

20. Kulakov A. S. Simulation of interactions of electrons and positrons with matter in MCU-PD code // *Physics of Atomic Nuclei* – 2011 – Vol. 74 – No. 13 – PP. 1819–1830.
doi: 10.1134/S1063778811130072
21. Zav'yalkin, F.M., Osipov, S.P. Dependence of the mean value and fluctuations of the absorbed energy on the scintillator dimensions // *Soviet Atomic Energy* – 1985 – Vol. 59 – No. 4 – PP. 842–846 doi: 10.1007/BF01123317
22. Zav'yalkin, F.M., Osipov, S.P. Calculation of the scattering function of a multichannel scintillation detector used to record high-energy photon radiation // *Soviet Atomic Energy* – 1986 – Vol. 60 – No. 2 – PP. 186–188 doi: 10.1007/BF01371189
23. Schiff, L.I. Energy-angle distribution of thin target bremsstrahlung // *Physical review* – 1951 – Vol. 83 – No 2 – PP. 252–253 doi: 10.1103/PhysRev.83.252

РАДИОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦИФРОВЫХ МАТРИЧНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Семенов Ю.В., Точинский Е.Г., Усачев Е.Ю., Чахлов С.В.¹

Московский государственный университет Информационных технологий, радиотехники и
электроники

¹Томский политехнический университет

При контроле стыковых сварных соединений стальных трубопроводов используется радиографический метод радиационного неразрушающего контроля. Однако процесс радиографического контроля является достаточно трудоемким и дорогостоящим. Поэтому систематически осуществляются попытки заменить рентгеновскую пленку в отдельных технологических процессах на преобразователи других типов.

По мнению некоторых авторов, большие потенциальные возможности имеются у цифровых матричных детекторов (digital detector array system, DDA system) [1]. Под цифровым матричным детектором здесь понимается электронное устройство, преобразующее ионизирующее излучение в дискретную матрицу аналоговых сигналов, которые затем оцифровываются и передаются в компьютер для отображения в виде цифрового изображения, соответствующего распределению энергии потока излучения, прошедшего через рабочее поле устройства [2].

Имеются сообщения о том, что в определенных условиях качество изображения, полученное с использованием цифровых детекторов, достигает качества, характерного для мелкозернистой радиографической пленки [3]. В ряде работ показана возможность использования цифровых панелей совместно с высокоточными стационарными рентгеновскими аппаратами для целей контроля стыковых сварных соединений [4]. Однако часто в цехах при ограниченности свободного пространства, а также в полевых условиях, возникает необходимость осуществить радиографический контроль стыковых соединений стальных трубопроводов с достаточно высокой производительностью в соответствии с третьим классом чувствительности (ГОСТ 7512-82), но с использованием малогабаритной аппаратуры.

Целью настоящей работы является исследование возможности контроля стыковых сварных соединений при использовании матричных детекторов совместно с малогабаритной слаботочной рентгеновской аппаратурой.

Различают два типа DDA детекторов: цифровые детекторы непрямого преобразования рентгеновского излучения и цифровые детекторы прямого преобразования рентгеновского излучения [1]. Детекторы непрямого преобразования отличаются тем, что рентгеновские кванты сначала взаимодействуют со сцинтиллятором с образованием фотонов света. В качестве сцинтиллятора, как правило, используют цезий-

йод активированный таллием ($CsI:Tl$) или оксисульфид гадолиния активированный тербием ($Gd_2O_2S:Tb$).

Матрица малошумящих фотодиодов, которые изготавливают, как правило, на основе аморфного кремния, aSi , поглощает фотоны света и превращает их в электрический заряд. Величина заряда пропорциональна количеству фотонов света, которые получил фотодиод. Каждый фотодиод участвует в формировании элемента изображения (пикселя). Заряд каждого пикселя считывается мало шумящей электроникой и превращается в цифровые данные, которые передаются в видео процессор.

В детекторах прямого преобразования, при воздействии рентгеновского кванта в толще полупроводника сразу генерируются электронно-дырочные пары. Под действием приложенного напряжения возникает электронный ток. Накопительные конденсаторы каждого элемента матрицы приобретают заряд, величина которого пропорциональна количеству энергии ионизирующего излучения, поглощенного внутри полупроводникового слоя. Затем заряд каждого пикселя считывается мало шумящей электроникой и превращается в цифровые данные, которые передаются в видео процессор.

Радиографический контроль сварных соединений с использованием цифровых детекторов регламентирует международный стандарт [2]. Стандарт определяет три параметра, которые необходимо учитывать при проведении контроля сварных соединений.

Во-первых, это нормализованное отношение сигнал/шум, SNR_N . Величина этого отношения характеризует экспозицию при проведении контроля. Является аналогом оптической плотности для случая использования рентгеновской пленки.

Во-вторых, чувствительность контроля, которая может оцениваться по проволочному или по ступенчатому с отверстиями эталонам.

В третьих, базовое пространственное разрешение цифрового изображения, SR_b , с помощью которого определяется нерезкость полученного в результате контроля изображения.

С учетом этих параметров стандартом установлены два класса радиографического контроля. Класс **A** – основной контроль, и класс **B** – улучшенный контроль. Для каждого из этих классов, в зависимости от толщины контролируемого объекта, поставлены в соответствие максимальные допустимые значения чувствительности контроля и нерезкости изображения. Чувствительность определяют по величине выявляемого элемента эталона чувствительности, в частности, наименьшего диаметра выявляемой на снимке проволоки проволочного эталона. Нерезкость изображения определяется по результатам анализа изображения дуплексного эталона.

В качестве источника рентгеновского излучения был выбран разработанный в МГТУ МИРЭА портативный остро фокусный рентгеновский аппарат РИ-160. Аппарат можно использовать при небольших фокусных расстояниях, что в сочетании с небольшими габаритами и массой делает удобным его применение в условиях ограниченности свободного пространства вокруг стыкового соединения трубопровода. Основные характеристики рентгеновского аппарата приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики рентгеновского аппарата РИ-160

Технические характеристики	Значения
Диапазон регулировки анодного напряжения, кВ	от 50 до 160
Анодный ток фиксированный, мкА	500
Размер фокусного пятна трубки, мм	0,8
Угол раствора рабочего пучка, град.	80
Масса рентгеновского аппарата с аккумулятором, кг	12,5
Габаритные размеры, мм	390×140×340

Чтобы понять особенности использования цифровых панелей прямого и прямого преобразования, было проведено сравнение пространственного разрешения и чувствительности контроля при использовании панелей SDX-4336CP, Samsung Mobile Display Corporation South Korea и FLAATZ-760, DRTECH Corporation South Korea, таблица 2 [5, 6].

Таблица 2. Основные технические характеристики цифровых панелей

Характеристики	SDX-4336CP	FLAATZ-760
Тип детектора	Аморфный кремний, TFT	Аморфный селен, TFT
Сцинтиллятор	Йодистый цезий	нет
Площадь изображения, см	35,6×43	43×43
Глубина оцифровки, бит	14	14
Шаг пиксела, мкм	150×150	168×168
Матрица пикселей, ед	2880×2400	2560×2660
Разрешение, пар лин/мм	3,3	3,0
Габаритные размеры, мм	491×480×15	480×460×15
Масса, кг	3,8	4,6

Сравнение приведенных в таблице данных показывает, что рассматриваемые цифровые панели имеют близкие по величине параметры, влияющие на качество изображения. К таким параметрам относятся глубина оцифровки, шаг пиксела и разрешающая способность. Следует отметить, что панели разработаны для использования в медицине, и поэтому они имеют небольшое время захвата изображения (2 – 3 секунды). С учетом максимальной величины анодного тока, экспозиция не может превышать 0,1 мА мин. Однако созданное в рамках настоящей работы программное обеспечение позволило регулировать время захвата изображения, что существенно расширило возможности цифровых детекторов при проведении радиационного контроля.

В начале исследований был рассмотрен вопрос, каким образом влияет величина времени захвата изображения, устанавливаемая с пульта управления, на результаты контроля? Для ответа на этот вопрос была получена зависимость чувствительности контроля при использовании обеих панелей от времени захвата изображения, анодное напряжение составило $U_a = 160$ кВ. На рис. 1 приведены экспериментальные данные при использовании цифровой панели непрямого преобразования SDX-4336CP.

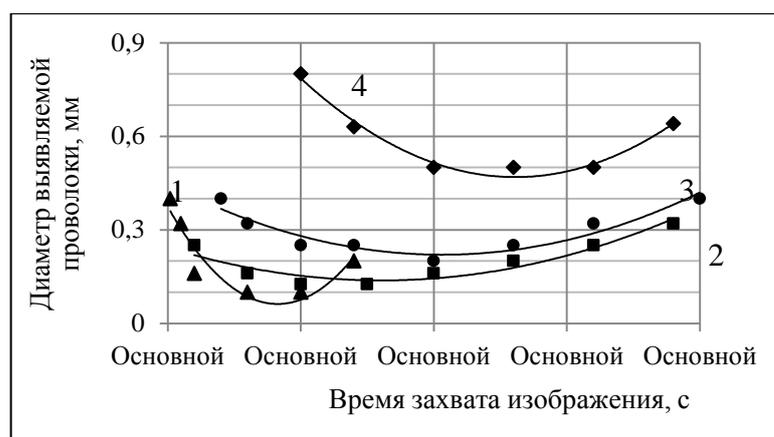


Рис. 1. Зависимость диаметра выявляемой стальной проволоки эталона чувствительности ГОСТ 7512-82 от времени захвата изображения для различных толщин контролируемого стального образца: 1 мм (кривая 1), 5 мм (кривая 2), 10 мм (кривая 3) и 20 мм (кривая 4). Использовался рентгеновский аппарат РИ-160. Анодное напряжение составляло 160 кВ. Фокусное расстояние составляло 750 мм

Из представленных результатов следует, что чувствительность контроля зависит от времени захвата изображения. Причем при увеличении толщины контролируемого объекта для обеспечения лучшей чувствительности время захвата изображения целесообразно увеличивать с 3-5 до 10-15 секунд.

Величина нормализованного отношения сигнал/шум измерялась в соответствии с требованиями [2]. Результаты измерений приведены на рис. 2. Из представленных результатов следует, что при контроле образца толщиной 1 мм удовлетворяются требования классов А и В. При контроле образца толщиной 5 мм удовлетворяются требования класса В. При контроле образцов толщиной 10 мм и 20 мм требования стандарта не выполняются при любом времени захвата изображения. Для обеспечения требуемой для комфортного визуального анализа яркости изображения использовалось программное обеспечение, предназначенное для улучшения качества и обработки цифровых изображений "Диада" [7].

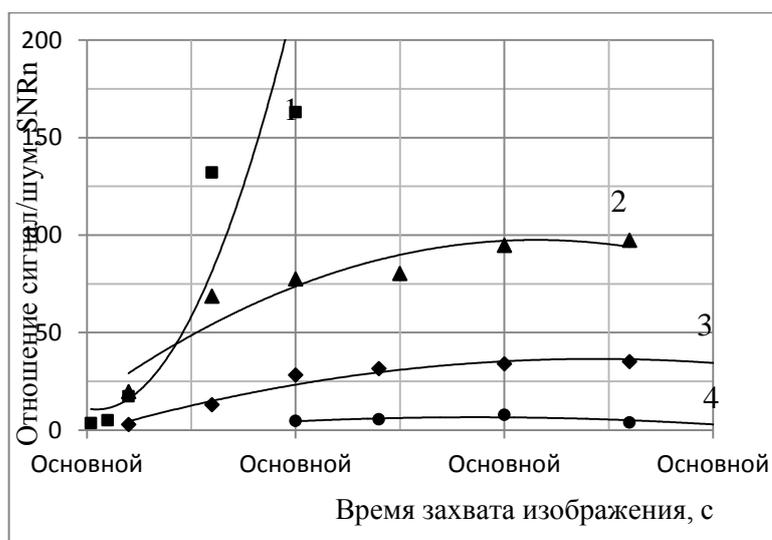


Рис. 2. Зависимость нормализованного отношения сигнал/шум от времени захвата изображения для различных толщин контролируемого стального образца: 1 мм (кривая 1), 5 мм (кривая 2), 10 мм (кривая 3) и 20 мм (кривая 4). Использовался рентгеновский аппарат РИ-160. Анодное напряжение составляло 160 кВ. Фокусное расстояние составляло 750 мм

При $t_{\text{захвата}} > 10$ секунд наблюдается прекращение роста кривых 2, 3 и 4, а затем и уменьшение величины SNR_N , чувствительность при этом (см. рис. 2) ухудшается. Величина $t_{\text{захвата}} = 10$ с является оптимальной при просвечивании образцов толщиной более 5 мм. При просвечивании образца толщиной 1 мм с использованием анодного напряжения 160 кВ оптимальное время захвата изображения ориентировочно составляет 3 секунды. При дальнейшем увеличении времени захвата чувствительности ухудшается вследствие стирания изображения проволочек эталона соседними участками изображения.

При использовании панели FLAATZ-760 оптимальная величина времени захвата в среднем составила 7 секунд.

Для оценки чувствительности контроля проводилось просвечивание стальных пластин размером 400×400 мм, которые складывались в наборы толщиной от 1,0 мм до 35,0 мм. Фокусное расстояние (расстояние от фокусного пятна рентгеновского аппарата до поверхности детектора) составляло 750 мм. На поверхности стальных листов со стороны рентгеновского аппарата размещались проволочные эталоны чувствительности ГОСТ 7512-82 и дуплексный проволочный эталон для измерения общей нерезкости изображения (EN 462-5, A 143).

При просвечивании образца толщиной 1 мм, 3 мм и 5 мм лучшая чувствительность была достигнута при анодном напряжении 80 кВ, 100 кВ и 120 кВ, соответственно. При просвечивании образца толщиной 10 мм и более – 160 кВ. Результаты измерений чувствительности при выбранных анодных напряжениях приведены в таблице 3. В этой же таблице представлены требования по чувствительности радиографического контроля с применением радиографической пленки, установленные российским стандартом ГОСТ 7512-82 и международным стандартом ISO 17636-2:2013.

Таблица 3. Сравнение экспериментальных данных по чувствительности контроля с требованиями стандартов

Радиационная толщина, мм	Flat Panel SDX-433CP, мм	Flat Panel FLAATZ-760, мм	Класс чувствительности по ГОСТ 7512-82			Требования ISO 17636-2:2013(E)	
			1	2	3	Класс А	Класс В
1	0,08	0,05	0,10	0,10	0,20	0,063	0,05
3	0,1	0,08	0,10	0,10	0,20	0,10	0,080
5	0,125	0,125	0,20	0,20	0,32	0,125	0,10
10	0,25	0,20	0,20	0,32	0,40	0,20	0,16
15	0,32	0,32	0,32	0,40	0,50	0,25	0,20
20	0,40	0,40	0,32	0,40	0,50	0,32	0,20
25	0,63	1,0	0,40	0,50	0,63	0,40	0,25
30	0,80	1,6	0,40	0,50	0,63	0,40	0,25
35	1,6	2,0	0,50	0,63	0,75	0,63	0,32

Сравнение данных, приведенных в табл.3, показывает, что при контроле стальных образцов толщиной от 1 до 10 мм лучшая чувствительность обеспечивается при использовании цифровой панели прямого преобразования FLAATZ-760. При контроле образцов толщиной 15-20 мм чувствительность при использовании обеих панелей приблизительно одинакова. Для образцов большей толщины лучшие результаты были получены при использовании цифровой панели непрямого преобразования SDX-433CP. Обусловлено это тем, что цифровая панель непрямого преобразования имеет лучшую эффективность регистрации рентгеновского излучения. Поэтому для контролируемых объектов, имеющих большую радиационную толщину, цифровая панель непрямого преобразования имеет лучшую величину отношения сигнал/шум.

Чувствительность контроля образцов из стали толщиной до 25 мм с использованием цифровой панели SDX-433CP, соответствует третьему классу чувствительности ГОСТ 7512-82 и не соответствует требованиям международного стандарта.

Чувствительность, которая достигается при использовании цифровой панели FLAATZ-760, соответствует требованиям класса А ISO 17636-2:2013(E) и требованиям I класса чувствительности ГОСТ 7512-82 при контроле стального образца толщиной до 10 мм. Для толщин 15 мм и 20 мм чувствительность удовлетворяет требованиям 2 класса чувствительности ГОСТ 7512-82.

Сравнение резкости изображений, полученных в одинаковых условиях, показывает, что панель FLAATZ-760 обеспечивает более резкое изображение. В качестве примера, на рисунке 4 приведены изображения стального образца толщиной 5 мм с расположенным на его поверхности дуплексным эталоном, полученные в одинаковых условиях с использованием цифровой панели FLAATZ-760 (а) и SDX-433CP (б). Численные значения базового пространственного разрешения, SR_b , составляют соответственно 0,12 мм и 0,18 мм.

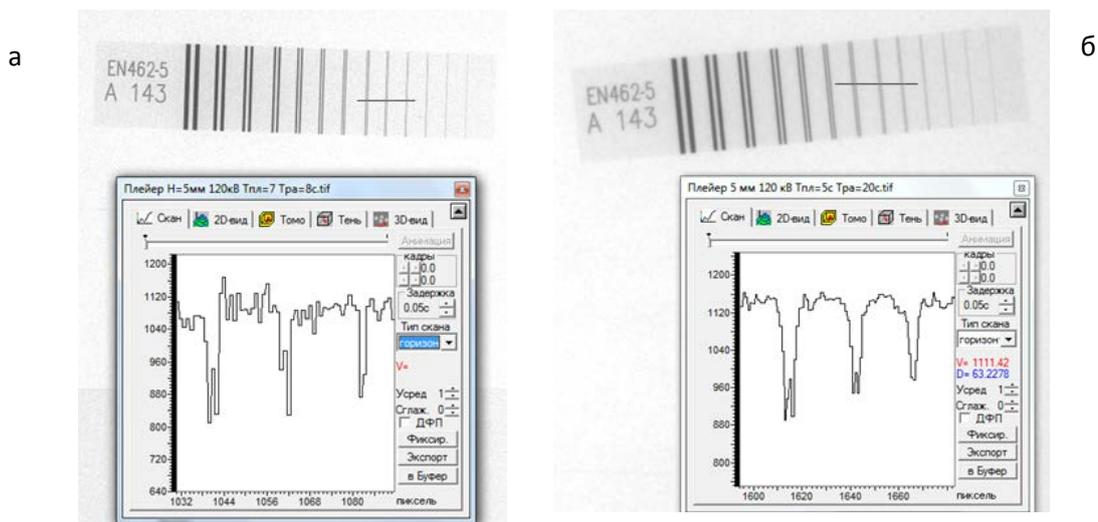


Рис. 4. Изображения стального листа толщиной 5 мм с дуплексным эталоном, при использовании панели FLAATZ-760 (а) и SDX-433CP (б)

Для цифровой панели FLAATZ-760 была определена нерезкость изображения при контроле стальных образцов толщиной до 10 мм. Измерения осуществлялись в соответствии с требованиями стандарта ISO 17636-2:2013(E). Результаты измерений, минимальные значения IQI дуплексного проволочного эталона и максимальные значения нерезкости изображений, для контроля в соответствии с классом А приведены в таблице 4.

Таблица 4. Экспериментальные значения нерезкости изображений и требования стандарта ISO 17636-2:2013(E) для контроля по классу А

Толщина стали, мм	Экспериментальное значение нерезкости, мм	Требования ISO 17636-2:2013(E)	
		Минимальное IQI	Максимальная нерезкость, мм
1	0,20	D13	0,10
3	0,22	D10	0,20
5	0,23	D10	0,20
10	0,28	D9	0,26

Сравнение полученных результатов с требованиями стандарта показывает, что нерезкость изображений не соответствуют требованиям стандарта ISO 17636-2:2013(E).

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что современные цифровые панели как прямого, так и непрямого преобразования обеспечивают совместно с малогабаритной рентгеновской аппаратурой чувствительность, достаточную для контроля сварных соединений 5, 6 и 7 классов (ГОСТ 23055-78), если толщина контролируемой стальной конструкции не превышает 25 мм. Однако, требуемую международным стандартом чувствительность контроля сварных соединений можно обеспечить при использовании цифровой панели прямого преобразования типа FLAATZ-760.

Список использованных источников

1. Rowlands J. Flat panel detectors for medical X-ray: physics and technology. Available at: <http://hepwww.rl.ac.uk/Vertex03/Talks/Row/Rowlands.pdf>. Accessed December 20, 2010.
2. International standard ISO 17636-2:2013 Non-destructive testing of welds – Radiographic testing – Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors.
3. Усачёв Е. Ю., Усачёв 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

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
6. Submission 510(k) – SDX-4336 CP, К 102321, feb. 11 2013. 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.^{1,2}, Ван Я.¹, Осипов С.П.¹, Чахлов С.В.¹, Темник А.К.¹

¹Томский политехнический университет,

²Томский 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);