изделий большого размера. Разработанные авторами мониторы имеют радиационный ресурс не менее 10000 ч, работают в широком температурном диапазоне от – 20 до +50°С и обеспечивают измерение мощностей доз от

0,05 до 50 Р/мин. Геометрические размеры одного из мониторов на энергию 9 МэВ составляют  $30 \times 25 \times 285 \text{ мм}^3$ .

В ряде задач досмотрового контроля возникает необходимость идентификации вещества анализируемого объекта. Это осуществляется с целью выявления принадлежности вещества исследуемого ОК к классу веществ, перемещение которых через границу или перевозка авиационным транспортом запрещены или строго регламентированы. Для идентификации веществ широко применяют методы с использованием источников ионизирующего излучения. Наибольшее распространение получили методы дуальных энергий (МДЭ) [15], основанные на оценке ослабления рентгеновского излучения ОК для двух источников, максимальные энергии которых подбираются специальным образом. Возможны также и различные модификации данного метода: просвечивание ОК дважды – при двух различных напряжениях на рентгеновской трубке (что соответствует двум эффективным энергиям излучения); однократное просвечивание ОК с регистрацией излучения двумя детекторами, расположенными один за другим (по ходу луча), и т.д. При помощи этого метода в содержимом ОК удается разделять предметы по эффективному атомному номеру ( $Z_{\text{eff}}$ ) и, используя цветную палитру идентификации, получить цветное изображение [16], где:

«легким» веществам с  $Z_{\text{eff}} < 10$  присваивают оттенки оранжевого цвета;

«средним» веществам с  $10 < Z_{\text{eff}} < 20$  присваивают оттенки зеленого цвета;

«тяжелым» веществам с  $Z_{\text{eff}} > 20$  присваивают оттенки синего цвета.

В [15] оценен вклад различных составляющих в интегральную погрешность измерения эффективного атомного номера вещества однородного ОК методом дуальных энергий в области энергий до 200 кэВ. Показано, что наибольший вклад в погрешность измерения эффективного атомного номера вносят отклонения максимальных энергий в спектрах рентгеновского излучения.

В работе [17] исследована высокоэнергетическая реализация МДЭ. Указанная реализация основана на предварительном сканировании ОК узкими пучками высокоэнергетического рентгеновского излучения с двумя максимальными энергиями, получении двух цифровых радиографических изображений, последующем раздельном оценивании вкладов комптоновского рассеяния и эффекта рождения пар в ослабление рентгеновского излучения и в формировании изображения параметра идентификации.

Для выпускаемого серийно малогабаритного бетатрона МИБ 4,5/7,5 в работе [18] проведена серия расчетов по оценке влияния различных физических факторов на качество идентификации. Рассмотрены следующие факторы: отклонения максимальных энергий высокоэнергетического рентгеновского излучения от номинальных значений; излучение, рассеянное в объекте контроля; излучение, рассеянное в конструкции досмотрового комплекса. Проведенные исследования доказывают необходимость учета рассмотренных факторов при проектировании досмотровых комплексов с возможностью идентификации веществ ОК и их фрагментов высокоэнергетическим методом дуальных энергий.

В [19] разработан новый алгоритм обнаружения материалов для рентгеновской досмотровой системы багажа, используемой в аэропорте и стратегических местах. Алгоритм основан на МДЭ и спектральном анализе цифровых радиационных изображений ОК.

С целью повышения точности автоматического распознавания ядерных и взрывчатых материалов в досматриваемых объектах (например, контейнеров в морских портах) с использованием МДЭ и высокоэнергетических источников рентгеновского излучения (с максимальной энергией от 2,5 МэВ до 9 МэВ) в [20] предложено осуществлять просвечивание ОК тремя веерными пучками от трех источников излучения. При этом каждый пучок формируется от отдельного источника излучения и регистрируется на соответствующую линейку детекторов.

В работе [21] проведено моделирование досмотровой системы контейнеров, содержащей в качестве источника излучения ускоритель 4 МэВ/9 МэВ и линейку из 960 детекторов с размерами апертуры отдельного детектора  $6 \times 6$  мм<sup>2</sup>. Для идентификации материалов применялась реализация МДЭ, основанная на предположении, что детекторы обладают функцией дискриминатора энергии, т.е. осуществляется разделение потоков импульсов на выходе детекторов электронным путем. Разработанная в результате исследований методика позволила идентифицировать следующие материалы: тканеэквивалентный пластик, Al; Fe; Ag.

Авторами работ [16, 22] исследованы вопросы повышения информативности цифровых радиографических изображений за счет регистрации рентгеновского излучения, прошедшего через ОК, в двух, трех и более энергетических диапазонах. Получены трехэнергетические рентгеновские изображения тестовых объектов с эффективным атомным номером от 7,08 до 8,07. Достигнута точность разделения веществ по эффективному атомному номеру порядка 5 % при использовании детекторов типа сцинтиллятор-фотодиод на базе сцинтиллятора ZnSe(Te).

В работе [23] сообщается, что компания «Rapiscan Systems» разработала досмотровый комплекс на основе линейного ускорителя на 9 МэВ для обнаружения специального ядерного материала в грузовых контейнерах. В данном комплексе используется двухступенчатый процесс досмотра. На первом этапе (основное сканирование) контейнер быстро и полностью проверяется по сформированным с помощью двух независимых массивов детекторов изображениям: традиционный основной массив с высоким пространственным разрешением и массив «грубого» энергетического разрешения. Эти два массива детекторов используются для обнаружения объектов с высоким эффективным атомным номером  $Z$ , таких как свинец, вольфрам, уран. Указанные объекты могут быть потенциальными защитными материалами либо специальными ядерными материалами. На втором этапе области контейнера, которые были определены как области с высоким эффективным атомным номером  $Z$ , повторно проверяются. Проверка осуществляется путем просвечивания найденных областей пучком рентгеновского излучения и регистрацией нейтронного или гамма-излучения, которые испускаются материалом области с высоким значением эффективного атомного номера  $Z$ , если эта область содержит специальный ядерный материал.

В [24] представлено описание опыта практического использования СЦР, предназначенной для досмотра грузовых контейнеров с целью обнаружения специального ядерного материала. Сообщается, в частности, что скорость сканирования ОК составляет порядка 45 см/с. Используемая система цифровой радиографии имеет схожую структуру с досмотровым комплексом [23].

В [25] описана разработка СЦР на основе линейного ускорителя 3 МэВ / 6 МэВ для обнаружения контрабанды в авиационных контейнерах. Для ускоренного обнаружения подозрительного груза осуществляется просвечивание контейнеров под несколькими направлениями (мультивид). Для регистрации излучения используется линейка детекторов с размерами апертуры отдельного детектора  $6 \times 6$  мм<sup>2</sup>. Скорость перемещения (сканирования) составляет около 0,2 м/с. Время, затрачиваемое на получение изображений контейнера в двух ортогональных видах, примерно равно 40 с.

### **Выводы**

1. Развитие СЦР для досмотрового контроля объектов связано, главным образом, с совершенствованием источников и детекторов рентгеновского излучения, а также с созданием высокоэффективных алгоритмов и программного обеспечения цифровой обработки радиометрических сигналов и радиографических изображений.

2. Производительность досмотра может быть значительно увеличена путем применения двухступенчатой процедуры – основное сканирование всего объекта и последующее повторное сканирование выделенных подозрительных зон.

3. С целью повышения эффективности досмотра целесообразно использовать в СЦР многоракурсное просвечивание объекта (мультивид) с одновременным использованием нескольких источников излучения и детекторных массивов.

4. Для повышения надежности обнаружения несанкционированных включений в объектах необходимо дальнейшее развитие как методов увеличения пространственной разрешающей способности СЦР, так и методов идентификации веществ (методов дуальных энергий и их различных модификаций).

*Работа выполнена при финансовой поддержке НИ ТПУ (грант ВИУ ИНК 66 2014).*

#### **Список использованных источников**

1. Клюев В.В., Бобров В.Т. Техническая диагностика – основа безопасности страны // Контроль. Диагностика – 2011 – № 5 – С. 55–61
2. Бобров В.Т. Сессия научного совета по автоматизированным системам диагностики и испытаний РАН по проблемам обеспечения безопасности на транспорте // Контроль. Диагностика – 2011 – № 5 – С. 61–67
3. Park J.S., Kim J.K.. Calculation of effective atomic number and normal density using a source weighting method in a dual energy X-ray inspection system // Journal of the Korean physical society – 2011 – V. 59 – No. 4 – P. 2709–2713
4. Ковалев А.В. Антитеррористическая и криминалистическая диагностика // Контроль. Диагностика. – 2004 – № 2 – С. 21–29
5. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Анализ современного состояния и развития систем цифровой рентгенографии // Известия Томского политехнического университета. – 2008 – Т. 312 – № 2 – С. 47–55
6. Арканов А.П. Технические средства антитеррора.– М.: Изд-во Феникс, 2006 – 56 с.
7. Спиринов Д.О., Бердников Я.А., Гавриш Ю.Н. Принципы интроскопии крупногабаритных грузов // Науч.-техн. ведомости СПбГТУ – 2010 – № 2 – С. 120–127
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. Воробейчиков С.Э., Удод В.А., Клименов В.А., Щетинкин С.А. Алгоритм автоматического обнаружения включений в объекте контроля с использованием сканирующей системы цифровой рентгенографии (одномерный вариант)// Дефектоскопия – 2014 – № 6 – С. 65–77
10. Буклей А.А. Исследования и создание портативной досмотровой рентгеновской техники и оборудования НК. Разработка технологии их применения // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 4. – С. 76–80.
11. Клюев В.В., Соснин Ф.Р. Современное состояние цифровой рентгенотехники // Дефектоскопия – 1999 – № 4 – С. 56–66
12. Соснин Ф.Р. Современные методы и средства цифровой рентгенографии (обзор) // Заводская лаборатория – 1994 – Т. 60 – № 6 – С. 28–34
13. Клименов В.А., Касьянов В.А., Лебедев М.Б., Москалев Ю.А., Темник А.К., Штейн М.М., Чахлов С.В. Современное состояние и перспективы создания конкурентоспособных на мировом рынке систем цифровой радиографии (СЦР)// Контроль. Диагностика – 2011 – Специальный выпуск – С. 25–29
14. Волков В.Г., Штейн М.М. Мониторы тормозного излучения бетатронов для контроля крупногабаритных изделий и транспортных средств // Контроль. Диагностика – 2013 – № 9 – С. 78–80
15. Клименов В.А., Осипов С.П., Темник А.К. Идентификация вещества объекта контроля методом дуальных энергий // Дефектоскопия – 2013 – № 11 – С. 40–50
16. Рыжиков В.Д., Ополонин А.Д., Волков В.Г., Лисецкая Е.К., Галкин С.Н., Воронкин

- Е.Ф. Трехэнергетическая цифровая радиография для разделения веществ с малым эффективным атомным номером // Вісник НТУ «ХПІ» – 2013 – № 34 (1007) – С. 43–51
17. Клименов В. А., Алхимов Ю.В., Штейн А.М., Касьянов С.В., Бабилов С.А., Батрагин А.В., Осипов С.П. Применение и развитие методов цифровой радиографии для технической диагностики неразрушающего контроля и инспекции// Контроль. Диагностика – 2013 – № 13 – С. 31–42
  18. Осипов С.П., Темник А.К., Чахлов С.В. Влияние физических факторов на качество идентификации веществ объектов контроля высокоэнергетическим методом дуальных энергий // Дефектоскопия – 2014– № 8 – С. 69–77
  19. Pourghassem H., Fesharaki N.J., Tahmasebi A. Material detection based on GMM-based power density function estimation and fused image in dual-energy X-ray images // Proceedings 4th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, CICN 2012 – 6375134 – P. 364–368
  20. Frosio I., Borghese N.A., Lissandrello F., Venturino G., Rotondo G. Optimized acquisition geometry for X-ray inspection// Conference Record – IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference 2011 – 5944195 – P. 300–305
  21. Radiography simulation on single-shot dual-spectrum X-ray for cargo inspection system / Y. Gil, Y. Oh, M. Cho, W. Namkung // Applied Radiation and Isotopes – 2011 – V. 69 – № 2 – P. 389–393
  22. Opolonin O.D., Ryzhikov V.D. Increasing informativity of digital radiographic systems // Functional Materials. – 2013 – V. 20 – No 4 – P. 528–533
  23. Stevenson J., Gozani T., Elsalim M., Condron C., Brown C. Linac based photofission inspection system employing novel detection concepts // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2011 – V. 652 – № 1 – P. 124–128
  24. Erin A. Miller, Joseph A. Caggiano, Robert C. Runkle, Timothy A. White, Aaron M. Bevill Scatter in cargo radiography // Applied Radiation and Isotopes – 2011 – V. 69 – № 3 – P. 594–603
  25. Xinhui Duan, Jianping Cheng, Li Zhang, Yuxiang Xing, Zhiqiang Chen, Ziran Zhao X-ray cargo container inspection system with few-view projection imaging // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2009 – V. 598 – № 2 – P. 439–444

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНОГО НАНОСКОПА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Гелевер В. Д., Усачев Е.Ю., Манушкин А. А.*

Московский государственный технический университет радиотехники,  
электроники и автоматики МИРЭА (МГТУ МИРЭА)

Для изучения структуры и состава наноструктурированных материалов используются различные виды электронных, зондовых и оптических микроскопов.

Электронная и зондовая микроскопии позволяют, в основном, получать изображение поверхности объектов, но у значительной части наноструктурированных материалах многие свойства связаны с внутренней структурой. Для получения сведений о внутренней структуре часто изучаются сколы и изломы, которые подготавливаются по определенным методикам. Кроме того, применяя послойное травление поверхности объекта ионным пучком, можно получать сведения о внутреннем строении объектов. Но эти разрушающие и дорогостоящие методы не дают полной и оперативной информации о