

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Направление подготовки/профиль _____ 12.06.01 Фотоника, приборостроение, оптические
и биотехнические системы и технологии _____

Школа _____ Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности _____

Отделение _____ Российско-китайская научная лаборатория радиационного контроля и досмотра _____

**Научный доклад об основных результатах подготовленной
научно-квалификационной работы**

| Тема научного доклада |
|---|
| Распознавание материалов методом дуальных энергий при радиационном контроле объектов УДК 620.179.152.1 |

Аспирант

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-------------|---------|------|
| А4-33 | Ван Яньчжао | | |

Руководителя профиля подготовки

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------|--------------|---------------------------|---------|------|
| Профессор ИШФВП | Юрченко А.В. | д.т.н. | | |

Руководитель отделения

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|-------------|---------------------------|---------|------|
| Зав. РКНЛ РКД | Чахлов С.В. | к.ф.-м.н. | | |

Научный руководитель

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------|-----------|---------------------------|---------|------|
| в.н.с. РКНЛ РКД | Удод В.А. | д.т.н. | | |

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель изображения, сформированного многоканальной сканирующей системой цифровой рентгенографии.
2. Математическая модель радиационной прозрачности объекта контроля.
3. Множество допустимых решений для метода дуальных энергий.
4. Алгоритм статистической оценки влияния квантовых шумов на качество распознавания материалов контролируемых объектов методом дуальных энергий.

Актуальность темы. Радиационные методы неразрушающего контроля и диагностики на современном этапе своего развития являются высокоразвитым научно-техническим направлением, охватывающим разнообразные сферы жизнедеятельности человека – промышленность, медицину, досмотр (с целью обеспечения безопасности пассажирских и грузовых перевозок) и т.д.

Для проведения досмотра, а также для дефектоскопии и диагностики материалов и изделий на сегодняшний день широко используются, а во многих случаях и явно преобладают по частоте применения, многоканальные сканирующие системы цифровой рентгенографии (МССЦР). Принцип действия данных систем состоит в том, что объект контроля (ОК) в процессе своего перемещения просвечивается веерным пучком излучения, а прошедшее через ОК излучение регистрируется линейкой детекторов.

В ряде задач досмотрового контроля возникает необходимость распознавания материала ОК с целью выявления его принадлежности к классу объектов, перемещение которых запрещено или строго регламентировано.

Требуемая эффективность досмотрового контроля во многих случаях достигается посредством применения специализированных физических методов. Одним из них в настоящее время является метод дуальных энергий (МДЭ). Сущность этого метода состоит в том, что ОК подвергается

просвечиванию дважды – при двух разных напряжениях на рентгеновской трубке, а результаты регистрации излучения обрабатываются по определенному алгоритму для получения оценки атомного номера (либо эффективного атомного номера) материала ОК, на основании которой принимается решение об опасности (либо неопасности) ОК. Существуют различные модификации в реализации данного метода, например, – однократное просвечивание ОК при одновременной регистрации излучения двумя детекторами, которые располагаются друг за другом по ходу рентгеновских лучей, или использование вместо рентгеновских аппаратов высокоэнергетических источников тормозного излучения (линейные ускорители и бетатроны).

Качество распознавания материалов методом дуальных энергий определяется большой совокупностью разнообразных факторов, среди которых одним из наиболее существенных является наличие статистических флуктуаций результатов регистрации излучения, обусловленных квантовой природой излучения (квантовые шумы). Несмотря на отдельные значимые результаты различных авторов, исследовавших в той или иной степени влияние квантовых шумов на точность определения атомного номера материала ОК с помощью МДЭ, на сегодняшний день в научной литературе не представлен детально описанный алгоритм для оценки такого влияния. Разработка такого алгоритма является весьма важной задачей, неразрывно связанной с созданием более эффективных систем рентгеновского досмотрового контроля и с разработкой обоснованных правил их практического применения.

Вполне очевидно, что совершенствование МДЭ, в частности – на основе вышеописанного алгоритма позволит увеличить надежность обнаружения с использованием МССЦР запрещенных предметов в ОК, а значит – повысить уровень безопасности, что, несомненно, является весьма актуальной задачей.

Цель работы – количественная оценка влияния квантовых шумов на качество распознавания материалов контролируемых объектов методом дуальных энергий с использованием МССЦР.

Основные задачи:

1. Разработать математическую модель изображения, сформированного МССЦР, которая учитывает трансформацию энергетического спектра рентгеновского излучения ОК и шум, обусловленный квантовой природой излучения.

2. Провести сравнительный анализ различных способов, применяемых для оценки эффективного атомного номера материала неоднородного объекта.

3. Разработать математическую модель радиационной прозрачности ОК с учётом квантового шума.

4. Разработать алгоритм статистической оценки влияния квантовых шумов на качество распознавания материала ОК с помощью МДЭ.

Список литературы

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р. Современное состояние цифровой рентгенотехники.— Дефектоскопия, 1999, № 4, с. 56–66.

2. Соснин Ф.Р. Современные методы и средства цифровой рентгенографии (обзор).— Заводская лаборатория, 1994, т. 60, № 6, с. 28–34.

3. Doucette Ed. Digital radiography: the basics. – Mater. Eval, 2005, v.63, No. 10, p. 1021–1022.

4. Charnock P., Connolly P.A., Hughes D., Moores V.M. Evaluation and testing of computed radiography systems.— Radiat. Prot. Dosim, 2005, v. 114, No. 1–3, p. 201–207.

5. Недавний О.И., Удод В.А. Современное состояние систем цифровой рентгенографии (обзор).— Дефектоскопия, 2001, № 8, с. 62–82.

6. 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.

7. Камалов И.И. Перспективные направления цифровой (цифровой) рентгенографии.— Вестн. соврем. клин. мед., 2011, т. 4, № 2, с. 44–46.

8. Кантер Б.М. Исследование и разработка методов и средств рентгеновской цифровой медицинской диагностики. Автореферат дис. ... доктора техн. наук.— Москва, 2000. – 50 с.

9. Ковалев А.В. Антитеррористическая диагностика.— Контроль. Диагностика, 2014, № 3, с. 89–92.

10. Macdonald Richard D.R. Design and implementation of a dual-energy X-ray imaging system for organic material detection in an airport security application.— Proc. SPIE, 2001, v. 4301, p. 31–41.

11. 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.

12. Клименов В.А., Осипов С.П., Темник А.К. Идентификация вещества объекта контроля методом дуальных энергий.— Дефектоскопия, 2013, № 11, с. 40–50.

13. Заявка 2458408 Европейское патентное ведомство, МПК G01V 5/00. Dual-energy X-ray body scanning device and image processing method / Chen Xue Liang, Chen Li, Huo Mei Chun, Yang Li Rui, Dong Ming Wen, Kong Wei Wu, Yang XiaoYue, Xue Kai, Li Yong Qing, Li Guang Qing, Zhao Lei; BEIJING ZHONGDUN ANMIN ANALYSIS TECHNOLOGY CO LTD, FIRST RES INST OF MINISTRY OF PUBLIC SECURITY OF P R C.— № 11167491; заявл. 25.05.2011; опубл. 30.05.2012.

14. Gil Y., Oh Y., Cho M., Namkung W. Radiography simulation on single-shot dual-spectrum X-ray for cargo inspection system.— Applied Radiation and Isotopes 2011, v. 69, No. 2, p. 389–393.

15. 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.

16. Щетинкин С.А., Чахлов С.В., Усачев Е.Ю. Использование метода двуэнергетической цифровой радиографии для портативных рентгенотелевизионных систем.— *Контроль. Диагностика*, 2006, № 2, с. 49–52.

17. Malyshev V.P., Sidorov A.V., Klinovskiy P.O., Smekalkin V.S., Efremov D.V. The IDK-6/9MeV linear electron accelerator and its application in the customs inspection system.— *RuPAC 2012 Contributions to the Proceedings - 23rd Russian Particle Accelerator Conference*, p. 549-550.

18. Yaffe M.J., Rowlands J.A. X-ray detectors for digital radiography.— *Phys. Med. and Biol.*, 1997, v. 42, No. 1, p. 1–39.

19. Harrison R.M. Digital radiography – a review detector design.— *Nucl. Instrum. and Meth.*, 1991, v. A310, p. 24–31.

20. Алхимов Ю.В., Гньюсов С.Ф., Капранов Б.И., Клименов В.А., Оришич А.М. Исследование образцов лазерной сварки титана и нержавеющей стали методами цифровой рентгенографии.— *Дефектоскопия*, 2012, № 4, с. 56–63.

21. 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.

22. Харара В. Цифровая радиографическая система низкой стоимости испытания сварных соединений.— *Дефектоскопия*, 2010, № 8, с. 90–97.

23. Харара В. Флюороскопическая цифровая радиография алюминиевого литья.— *Дефектоскопия*, 2012, № 6, с. 77–85.

24. Yueping Han, Yan Han, Ruihong Li, Liming Wang. Application of X-ray digital radiography to online automated inspection of interior assembly structures of complex products.— *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, v. 604, p. 760–764.

25. Min Yang, Qi Liu, Hongsheng Zhao, Ziqiang Li, Bing Liu, Xingdong Li, Fanyong Meng. Automatic X-ray inspection for escaped coated particles in spherical fuel elements of high temperature gas-cooled reactor.— *Energy*, 2014, v. 68, p. 385–398.

26. Marko Rakvin, Damir Markučič, Boris Hižman. Evaluation of Pipe Wall Thickness Based on Contrast Measurement using Computed Radiography (CR).— *Procedia Engineering*, 2014, v. 69, p. 1216–1224.

27. Yu Wang, Mingquan Wang, Zhijie Zhang. Microfocus X-ray printed circuit board inspection system.— *Optik*, 2014, v. 125, p. 4929–4931.

28. Усачев Е.Ю., Усачев В.Е., Гнедин М.М., Валиков В.В., Точинский Е.Г., Чахлов С.В., Громов А.Ф. Комплекс цифровой радиографии для ревизии сварных соединений действующих трубопроводов.— *Контроль. Диагностика*, 2014, № 6, с. 60–64.

29. Стучебров С. Г., Вагнер А. Р., Дусаев Р. Р. Сравнение параметров цифровых систем рентгенографической диагностики.— *Известия вузов. Физика*, 2011, т. 54, № 11/ 2, с. 300–305.

30. Pincu R., Pick L., Kleinberger O. Digital radiography for high energy NDT applications.— *Non-Destructive Testing Conference 2010, NDT 2010*, p. 329–336.

31. Lu Y., Wang J., Li W., Yang G. Development and application of digital radiography NDT system with high energy X-ray for steel castings on railway freight car.— *Zhongguo Tiedao Kexue/China Railway Science*, 2009, v. 30, No. 1, p. 139–143.

32. Москалев Ю.А., Буллер А.И., Бабиков С.А. Люминесцентные преобразователи рентгеновского излучения для медицинской и технической диагностики и систем неразрушающего контроля.— *Дефектоскопия*, 2011, № 11, с.18–23.

33. Капустин В.И., Недавний О.И., Осипов С.П. Обобщенная математическая модель формирования и оцифровки радиографических изображений.— *Дефектоскопия*, 2013, № 5, с. 28–38.

34. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Оптимальный выбор параметров многоканальных непрерывно-сканирующих систем цифровой рентгенографии.— Дефектоскопия, 2009, № 10, с. 58–77.

35. Удод В.А., Лебедев М.Б., Клименов В.А., Солодушкин В.И., Темник А.К. Оптимизация параметров многоканальных непрерывно сканирующих систем цифровой рентгенографии.— Дефектоскопия, 2011, № 2, с. 55–62.

36. Udod V., Shteyn A., Shteyn M., Chakhlov S., Temnik A., Klimenov V. Energy spectrum modification of bremsstrahlung X-ray intensity.— Proceedings of the 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), October 6–10, 2014, Prague, Czech Republic, p. 211.

37. Ванг Кангйи, Ченг Яою. Разработка рентгеновской цифровой системы визуализации и сбора данных.— Дефектоскопия, 2009, № 5, с. 90–95.

38. Thomas Kersting, Norbert Schonartz, Ludwig Oesterlein, Andreas Liessem. High end inspection by filmless radiography on LSAW large diameter pipes.— NDT&E International, 2010, v. 43, p. 206–209.

39. Ryzhikov V.D., Opolonin O.D., Galkin S.M., Voronkin Y.F., Lysetska O.K., Kostioukevitch S.A. Development of Receiving-Detecting Circuit for Digital Radiographic Systems with Improved Spatial Resolution.— Proc. SPIE, 2009, v. 7450, p. 74500J/1–74500J/6.

40. Ryzhikov V.D., Opolonin O.D., Galkin S.M., Voronkin Y.F., Lysetska O.K., Kostioukevitch S.A. A multi-energy method of non-destructive testing by determination of the effective atomic number of different materials.— Proc. SPIE, 2010, v. 7805, p. 78051P/1–78051P/9.

41. Opolonin O.D., Ryzhikov V.D. Increasing informativity of digital radiographic systems.— Functional Materials, 2013, v. 20, No. 4, p. 528–533.

42. Волков В.Г., Рыжиков В.Д., Ополонин А.Д., Лисецкая Е.К. Методы обработки сигналов мультidetекторных систем цифровой радиографии.— Вісник НТУ «ХПІ», 2013, № 34, с. 123–130.

43. Yun Seung Man, Lim Chang Hwuy, Kim Tae Woo, Kim Ho Kyung. Pixel-structured scintillators for digital x-ray imaging.— Proc. SPIE, 2009, v. 7258; p. 1, p. 72583N/1–72583N/9.

44. Park Jong-Hwan, Kang Won-Suk, Shin Byung-Su, Kang Hyun-Seung. Digital radiography system using a new direct-detection flat panel detector and its system performance.— Proc. SPIE, 2009, v. 7258; p. 1, p. 72585P/1–72585P/7.

45. Roessl E., Herrmann C. Cramér-Rao lower bound of basis image noise in multiple-energy X-ray.— Phys. Med. and Biol, 2009, v. 54, No. 5, p. 1307–1318.

46. Vedantham Srinivasan, Karellas Andrew. Modeling the performance characteristics of computed radiography (CR) systems.— IEEE Trans. Med. Imag, 2010, v. 29, No. 3, p. 790–806.

47. Watanabe Haruyuki, Tsai Du-Yih, Lee Yongbum, Matsuyama Eri, Kojima Katsuyuki. Radiation dose reduction in digital radiography using wavelet-based image processing methods.— Proc. SPIE, 2011, v. 7966, p. 79661T/1–79661T/10.

48. Alseleem H., Davidson R. Quality parameters and assessment methods of digital radiography images.— Radiographer, 2012, v. 59, No. 2, p. 46–55.

49. Заявка 1020140090831 Республика Корея, МПК А61В 6/08, А61В 6/10. Method of removing scattered rays and digital radiography system using same / KANG, WON SUK; JW MEDICAL CORPORATION.— № 1020130002931; Заявл. 10.01.2013; Оpubл. 18.07.2014.

50. Заявка 20150078519 США, МПК G01V 5/00, G01N 23/20. High Energy X-Ray Inspection System Using a Fan-Shaped Beam and Collimated Backscatter Detectors / Edward James Morton; Rapiscan Systems, Inc.— № 14454295; Заявл. 07.08.2014; Оpubл. 19.03.2015.

51. Xiao Y., Chen Z., Zhang L. System design and experimental research on tip clearance measurement of aero-engines by digital radiography.— ICEMI 2009 – Proceedings of 9th International Conference on Electronic Measurement and Instruments – 5274584, p. 2271–2274.

52. Буклей А.А. Исследования и создание портативной досмотровой рентгеновской техники и оборудования НК. Разработка технологии их применения.— *Контроль. Диагностика*, 2009, №4, с. 76–80.

53. John Stevenson, Tsahi Gozani, Mashal Elsalim, Cathie Condron, Craig Brown. 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, p. 124–128.

54. Волков В.Г., Штейн М.М. Мониторы тормозного излучения бетатронов для контроля крупногабаритных изделий и транспортных средств.— *Контроль. Диагностика*, 2013, № 9, с. 78–80.

55. 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, p. 439–444.

56. Han Y.-P., Han Y., Wang L.-M., Pan J.-X. Development of X-ray digital radiography automatic inspection system for testing the interior structure of complex product.— *Binggong Xuebao/Acta Armamentarii*, 2012, v. 33, No 7, p. 881–885.

57. 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, p. 594–603.

58. 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.

59. Franzel T., Schmidt U., Roth S. Object detection in multi-view X-ray images.— *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes*

in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2012, v. 7476 LNCS, p. 144–154.

60. 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.

61. Ryzhikov V.D., Opolonin O.D., Galkin S.M., Volkov V.G., Lysetska O.K., Kostioukevitch S.A. Detector array with improved spatial resolution for digital radiographic system.— Proc. SPIE, 2011, v. 8142, p. 81421C/1–81421C/8.

62. Ryzhikov V.D., Opolonin O.D., Lysetska O.K., Galkin S.M., Voronkin Y.F. and Perevertaylo V.L. Research on Improvement of Receiving-Detecting Circuit for Digital Radiographic Systems with Advanced Spatial Resolution.— O. Büyüköztürk et al. (eds.), Nondestructive Testing of Materials and Structures, RILEM Bookseries, 2013, No 6, p. 105–109.

63. 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 «ХП», 2013, № 34, с. 43–51.

64. 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.— Контроль. Диагностика, 2011, Специальный выпуск, с. 25–29.

65. 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.

66. Заявка 20150034823 США, МПК H05H 9/00, G01V 5/00, G01T 1/24. Cargo Inspection System / Akery Alan; Rapiscan Systems, Inc.— № 14460112; Заявл. 14.08.2014; Опубл. 05.02.2015.

67. Пат. 20140098937 США, МПК G01B 15/04, G01N 23/203. Mobile aircraft inspection system / Bendahan Joseph; Rapiscan Systems, Inc.— № 13934033; Заявл. 02.07.2013; Оpubл. 10.04.2014.

68. Заявка 102884422 Китай, МПК G01N 23/10. A high-energy X-ray spectroscopy-based inspection system and methods to determine the atomic number of materials / Bendahan Joseph, Brown Craig Mathew, Gozani Tsahi, Langeveld Willem Gerhardus Johannes, Stevenson John David; Rapiscan Systems Inc.— № 201180020812.7; Заявл. 23.02.2011; Оpubл. 16.01.2013.

69. Заявка 2352014 Европейское патентное ведомство, МПК G01N 23/04, G01N 23/087. Radiation detection device, radiation image acquisition system, radiation inspection system, and radiation detection method / SUYAMA TOSHIYASU, MARUNO TADASHI, SASAKI TOSHIHIDE, SONODA JUNICHI, TAKIHI SHINJI; HAMAMATSU PHOTONICS KK.— № 09825980; Заявл. 09.09.2009; Оpubл. 03.08.2011.

70. Пат. 07957505 США, МПК G21K 1/02, G01B 15/02, G21K 1/00. X-ray radiography for container inspection / Katz Jonathan I., Morris Christopher L.; The United States of America as represented by the United States Department of Energy.— № 11684667; Заявл. 12.03.2007; Оpubл. 07.06.2011.

71. Заявка 20110096903 США, МПК H05G 1/08, G01T 1/00, G01N 23/04. Multiview x-ray inspection system / Singh Satpal; Singh Satpal.— № 12588705; Заявл. 26.10.2009; Оpubл. 28.04.2011.

72. Пат. 20100158384 США, МПК G06K 9/00. Method for improving the ability to recognize materials in an X-ray inspection system, and X-ray inspection system / Siedenburg Uwe; Smiths Heimann GmbH.— № 12716848; Заявл. 03.03.2010; Оpubл. 24.06.2010.

73. Пат. 02309459 Российская Федерация, МПК G08B 13/181. Method for inspecting individuals with baggage and device for inspecting individuals with baggage / Качалов Николай Андреевич, Диканев Алексей Геннадьевич.— № 2005136692/09; Заявл. 28.11.2005; Оpubл. 27.10.2007.

74. Заявка 1020120026908 Республика Корея, МПК G01N 23/04. Foreign material inspection system with multi energies using x-rays having different directions / KIM, TAE WOO; VATECH EWOO HOLDINGS CO., LTD.— № 1020100089103; Заявл. 10.09.2010; Оpubл. 20.03.2012.

75. Удод В.А., Ван Я., Осипов С.П., Чахлов С.В., Усачев Е. Ю., Лебедев М.Б., Темник А.К. Современное состояние и перспективы развития систем цифровой рентгенографии для дефектоскопии, диагностики и досмотрового контроля объектов (обзор). — Дефектоскопия, 2016, № 9, с. 11—28.

76. Alvarez R.E, Macovski A. Energy-selective reconstructions in X-ray computerized tomography. — Phys. Med. Biol., 1976, v. 21, p. 733—744.

77. Brooks R.A. A quantitative theory of the Hounsfield unit and its application to dual energy scanning. — J. Comput. Assist. Tomog., 1977, v. 1, p. 487—493.

78. Lehman L.A., Alvarez R.E., Macovski A., Brody W.R., Pelc N.J., Riederer S.J. and Hall A.L. Generalized image combinations in dual KVP digital radiography. — Med. Phys., 1981, v. 8, p. 659 — 667.

79. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: — Энергоатомиздат, 1982, 296 с.

80. GAMMA DATA FOR ELEMENTS:
<http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/gdfe.php>.

81. Alvarez R., Macovski A. Noise and dose in energy dependence computerized tomography. — Proc. SPIE, 1976, v. 96, p. 131—137.

82. Zhengrong Ying, Ram Naidu and Carl R. Crawford. Dual energy computed tomography for explosive detection. — Journal of X-Ray Science and Technology, 2006, v. 14, p. 235—256.

83. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. — Киев: Наукова думка, 1975. — 416 с.

84. Руководство по радиационной защите для инженеров. Т.1. Пер. с англ. под ред. Д.Л. Бродера и др.— М: Атомиздат, 1973.— 426 с.

85. Рентгенотехника: Справочник. В 2 — х кн. Кн. 1. / В.В. Ключев. Ф.Р. Соснин, В. Аертс и др.; Под общ. ред. В.В. Ключева. — 2 — е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992. — 480 с.

86. E S M Ali, D WO Rogers. Functional forms for photon spectra of clinical linacs. — *Phys. Med. Biol.* 57 (2012) 31—50.

87. Гавриш Ю.Н., Бердников Я.А., Спиринов Д.О., Передерий А.Н., Сафонов М.В., И.В. Романов И.В. Программный комплекс для восстановления интроскопических изображений с использованием метода дуальной энергии. — *Problems of atomic science and technology*, 2010, № 3. Series: Nuclear Physics Investigations (54), p.123—125.

88. Спиринов Д.О., Бердников Я.А., Гавриш Ю.Н. Принципы интроскопии крупногабаритных грузов. — *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, 2010, № 2 (98), с. 120—127.

89. Лазурик В. Т., Рудычев В. Г., Рудычев Д. В. Компьютерное моделирование процесса инспекции больших объектов методом дуальных энергий. — *Вісник Харківського національного університету*, 2009, № 863, с. 144—157.

90. Спиринов Д.О., Бердников А.Я., Сафонов А.С. Оптимизация параметра дискриминации в методе дуальных энергий. — *Материалы XV Всероссийской конференции «Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах»*, Том 1. Санкт-Петербург, Издательство Политехнического университета, 2011, с. 44 — 45.

91. Спиринов Д.О., Бердников А.Я., Марков С.И., Сафонов А.С. Оптимизация параметра дискриминации в методе дуальных энергий. — *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, 2011. № 4(134), с. 171—176.

92. Афанасьев В.Д., Письменецкий С.А., Рудычев В.Г., Рудычев Д.В. Применение метода дуальных энергий для дискриминации тяжелых элементов. — *Вестник Харьковского университета*, 2005, № 664, с. 56 — 60.

93. Свистунов Ю.А., Ворогушин М.Ф., Петрунин В.И., Сидоров А.В., Гавриш Ю.Н., Фиалковский А.М. Развитие работ по созданию рентгеновских и ядерно-физических инспекционных комплексов в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова. — *Problems of atomic science and technology*, 2006, № 3. Series: *Nuclear Physics Investigations* (49), p. 171—173.

94. Огородников С.А. Распознавание материалов при радиационном таможенном контроле на базе линейного ускорителя электронов. Дис.. канд. техн. наук. — Санкт-Петербург, 2002. — 121 с.

95. Петрунин В.И. Разработка систем таможенного и промышленного радиационного цифрового контроля крупногабаритных объектов на базе линейных электронных ускорителей. Дис.. доктора техн. наук. — Санкт-Петербург, 2002. — 154 с.

96. Ишханов Б.С., Курилик А.С., Руденко Д.С., Стопани К.А., Шведун В.И. Многопучковый метод определения атомного номера. — Сборник трудов VIII межвузовской школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», 19—20 ноября 2007 г. Издательство МГУ Москва, с. 160—164.

97. Горшков В.А. Массовый коэффициент поглощения и эффективный атомный номер многокомпонентного объекта для непрерывного спектра излучения. — *Контроль. Диагностика*, 2015, № 6, с. 34—44.

98. Горшков В.А. Оценка плотности многокомпонентных объектов при использовании источников с непрерывным спектром. — *Контроль. Диагностика*, 2015, № 7, с. 16—20.

99. Чахлов С.В., Осипов С.П. Высокоэнергетический метод дуальных энергий для идентификации веществ объектов контроля. — *Контроль. Диагностика*, 2013, № 9, с. 9—17.

100. Osipov S.P., Libin E.E., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Shtein A.M. Parameter identification method for dual-energy X-ray imaging. — *NDT & E International*, 2015, vol. 76, p. 38—42.

101. Найденов С. В., Рыжиков В. Д. Об определении химического состава методом мультэнергетической радиографии. — Письма в ЖТФ, 2002, т. 28, № 9, с. 6—13.

102. Sanjeevareddy Kolkoori, Norma Wrobel, Andreas Deresch, Bernhard Redmer, Uwe Ewert. Dual High-Energy X-ray Digital Radiography for Material Discrimination in Cargo Containers. — 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague, Czech Republic, October 6—10, 2014.

103. Markus Firsching , Frank Nachtrab , Jörg Mühlbauer , Norman Uhlmann. Detection of Enclosed Diamonds using Dual Energy X-ray imaging. — 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, April 16—20, 2012.

104. Alireza Mazoochi, Faezeh Rahmani, Freydoun Abbasi Davani, Ruhollah Ghaderi. A novel numerical method to eliminate thickness effect in dual energy X-ray imaging used in baggage inspection. — Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, v. 763, p. 538—542.

105. V Rebuffel, J-M Dinten. Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits. — Insight 2007, v. 49 No. 10, p. 589—594.

106. S. Chang, H. K. Lee, G. Cho. Application of a dual-energy monochromatic x-ray CT algorithm to polychromatic x-ray CT: a feasibility study. — Nuclear Engineering and Technology, 2012, v.44, No.1, p. 61—70.

107. Robert E. Alvarez. Topics in Energy-selective X-ray imaging. — Book January 2017

108. Mihai Iovea, Marian Neagu, Octavian G. Dului, Gheorghe Oaie, Stefan Szobotka, Gabriela Mateiasi. A Dedicated On-Board Dual-Energy Computer Tomograph. — J Nondestruct Eval, 2011, v.30. c. 164—171.

109. A. du Plessis M. Meincken T. Seifert. Quantitative Determination of Density and Mass of Polymeric Materials Using Microfocus Computed Tomography. — J Nondestruct Eval, 2013. v. 32, p. 413—417.

110. Liang Li, Ruizhe Li, Siyuan Zhang, Tiao Zhao, Zhiqiang Chen. A dynamic material discrimination algorithm for dual MV energy X-ray digital radiography. — *Applied Radiation and Isotopes*, 2016, v. 114, p. 188—195.

111. H. Alves, I. Lima, R.T. Lopes. Methodology for attainment of density and effective atomic number through dual energy technique using microtomographic images. — *Applied Radiation and Isotopes*, 2014, v. 89, p. 6—12.

112. В.Г. Рудычев, И.А. Гирка, Д.В. Рудычев, Е.В. Рудычев. Формирование тормозного излучения в методе дуальных энергий для радиографии несанкционированных вложений. — *East Eur. J. Phys*, 2016, v. 3, No. 2, p. 32—40.

113. Rusca, S. 2012 Digital radiography: Characterizing the CR systems for industrial applications *Rivista Italiana della Saldatura* **64** 641–9

114. Harara, W. 2010 Low cost digital radiography system for weld joints and castings testing *Russian Journal of Nondestructive Testing* **46** 618–25

115. Kalivas, N., Costaridou, L., Kandarakis, I., Cavouras, D., Nomicos, C. D., Panayiotakis, G. Effect of intrinsic-gain fluctuations on quantum noise of phosphor materials used in medical X-ray imaging *Applied Physics A* **69** 1999 337–41

116. Wang, Q., Zhu, Y. and Li, H. 2015 Imaging model for the scintillator and its application to digital radiography image enhancement *Optics Express* **23** 33753–76

117. Lebedev, M.B., Sidulenko, O. A. and Udod, V.A. A mathematical model of multichannel continuously scanning systems for digital X-ray analysis *Russian Journal of Nondestructive Testing* 2007, v. **43**, p.401–6

118. Lindgren, E. and Wirdelius, H. 2012 X-ray modeling of realistic synthetic radiographs of thin titanium welds *NDT & E International* **51** 111–9

119. Zav'yalkin, F.M. and Osipov, S.P. 1985 Dependence of the mean value and fluctuations of the absorbed energy on the scintillator dimensions *At Energ.* **59** 281–3

120. Anne Bonnin, Philippe Duvauchelle, Valérie Kaftandjian, Pascal Ponard. Concept of effective atomic number and effective mass density in dual-energy X-ray computed tomography // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2014. V. B318. - P. 223-231.

121. Spiers F. Effective atomic number and energy absorption in tissues // Br. J. Radiol. -1946. - No 19. - P. 52-63.

122. Heismann B.J., Leppert J., Stierstorfer K. Density and atomic number measurements with spectral X-ray attenuation method // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. - P. 2073-2079.

123. Hine G.J. Secondary electron emission and effective atomic numbers // Nucleonics. 1952. - No 1. - P. 9-15.

124. Manninen S., Koikkalainen S. Determination of the effective atomic number using elastic and inelastic scattering of gamma-rays // Int. J. Appl. Radiat. Isot. 1984. V. 10. - No. 35. - P. 965–968.

125. Puumalainen P., Olkkonen H., Sikanen P. Assessment of fat content of liver by photon scattering technique // Int. J. Radiat. Appl. Instrum. 1977. V. 28. - P. 785–787.

126. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений // Справочник. М., Энергоатомиздат. 1995. 496 с.

127. В.А. Горшков. Особенности двухэнергетической рентгеновской плотнометрии многокомпонентных объектов// Контроль. Диагностика. 2014, № 10, с. 25-30.

128. Осипов С.П., Удод В.А., Ван Я. Распознавание материалов методом дуальных энергий при радиационном контроле объектов // Дефектоскопия.– 2017.–№ 8.– С. 35 – 56.

129. Евстропьев К.С. Химия кремния и физическая химия силикатов. — М.: Промстройиздат, 1956, 124 с.

130. Jerel A. Smith, Jeffrey S. Kallman, Harry E. Martz Jr. Case for an Improved Effective-Atomic-Number for the Electronic Baggage Scanning Program

// Lawrence Livermore National Laboratory Livermore, CA 94551, November 21, 2011, LLNL-TR-XXXXX-DRAFT, 20 p.

131. Kiran K U, Ravindraswami K, Eshwarappa K M, Somashekarappa H M. Effective atomic number of granite by gamma backscattering method // Proceedings of the DAE Symp. on Nucl. Phys. 2014. V.59. P. 412 — 413.

132. Rogers T.W., Jaccard N., Griffin L.D. A deep learning framework for the automated inspection of complex dual-energy x-ray cargo imagery. — Anomaly Detection and Imaging with X-Rays (ADIX) II. – International Society for Optics and Photonics, 2017, v. 10187, no. article 101870L.

133. 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. article 012042.

134. Junior T.A.A., Nogueira M.S., Vivolo V., Potiens M.P.A., Campos L.L. Mass attenuation coefficients of X-rays in different barite concrete used in radiation protection as shielding against ionizing radiation. — Radiation Physics and Chemistry, 2017, v. 340, p. 349—354.

135. Ogorodnikov S., Petrunin V. Processing of interlaced images in 4–10 MeV dual energy customs system for material recognition. — Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2002, v. 5, no. 10, no. article 104701.

136. Lanier R.G. Recent developments in X-ray imaging technology. — Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA, 2012, no. LLNL-TR-587512.

137. Wang X. Enhanced colour encoding of materials discrimination information for multiple view dual-energy x-ray imaging : Diss. – Nottingham Trent University, 2009.

138. Evans J.P.O. Stereoscopic imaging using folded linear dual-energy X-ray detectors. — Measurement Science and Technology, 2002, v. 13, no. 9, no. article 1388.

139. O'Hare N. A study of the imaging of contrast agents for use in computerised tomography : Diss. – Dublin City University, 1991, 305 p.

140. Paziresh M., Kingston A.M., Latham S.J., Fullagar W.K., Myers G.M. Tomography of atomic number and density of materials using dual-energy imaging and the Alvarez and Macovski attenuation model. — Journal of Applied Physics, 2016, v. 119, no. 21, no. article 214901.

141. Kramers H.A. XCIII. On the theory of X-ray absorption and of the continuous X-ray spectrum. — The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1923, v. 46, no. 275, p. 836—871.

142. Heo S.H., Ihsan A., Cho S.O. Transmission-type microfocuss x-ray tube using carbon nanotube field emitters. — Applied physics letters, 2007, v. 90, no. 18, no. article 183109.

143. Sekimoto M., Katoh Y. Derivation of total filtration thickness for diagnostic x-ray source assembly. — Physics in medicine and biology, 2016, v. 61, no. 16, no. article 6011.

144. Tucker D.M., Barnes G.T., Chakraborty D.P. Semiempirical model for generating tungsten target x - ray spectra. — Medical physics, 1991, v. 18, no. 2, p. 211—218.

145. Установка TC-СКАН 6040. <http://tsnk.ru/equip/equip/introskopy/ts-scan6040/>

146. X-ray mass attenuation coefficients. <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>