

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРОВ НЕСПЛОШНОСТЕЙ ПРИ АЛЬБЕДНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

© 2024 г. Е.Е. Журавский^{1,*}, Д.С. Белкин^{1,**}, Б.И. Капранов^{1,***}, С.В. Чахлов^{1,****}

¹Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30
E-mail: *zhuravskiy@tpu.ru; **Belkin@tpu.ru; ***introbob@mail.ru; ****chakhlov@tpu.ru

Поступила в редакцию 10.07.2024; после доработки 28.03.2024

Принята к публикации 29.03.2024

Рассмотрены способы определения положения и размера несплошностей при альбедной дефектоскопии. Показаны аналитические и численные решения задачи определения положения несплошностей на основании известных параметров коллимационной системы. Показана зависимость положения несплошности от параметров коллимационной системы. Предложено определять не истинный размер несплошности, а ее эквивалентную площадь, аналогично ультразвуковой дефектоскопии.

Ключевые слова: дефектоскопия, коллимационная система, неразрушающий контроль, радиационный контроль, приборостроение.

DETERMINATION OF POSITION AND SIZE OF NON-FLAWS AT ALBEDO FLAW DETECTION

© 2024 E.E. Zhuravskiy^{1,*}, D.S. Belkin^{1,**}, B.I. Kapranov^{1,***}, S.V. Chakhlov^{1,****}

¹Tomsk Polytechnic University, Lenin Ave., 30, Tomsk, 634050, Russia
E-mail: *zhuravskiy@tpu.ru; **Belkin@tpu.ru; ***introbob@mail.ru; ****chakhlov@tpu.ru

In this article the methods of determining the position and size of non-flaws in albedo flaw detection are considered. Analytical and numerical solutions of the problem of determining the location of non-flaws on the basis of known parameters of the collimation system are shown. The dependence of the location of the flaw on the parameters of the collimation system is shown. It is proposed to determine not the true size of the flaw, but its equivalent area, similar to ultrasonic flaw detection.

Keywords: flaw detection, collimation system, non-destructive testing, radiation inspection, instrument engineering.

DOI: 10.31857/S0130308224040043

ВВЕДЕНИЕ

К опасным объектам относятся различные продуктопроводы: нефтепродуктопроводы, газопроводы, а также сосуды и резервуары, работающие под избыточным давлением или содержащие взрывопожароопасные и химически опасные вещества. Все перечисленные объекты подвержены различного рода разрушениям: механическим, коррозионным и эрозионным. Механические повреждения достаточно просто выявить визуально. Коррозионные или эрозионные разрушения выявляются при помощи неразрушающих методов контроля, таких как радиография и ультразвуковая толщинометрия [1—6]. На данный момент можно контролировать продуктопровод или резервуар на стадии эксплуатации, применяя радиографические трансмиссионные методы контроля, т.е. на просвет через две стенки. Существуют достоверные методики определения положения коррозионных и эрозионных разрушений, а также величины этих разрушений при помощи радиографии. Но использующиеся для этого средства предполагают большие дозовые нагрузки, которые вынуждают изолировать определенные радиационно опасные зоны на объекте, вследствие чего возникает ряд организационных трудностей. Использование ультразвуковых методов для выявления и измерения разрушений также связано с рядом организационных трудностей — снятием изоляционных покрытий, а в некоторых случаях применение ультразвука ограничено температурой поверхности объекта. Уменьшение дозовых нагрузок, а также уменьшение числа организационных мероприятий возможно при использовании радиационных методов контроля на основе обратно рассеянного рентгеновского или гамма-излучения [6—17]. Коррозионные и эрозионные разрушения в действующей нормативно-технической документации определяются неоднозначно, т.е. не существует нормативного значения площади разрушения, положения разрушения, его глубины,

которые давали бы однозначные оценки дальнейшей эксплуатации объекта. Вследствие этого нами предложен способ определения параметров несплошностей с помощью альбедной дефектоскопии, в котором основной целью является определение положения коррозионного или эрозионного разрушения и его эквивалентной площади, аналогично классической ультразвуковой дефектоскопии.

АЛЬБЕДНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Под альбедным способом дефектоскопии (АСД) в данной статье понимается совокупность средств контроля, методик сканирования объекта контроля (ОК) коллимированным (щелевым) рентгеновским или гамма-излучением (КИ), формирующим в ОК эмиссионный источник обратнорассеянного гамма-излучения (ОРИ), направленного на детектор, в целях определения положения и эквивалентной площади несплошности в ОК. АСД не относится к томографическим методам.

СПОСОБ СКАНИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ

Рассмотрим коллимационную систему (КС) и схему формирования обратнорассеянного излучения (рис. 1), состоящую из источника рентгеновского или гамма-излучения, первичного щелевого коллиматора (ПЩК), вторичного щелевого коллиматора (ВЩК) и детектора в виде сцинтиллятора. На рисунке показана плоская геометрия прямого и рассеянного пучков, т.е. показаны центральные пучки из первичного и рассеянного потоков излучения, формируемых первичным и вторичным щелевыми коллиматорами соответственно.

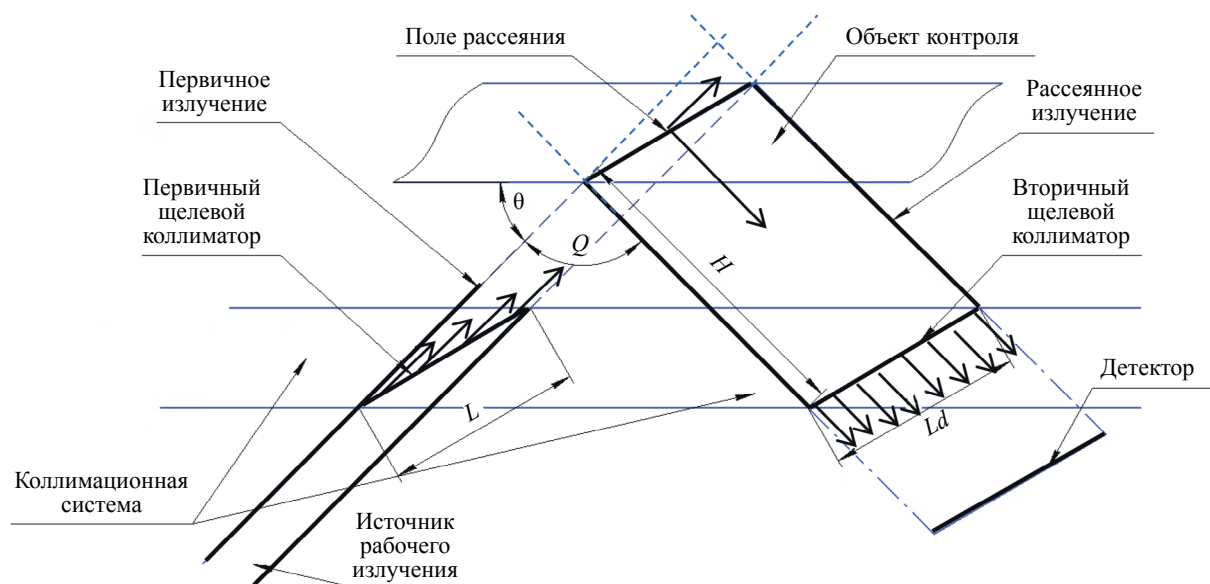


Рис. 1. Схема формирования обратнорассеянного излучения.

Рентгеновское или гамма-излучение (далее — излучение), проходя через ПЩК, формирует ленточный пучок длиной L . Падая на поверхность ОК под некоторым углом θ , этот пучок образует в ОК поле рассеяния. Данное поле представляет собой эмиссионный источник гамма-излучения. Со стороны источника первичного излучения расположен ВЩК, который формирует обратнорассеянное гамма-излучение (ОРИ) в виде ленточного пучка, направленного в сторону сцинтилляционного детектора.

Рассмотрим схему с двумя одинаковыми детекторами, между которыми находится тонкая, непрозрачная для видимого света перегородка. При взаимодействии КИ с ОК формируется поток обратнорассеянного излучения, коллимированного детектором ВЩК. Примем, что число рассеянных фотонов, вылетающих из ОК, пропорционально L . При наличии в ОК какой-либо несплошности примем сигнал от нее равным нулю.

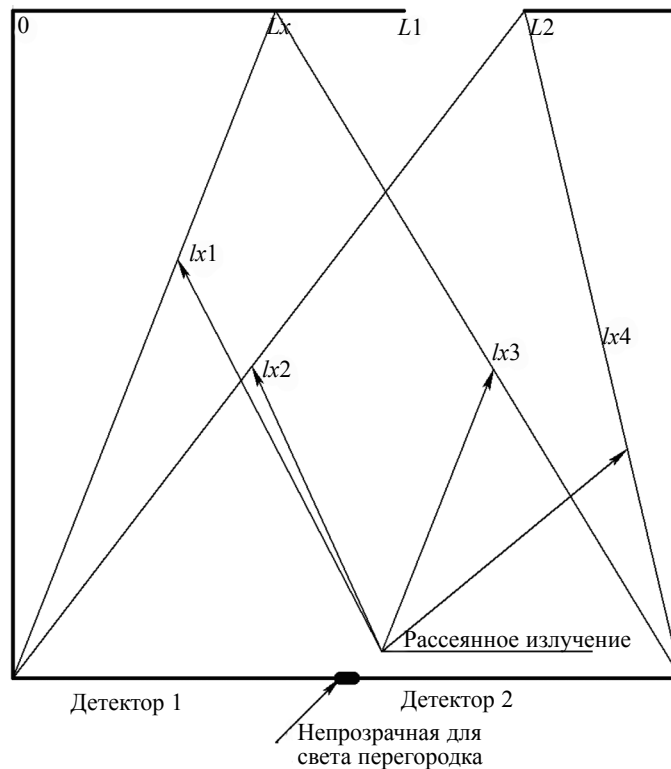


Рис. 2. Схема с двумя детекторами (lx приведена с индексами для примера визуализации).

Так как эмиссионный источник представляет собой линейный источник длиной L , то каждая точка источника, расположенная на расстоянии Lx от начала координат, излучает под некоторым, заранее заданным геометрией КС углом θ , равномерно в направлении детектора. Обратнорассеянное излучение, рассеянное из точки источника, расположенной на расстоянии Lx , будет проходить разный путь до каждой точки одного из детекторов. Установим зависимость расстояния lx от Lx и x , где x — расстояние от нуля до отдельно выбранной точки на одном из детекторов:

$$lx(Lx, x) = \sqrt{x^2 - 2 \cdot Lx \cdot x + (H^2 + Lx^2)}, \quad (1)$$

где H — перпендикуляр от эмиссионного источника до линейки детекторов.

Далее получим зависимость интенсивности излучения $I\Delta x$ для каждого элемента детектора:

$$I\Delta x(x) = \int_0^L \frac{1}{lx(Lx, x)^2} dLx = \int_0^L \frac{1}{x^2 - 2 \cdot Lx \cdot x + (H^2 + Lx^2)} dLx. \quad (2)$$

Проинтегрировав правую часть уравнения (2), получим:

$$I\Delta x(x) = \frac{\arctan\left(\frac{x}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{L - x}{L \cdot a}\right)}{L \cdot a}, \quad (3)$$

где $a = \frac{H}{L}$.

Рассмотрим случай, когда в каком-либо месте эмиссионного источника отсутствует рассеиватель, т.е. существует некоторая несплошность. На рис. 3 границы такой несплошности обозначены символами $L1$ и $L2$ соответственно, длина несплошности будет равна L_n :

$$L_n = L2 - L1. \quad (4)$$

Итоговое уравнение интенсивности излучения $In\Delta x$ с несплошностью выглядит следующим образом:

$$In\Delta x(L1, L_n, x) = \frac{\arctan\left(\frac{x}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{L-x}{L \cdot a}\right) - \arctan\left(\frac{x-L1}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{x-(L1+L_n)}{L \cdot a}\right)}{L \cdot a}. \quad (5)$$

Рассмотрим уравнение (6), которое представляет собой зависимость суммарного сигнала двух детекторов от положения и размера несплошности Is :

$$Is(L1, L_n, x) = \frac{1}{L \cdot a} \left[\int_0^L \arctan\left(\frac{x}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{L-x}{L \cdot a}\right) - \arctan\left(\frac{x-L1}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{x-(L1+L_n)}{L \cdot a}\right) dx \right]. \quad (6)$$

Проанализировав уравнение (6), можно установить, что значение суммарного сигнала с двух детекторов незначительно зависит от положения несплошности. Основной вклад в величину сигнала вносит размер несплошности. Вследствие этого уравнение (5) можно упростить, приняв $L1$, равной нулю:

$$Is(L_n, x) = \int_0^L \frac{\arctan\left(\frac{L-x}{L \cdot a}\right) - \arctan\left(\frac{L_n-x}{L \cdot a}\right)}{L \cdot a} dx. \quad (7)$$

Откуда следует, что, зная параметры КС, можно вычислить размер несплошности по уравнению (7).

Рассмотрим следующее уравнение (8), которое представляет собой разность сигналов с детекторов ΔS :

$$\Delta S = \int_0^{L/2} In\Delta x(x) dx - \int_{L/2}^L In\Delta x(x) dx. \quad (8)$$

Подставив значение L_n , определенное согласно уравнению (4), в уравнение (7), решив его численными методами, можно определить положение несплошности.

РЕШЕНИЕ ДЛЯ ДВУХ И БОЛЕЕ НЕСПЛОШНОСТЕЙ

Решение уравнения (7) для двух и более несплошностей — трудоемкий процесс, который может быть упрощен при следующем предположении. При измеренном значении сигнала от двух детекторов устанавливается величина вероятной несплошности. Вследствие того, что заранее неизвестны количество и размеры предполагаемых несплошностей, можно объединить все несплошности в одну. На следующем примере продемонстрирован изложенный подход.

Примем длину эмиссионного источника и детекторов L , а также высоту H , равными 100 мм. Определим две несплошности со следующими параметрами: $L1 = 5$ мм, $L1_n = 10$ мм, $L2 = 25$ мм, $L2_n = 10$ мм. На рис. 3 представлены положения несплошностей:

Далее воспользуемся приведенным выше алгоритмом и на основании уравнений (4) и (7) определим размер и положение неизвестной нам несплошности, считая, что положение указанных несплошностей нам неизвестно, а известны только суммарный сигнал с двух детекторов и разность их сигналов. Размер рассчитанной и реальной несплошностей сопоставляются друг с другом на рис. 3.

ЭКСПЕРИМЕНТ

На рис. 4а изображена коллимационная система с рентгеновским аппаратом (РА) РАП-300-5.

Алюминиевая пластинка с искусственными несплошностями (рис. 4б) в виде отверстий и засверловки перемещалась над ПЩК продольно. Использовался сцинтилляционный детектор ВГО. При облучении РА алюминиевой пластинки измерялся суммарный сигнал с детекторов, а также разность сигналов детекторов. Время измерения на один кадр составило 0,3 с, шаг сканиро-

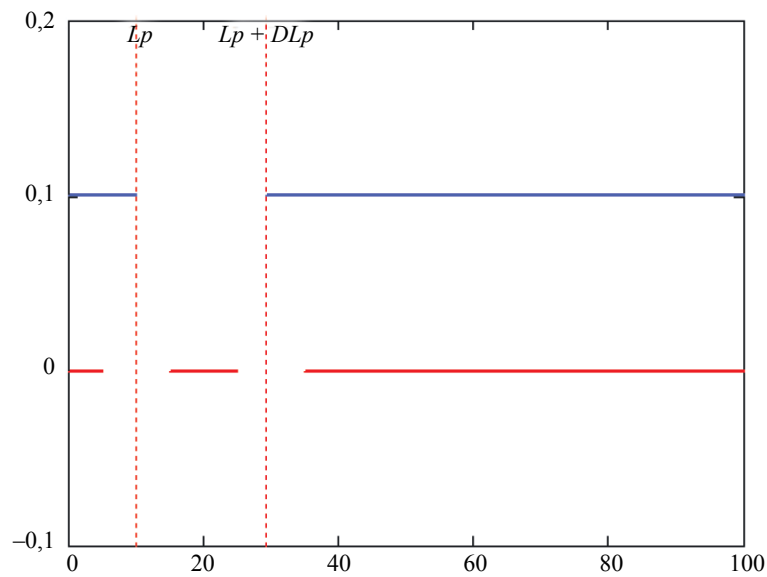


Рис. 3. Положения несплошностей. Синяя линия — рассчитанная несплошность, где $L_p = 10$ мм, $DL_p = 19,3$ мм, $L1_n + L2_n = 20$ мм, красная линия — заранее заданная.

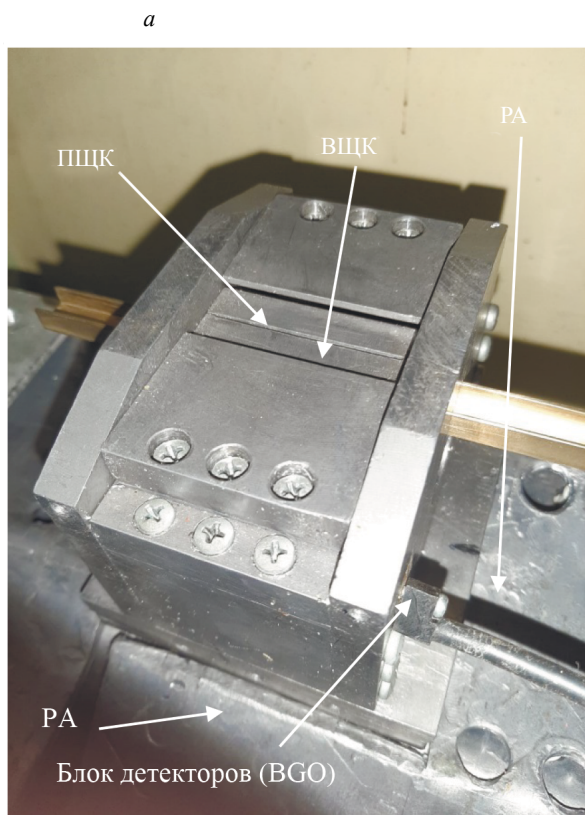


Рис. 4. Коллимационная система (а); алюминиевая пластина (б).

вания 0,1 мм. В ходе проведения сканирования и промежуточных программных преобразований получены результаты, представленные на рис. 5.

Как видно из результатов, положение и размер несплошностей соответствует положению реальных несплошностей на пластине. Размер несплошностей в случае отверстий соответствует реальным размерам, а размер засверловки — нет. Данный факт объясняется зависимостью уровня сиг-

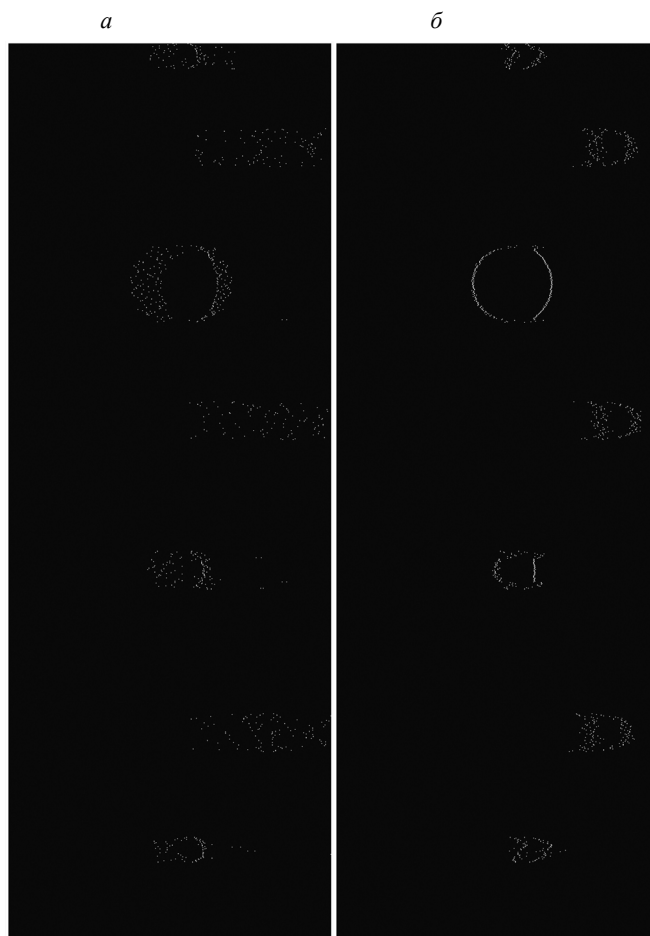


Рис. 5. Восстановленное изображение (*a* — 1 кадр; *б* — 100 кадров).

нала от размера несплошности, засверловка расположена на определенной глубине в образце, соответственно и поток обратнорассеянного излучения будет больше, откуда и меньший размер по сравнению с реальным размером несплошности. С увеличением числа кадров контур несплошностей определяется более четко вследствие уменьшения случайной погрешности измерения (за счет статистического накопления.)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены формулы для определения размеров и положения несплошностей по суммарному сигналу с детекторов и по разности сигналов детекторов при продольном сканировании щелевым коллиматором.

2. Рассмотренная коллимационная система с щелевым коллиматором позволяет проводить сканирование производительнее (по сравнению с коллиматором в виде «пинхола»).

3. Размер несплошности зависит от глубины залегания несплошности и ее высоты. Положение несплошности определяется с большей точностью, так как зависит от разности сигналов детекторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abdul-Majid S., Balamesh A., Othmany D.A., Alassiaa A., Al-Huraibi H.* Corrosion Imaging and Thickness Determination Using Micro-Curie Radiation Sources Based on Gamma-Ray Backscattering: Experiments and MCNP Simulation // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2015. V. 26. No. 1. P. 43—59.
2. *Abdul-Majid S., Balamesh A.* Underwater Pipe Wall Thickness Measurements by Gamma Backscattering (Retrieved on Aug. 2016. V. 30) // *Applied Radiation and Isotopes*. 2010. V. 68. No. 12. P. 2181—2188.

3. *Margret M., Menaka M., Subramanian V., Baskaran R., Venkatraman B.* Non-destructive inspection of hidden corrosion through Compton backscattering technique // *Radiation Physics and Chemistry*. 2018. V. 152. P. 158—164.
4. *Balamesh A., Salloum M., Abdul-Majid S.* Feasibility of a New Moving Collimator for Industrial Backscatter Imaging // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2018. V. 29. No. 3. P. 143—155.
5. *Margret M., Subramanian V., Baskaran R., Venkatraman B.* Detection of scales and its thickness determination in industrial pipes using Compton backscattering system // *Review of Scientific Instruments*. 2018. V. 89. No. 11. P. 113—117.
6. *Sharma A., Sandhu B. S., Singh B.* Incoherent scattering of gamma photons for non-destructive tomographic inspection of pipeline // *Applied Radiation and Isotopes*. 2010. V. 68. No. 12. P. 2181—2188.
7. *Margret M., Menaka M., Venkatraman B., Chandrasekaran S.* Compton back scatter imaging for mild steel rebar detection and depth characterization embedded in concrete // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2015. V. 343. P. 77—82.
8. *Benitez D. S., Quek S., Gaydecki P., Torres V.* A preliminary magneto-inductive sensor system for real-time imaging of steel reinforcing bars embedded within concrete // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2008. V. 57. No. 11. P. 2437—2442.
9. *Baek S., Xue W., Feng M.Q., Kwon S.* Nondestructive corrosion detection in RC through integrated heat induction and IR thermography // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2012. V. 31. No. 2. P. 181—190.
10. *Yamazaki K., Ishikawa K., Haga A., Muramatsu K., Kobayashi K., Sasaki H.* Impedance measurement using a resonance circuit for detecting steel bars and cables inside pliable plastic conduit tubes buried in concrete walls and slabs // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2010. V. 46. No. 6. P. 1963—1966.
11. *Yamazaki K., Ishikawa K., Haga A., Muramatsu K., Kobayashi K., Sasaki H.* Monitoring corrosion of rebar embedded in mortar using high-frequency guided ultrasonic waves // *Journal of Engineering Mechanics*. 2009. V. 135. No. 1. P. 9—19.
12. *Fan Y., Ji X., Cai P., Lu Q.* Non-destructive detection of rebar buried in a reinforced concrete Wall with wireless passive SAW sensor // *Measurement Science Review*. 2013. V. 13. No. 1. P. 25—28.
13. *Kolkoori S., Wrobel N., Zscherpel U., Ewert U.* A new X-ray backscatter imaging technique for non-destructive testing of aerospace materials // *NDT&E International*. 2015. V. 70. P. 41—52.
14. *O'Flynn D., Crews C., Fox N., Allen B.P., Sammons M., Speller R.D.* X-ray backscatter sensing of defects in carbon fibre composite materials // *Advanced Photon Counting Techniques XI*. International Society for Optics and Photonics. 2017. V. 10212. P. 102120R.
15. *Kolkoori S., Wrobel N., Osterloh K., Zscherpel U., Ewert U.* Novel X-ray backscatter technique for detection of dangerous materials: application to aviation and port security // *Journal of Instrumentation*. 2013. V. 8. No. 9. P. P09017.
16. *Shinji Nomura, Kazunori Tejima, Ikuo Wakamoto.* Scattered X-ray type defect detector, and X-ray detector. JP. Patent No. 2001208705A. 03 August 2001.
17. *Ignatiev N.G., Orlov I.E., Ergashev D.E.* Experimental studies of scintillation detectors based on WLS fibers // *Instruments and Experimental Techniques*. 2016. V. 59. No. 6. P. 789—793.