

Исследование структуры и свойств

Физические методы исследования и контроля

УДК 620.192.63

ИЗМЕРЕНИЕ ФОКУСНОГО ПЯТНА РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ С ПОМОЩЬЮ ПЛОСКОПАНЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА¹

© Е. И. Косарина, А. В. Степанов, А. А. Демидов, О. А. Крупнина²

Статья поступила 15 июля 2015 г.

Размер фокусного пятна источника излучения влияет на качество получаемого при рентгеновском контроле изображения исследуемых деталей. При длительной эксплуатации рентгеновских аппаратов фокусное пятно меняется, поэтому отечественными и зарубежными нормативными документами регламентировано периодическое его измерение. Изображение пятна, получаемое на мелкозернистой радиографической пленке, стандартно измеряют мерной лупой или компаратором. Этот способ неточен, так как требует сканирования изображения с определенным шагом. Показана возможность измерения фокусного пятна источника излучения путем анализа его цифрового рентгенографического изображения на мониторе цифровой рентгенографической установки. Приведены результаты измерения, предложен способ расчета поправочных коэффициентов.

Ключевые слова: источник излучения; фокусное пятно; измерение; плоскопанельный детектор.

Контроль качества материалов и изделий можно осуществить в частности неразрушающими методами, например, рентгеновским [1 – 5]. Для эффективного обнаружения недопустимых дефектов необходимо строгое соответствие технологии и применяемых средств контроля требованиям действующей нормативно-технической документации.

Финальный итог рентгеновского исследования — оптическое изображение проекции объекта контроля (ОК). Одна из характеристик качества изображения — четкость — обусловлена как геометрической, так и внутренней (собственной) нерезкостью детектора. Для повышения четкости используют детекторы с высоким разрешением, например, мелкозернистые контрастные радиографические пленки типа D2, D3, D4 (фирма-производитель Agfa). Геометрическая нерезкость зависит от размера фокусного пятна источника (информация о нем в обязательном порядке содержится в технической документации на источник излучения [6]) и расстояний источник – детектор, источник – ОК, ОК – детектор.

При эксплуатации рентгеновских аппаратов в результате прожога мишени фокусное пятно увеличивается. Периодически его необходимо измерять,

поскольку размер пятна существенно влияет на качество получаемых снимков. В практике рентгеновского неразрушающего контроля измерения фокусного пятна проводят в соответствии с требованиями международных норм [6], российских государственных стандартов [7, 8] и отраслевых нормативных документов (в частности ПИ1.2.226–2008 «Неразрушающий контроль металлических изделий рентгеновскими методами»).

В случае используемых в дефектоскопии рентгеновских аппаратов (размер фокусного пятна 1,2 – 3,5 мм) фокусное пятно измеряют с помощью диафрагмы и мелкозернистой радиографической пленки [9 – 11]. На практике такие измерения сопряжены с рядом сложностей (например, при каких значениях анодного напряжения следует измерять фокусное пятно, каков максимальный размер диафрагмы при измерении фокусного пятна, с каким шагом следует сканировать полученное на радиографической пленке изображение пятна), из-за которых недопустимо возрастает погрешность получаемых результатов.

Цель работы — оценить отмеченные выше трудности и разработать новые методы измерения с использованием последних достижений в области рентгеновского контроля [12 – 17].

Фокусное пятно рентгеновской трубки — площадка, на которую попадает электронный пучок, поэтому

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (грант RFMEFI59514X0002).

² ФГУП «ВИАМ», Москва, Россия; e-mail: admin@viam.ru

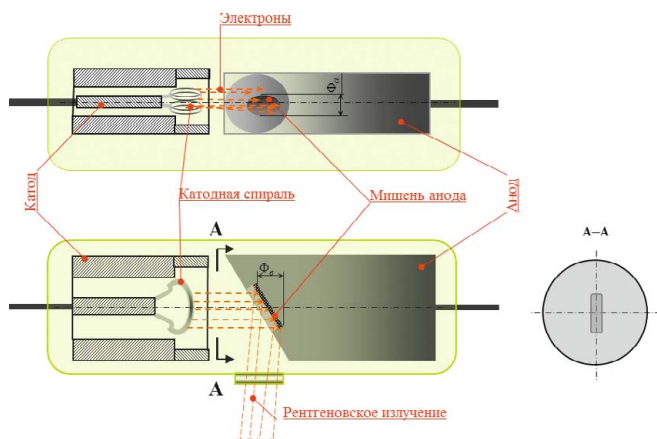


Рис. 1. Схема формирования фокусного пятна

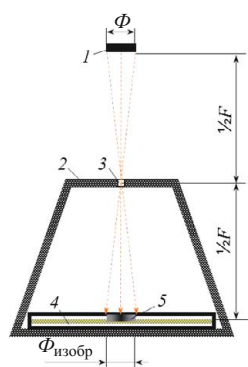


Рис. 2. Схема формирования изображения фокусного пятна рентгеновской трубки: 1, 5 — истинное и скрытое изображения фокусного пятна; 2 — свинцовая камера; 3 — диафрагма; 4 — кассета с радиографической пленкой

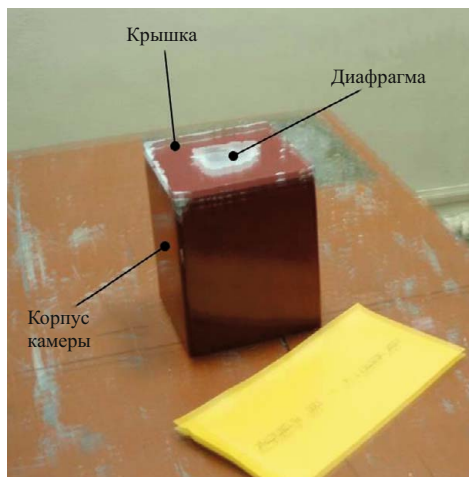


Рис. 3. Камера с диафрагмой

из нее исходят фотоны рентгеновского излучения, возникающие в результате торможения электронов. Конечные размеры пятна (Φ_a , Φ_b) обусловлены рассеянием электронов, формируемых на катоде рентгеновской трубки (рис. 1). На электроны в пучке действуют силы электростатического поля, заставляющие их устремляться к положительно заряженному аноду, и отталкивания, заставляющие отдаляться друг от друга, как одноименно заряженных частиц [16, 17].

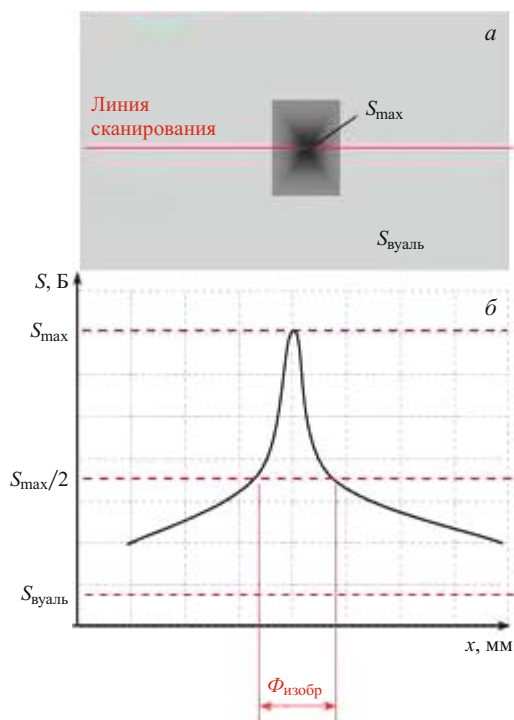


Рис. 4. Схема измерения фокусного пятна по изображению на рентгеновском снимке: а — рентгенограмма; б — распределение оптической плотности вдоль линии сканирования

Таким образом, фокусное пятно тем больше, чем больше анодный ток рентгеновской трубки. Для трубок, работающих в некотором диапазоне анодных напряжений, наибольшие размеры пятна соответствуют малым значениям напряжения. Поэтому резонно измерять фокусное пятно при минимальном из рабочего диапазона рентгеновского аппарата значении анодного напряжения. Схема измерения показана на рис. 2. Пучок излучения, проходя через диафрагму, расположенную на половине фокусного расстояния F , создает истинное изображение фокусного пятна Φ . Чем меньше диафрагма (не более 0,1 мм [11]), тем резче изображение. Чтобы исключить влияние рассеянного излучения, диафрагму размещают в камере из свинца.

Для измерения фокусного пятна рентгеновских аппаратов РАП220-5, РАП150/300, РУП 150/300 с излучателями 8БПК5-220, 1,2-ЗБПМ5-300 и 4БПМ8-250 применяли диафрагму диаметром 0,1 мм. Внешний вид камеры с диафрагмой показан на рис. 3.

Экспонированные радиографические снимки фотообработывали и получали рентгенограммы с изображением фокусного пятна рентгеновских трубок. Изображения представляют собой темные локальные области с неравномерной оптической плотностью S (в центре плотность максимальна S_{\max} , к периферии падает). Неэкспонированные участки имеют начальную оптическую плотность $S_{\text{вуаль}}$ (рис. 4).

Согласно нормативным документам [10, 11] размер фокусного пятна считают равным ширине импульса на уровне либо $0,5(S_{\max} - S_{\text{вуаль}})$, либо

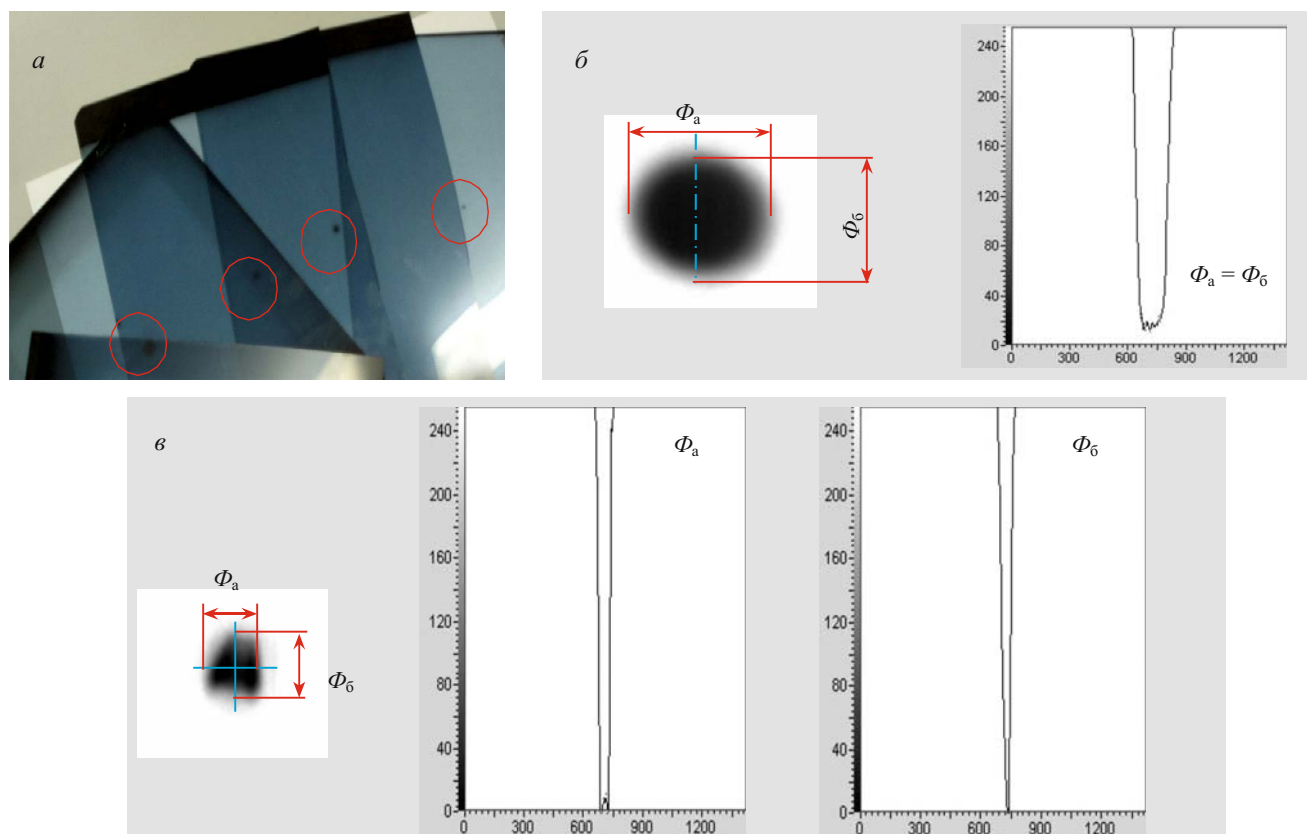


Рис. 5. Рентгенограммы (а), графики изменения интенсивности светового потока по линиям сканирования Φ_a и Φ_b и изображения фокусных пятен для 4БПМ8-250 (б) и 1,2-3БПМ5-300 (в)

$0,25(S_{\max} - S_{\text{вуваль}})$. Мы измеряли по уровню $0,5(S_{\max} - S_{\text{вуваль}})$. Результаты представлены в таблице.

Помимо систематической ошибки, связанной с точностью инструмента, при измерении размеров фокусного пятна по его рентгенографическому изображению возникает случайная погрешность, обусловленная ручным способом сканирования. На рис. 5 представлены рентгенограммы и изображения фокусных пятен рентгеновских трубок 1,2-3БПМ5-300 и 4БПМ8-250, графики изменения интенсивности светового потока по линиям сканирования. Рентгенографические изображения получали после фотообработки экспонированной рентгеновской пленки. Для повы-

шения точности использовали сканер ScanMacker 9800XL MICROTEK с шагом сканирования 0,1 мм.

Фокусное пятно источника (излучатель рентгеновского аппарата RE320/14) измеряли также по его цифровому рентгенографическому изображению [18, 19], полученному с использованием плоскопанельного детектора рентгеновского излучения (PerkinElmer XRD 0822 xP) и специального программного обеспечения [6 – 8, 19]. (Технические характеристики PerkinElmer XRD 0822 xP: размер матрицы — 1024 × 1024 пикселей; размер пикселя — 0,2 мм; разрядность — 16 бит; число дискретных уровней яркости (оттенков

Результаты измерений фокусного пятна

Рентгеновский аппарат	Тип трубки	Режим экспозиции			Результат измерения, мм	
		U, кВ	I, mA	t, c	Φ_a^*	Φ_b^*
РАП220-5	8 БПК5-220	40	2	10	$2,31 \pm 0,2$	$2,05 \pm 0,2$
РУП150/300	4БПМ8-250	60	6	10	$3,90 \pm 0,2$	$3,61 \pm 0,2$
		65	6	12		
		70	6	15		
		70	6	15		
РАП150/300	1,2-3БПМ5-300	70	6	20	$4,93 \pm 0,2$	$3,35 \pm 0,2$
		70	6	20		
		70	6	20		

* Размер фокусного пятна указан для двух направлений измерения: Φ_b — в направлении оси рентгеновской трубки; Φ_a — в перпендикулярном направлении (см. рис. 1).

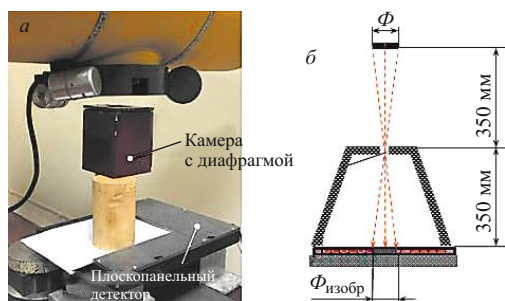


Рис. 6. Установка (а), схема формирования изображения фокусного пятна рентгеновской трубки при использовании плоскопанельного детектора (б)

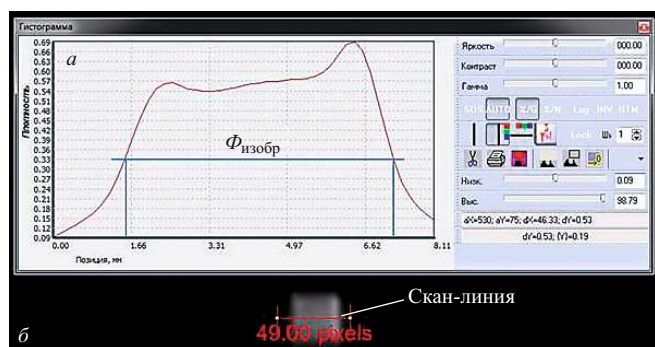


Рис. 7. Изменение уровня яркости пикселей (а), расположенных вдоль скан-линии цифрового изображения фокусного пятна (б)

серого) — 65 536; диапазон энергий излучения — от 20 кэВ до 15 МэВ.)

Использовали следующую схему экспонирования: расстояния диафрагма — детектор и фокусное пятно — диафрагма были равны между собой. При этом условии размеры изображения $\Phi_{\text{изобр}}$ самого фокусного пятна Φ совпадают (рис. 6).

В общем случае на схему экспонирования влияет соотношение размеров фокусного пятна рентгеновской трубки и пикселя детектора. Если пятно меньше пикселя, то расстояние фокусное пятно — диафрагма уменьшают так, чтобы размер изображения пятна составлял не менее трех пикселей, поскольку без геометрического увеличения невозможно получить изображение объекта, размеры которого меньше размера пикселя.

Размер фокусного пятна определяли по скан-линии полученного таким образом цифрового рентгенографического изображения (рис. 7) (как число пикселей с уровнем яркости, отличным от нулевого, причем начало и конец отчета пикселей соответствовал точкам с уровнем яркости, равным половине от максимального).

Таким образом, исследование показало: время измерения фокусного пятна, полученного на рентгеновском снимке, существенно превышает время, затраченное на измерение его изображения, полученного

посредством цифровых технологий на плоскопанельном детекторе; результаты измерений с использованием разных способов приблизительно одинаковы; при использовании детектора максимальная погрешность составляет 0,2 мм, увеличивая изображение, ее можно уменьшить.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Авиакосмическое материаловедение / Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2 – 14.
2. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1. С. 3 – 33.
3. Каблов Е. Н., Морозов Г. А., Крутиков В. Н., Муравская Н. П. Аттестация стандартных образцов состава сложнлегированных сплавов с применением эталона / Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2. С. 9 – 11.
4. Каблов Е. Н. К 80-летию ВИАМ / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 5. С. 79 – 82.
5. Каблов Е. Н. Современные материалы — основа инновационной модернизации России / Металлы Евразии. 2012. № 3. С. 10 – 15.
6. ISO 17636-2. Non-destructive testing of welds — Radiographic testing's. Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors. 2013.
7. ISO 16371-1. Non-destructive testing — Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates. Part 1: Classification of systems. 2011.
8. ASTM E 2445–05. Standard Practice for Qualification and long-Term Stability of Computed Radiology Systems. 2010.
9. Степанов А. В. Методы рентгеновского неразрушающего контроля в производстве авиационных двигателей / Авиационные материалы и технологии. 2010. № 3. С. 28 – 32.
10. DIN EN 12543-1–1999. Non-destructive testing — Characteristics of focal spots in industrial x-ray systems for use in non-destructive testing. Part 1: Scanning method. 1999.
11. ГОСТ 22091.9–86. Приборы рентгеновские. Методы измерения размеров эффективного фокусного пятна. — М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1986. — 15 с.
12. Косарина Е. И., Степанов А. В. Неразрушающий контроль / Большая российская энциклопедия. 2013. Т. 22. С. 487 – 488.
13. Korner M., Weber Ch. H. Advances in Digital Radiography: Physical Principles and System Overview / Radio Graphics. 2009. Vol. 27. P. 675 – 686.
14. Rowlands J. A. The physics of computed radiography / Phys. Med. Biol. 2002. Vol. 47. P. 123 – 166.
15. Fischbach F., Freund T., Pech M., et al. Comparison of indirect CsI/a:Si and direct a:Se digital radiography: an assessment of contrast and detail visualization / Acta Radiol. 2007. Vol. 44. P. 616 – 621.
16. Степанов А. В., Косарина Е. И., Саввина Н. А., Усачев В. Е. Макро- и микропористость в сплавах на основе алюминия и никеля, обнаружение ее рентгеноскопическими методами неразрушающего контроля / Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 423 – 430.
17. Косарина Е. И., Степанов А. В., Усачев В. Е. Рентгеноскопические установки для решения некоторых задач промышленной дефектоскопии / XIX Всероссийская науч.-тех. конференция «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»: сб. тезисов докладов. — Самара, 2011. С. 245 – 246.
18. Майоров А. А. Цифровые технологии в неразрушающем контроле / Сфера Нефтегаз. 2009. № 9. С. 26 – 37.
19. Zscherpel U., Ewert U., Bavendiek K. Possibilities and Limits of Digital Industrial Radiology: The new high contrast sensitivity technique — Examples and system theoretical analysis. DIR 2007 / International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography. Lyon. 2007. P. 3 – 27.

REFERENCES

1. Kablov E. N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace material science] / Vse Mater. Èntsikloped Sprav. 2008. N 3. P. 2 – 14 [in Russian].

2. **Kablov E. N.** Innovatsionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNTs RF po realizatsii «Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative developments of FSUE “VIAM” SSC of RF on realization of “Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030”] / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2015. N 1. P. 3 – 33 [in Russian].
3. **Kablov E. N., Morozov G. A., Krutikov V. N., Muravskaya N. P.** Attestatsiya standartnykh obraztsov sostava slozhnolegirovannykh splavov s primeneniem étalona [Certification of standard samples of complex alloys using standard] / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. N 2. P. 9 – 11 [in Russian].
4. **Kablov E. N.** K 80-letiyu VIAM [On the 80th anniversary of VIAM] / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2012. Vol. 78. N 5. P. 79 – 82 [in Russian].
5. **Kablov E. N.** Sovremennye materialy — osnova innovatsionnoi modernizatsii Rossii [Modern materials — the basis of innovative modernization of Russia] / *Metally Evrazii.* 2012. N 3. P. 10 – 15 [in Russian].
6. ISO 17636-2. Non-destructive testing of welds — Radiographic testing’s. Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors. 2013.
7. ISO 16371-1. Non-destructive testing — Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates. Part 1: Classification of systems. 2011.
8. ASTM E 2445–05. Standard Practice for Qualification and long-Term Stability of Computed Radiology Systems. 2010.
9. **Stepanov A. V.** Metody rentgenovskogo nerazrushayushchego kontrolya v proizvodstve aviatsionnykh dvigatelei [Methods of X-Ray Examination in Aircraft Engines Manufacture] / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2010. N 3. P. 28 – 32 [in Russian].
10. DIN EN 12543-1–1999. Non-destructive testing — Characteristics of focal spots in industrial x-ray systems for use in non-destructive testing. Part 1: Scanning method. 1999.
11. RF State Standard GOST 22091.9–86. Pribory rentgenovskie. Metody izmereniya razmerov éffektivnogo fokusnogo pyatna [X-ray devices. The methods of measuring effective focus spot size]. — Moscow: Izd. Goskomitet SSSR po standartam, 1986. — 15 p. [in Russian].
12. **Kosarina E. I., Stepanov A. V.** Nerazrushayushchii kontrol’ [Non-destructive testing] / *Bol’sh. Ross. Éntsikloped.* 2013. Vol. 22. P. 487 – 488 [in Russian].
13. **Korner M., Weber Ch. H.** Advances in Digital Radiography: Physical Principles and System Overview / *Radio Graphics.* 2009. Vol. 27. P. 675 – 686.
14. **Rowlands J. A.** The physics of computed radiography / *Phys. Med. Biol.* 2002. Vol. 47. P. 123 – 166.
15. **Fischbach F., Freund T., Pech M., et al.** Comparison of indirect CsI/a:Si and direct a:Se digital radiography: an assessment of contrast and detail visualization / *Acta Radiol.* 2007. Vol. 44. P. 616 – 621.
16. **Stepanov A. V., Kosarina E. I., Savvina N. A., Usachev V. E.** Makro- i mikroporistost’ v splavakh na osnove alyuminiya i nikelya, obnaruzhenie ee rentgenoskopicheskimi metodami nerazrushayushchego kontrolya [Makro- and microporosity in alloys on the basis of aluminum and nickel, detection by its fluoroscopic methods of non-destructive control] / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. N S. P. 423 – 430.
17. **Kosarina E. I., Stepanov A. V., Usachev V. E.** Rentgenoskopicheskie ustanovki dlya resheniya nekotorykh zadach promyshlennoi defektoskopii [Digital radiology equipment for solving some non-destructive testing’s problems] / XIX Vserossiiskaya nauch.-tekh. konferentsiya «Sovremennye metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya i tekhnicheskoi diagnostiki»: sb. tezisov dokladov [Abstrs. of the XIX All-Russian Sci.-Tech. Conf. “Modern methods and means of nondestructive testing and technical diagnostics”]. — Samara, 2011. P. 245 – 246 [in Russian].
18. **Maierov A. A.** Tsifrovye tekhnologii v nerazrushayushchem kontrole [Digital technology in non-destructive testing] / *Sfera Neftegaz.* 2009. N 9. P. 26 – 37 [in Russian].
19. **Zscherpel U., Ewert U., Bavendiek K.** Possibilities and Limits of Digital Industrial Radiology: The new high contrast sensitivity technique — Examples and system theoretical analysis. DIR 2007 / International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography. Lyon. 2007. P. 3 – 27.