

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПИНХОЛА КОЛЛИМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АЛЬБЕДНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

© 2020 г. Е.Е. Журавский^{1,*}, Б.И. Капранов^{1,**}, Д.С. Белкин^{1,***}, С.В. Чахлов^{1,****},
А.М. Штейн^{1,*****}

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

Поступила в редакцию 25.10.2019; после доработки 12.12.2019

Принята к публикации 20.12.2019

Рассмотрены особенности коллимационной системы томографа для контроля стальных изделий на комптоновском обратном рассеянии. Описано устройство и проведен расчет параметров первичного коллиматора «пинхола» коллимационной системы, позволяющее достоверно проводить сканирование стального объекта контроля простым перемещением пинхола перпендикулярно оси рентгеновского пучка от анода трубки в пределах 50 мм при фокусном расстоянии 163 мм.

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

DOI: 10.31857/S0130308220020050

ВВЕДЕНИЕ

Для внутритрубного диагностирования при одностороннем доступе стальных нефтегазопроводов, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах, используются следующие виды неразрушающего контроля (НК): ультразвуковой, магнитный, вихретоковый. Повысить эксплуатационную безопасность нефтегазопроводов возможно путем повышения достоверности НК, в частности, применением различной комбинации видов (методов) НК. Повышение достоверности и производительности применения радиационных методов для контроля изделий из углеводородов, алюминия, стали при одностороннем доступе стало возможно благодаря разработкам рентгеновской вычислительной томографии (РВТ) на комптоновском обратном рассеянии (КОР)[1—6]. Известна установка для альбедной компьютерной томографии (АКТ) Гамбургской лаборатории ComScan фирмы «Philips». Разработанная установка применяется для изделий с низким атомным номером ($Z < 26$) и позволяет контролировать при одностороннем доступе изделия из стали с глубиной контроля до 3 мм, алюминия — с глубиной контроля до 20 мм при напряжении на рентгеновской трубке $E_{\max}$ 160 кВ. Ограничение толщины просвечиваемого слоя определяется энергией первичного и рассеянного излучения

$$E_s(E_0; \theta) = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{0,511} \cdot (1 - \cos \theta)}, \quad (1)$$

где E_0 — эффективная энергия рентгеновского излучения $\frac{2}{3} E_{\max}$, кэВ; E_s — энергия рассеянного излучения, кэВ; θ — угол рассеяния.

При углах рассеяния $\theta \approx 135^\circ$ величина E_s (для $E_0 = 106$ кэВ) составляет 78 кэВ, при заданной энергии линейный коэффициент ослабления для железа составляет $4,671 \text{ см}^{-1}$. Если принять в качестве толщины просвечиваемого слоя 3 длины свободного пробега рассеянного излучения, то для $E_s = 78$ кэВ толщина для стали составит примерно 5 мм. Повысить предельно возможную контролируемую толщину для стальных изделий возможно путем повышения напряжения на рентгеновской трубке. При повышении напряжения на рентгеновской трубке параметры КС также изменятся, вследствие чего необходимо выбрать и оценить параметры разрабатываемой КС системы АКТ.

ОПИСАНИЕ КОЛЛИМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Компания Mitsubishi Heavy Industries Ltd описывает детектор РВТ на КОР в своем патенте, предназначенном для обнаружения несплошностей (таких как внутренние трещины) в бетоне туннелей и мостов [7].

Одна из основных составляющих детектирующих систем, использующих обратнорассеянное рентгеновское излучение (ОРРИ) — коллимационная система, обеспечивающая пространственное формирование первичного и рассеянного излучения (первичного и вторичного коллиматоров). Ее основная характеристика — информационная способность, которая полностью определяется формой и размерами рассеивающего объема (РО), из которого собираются однократно рассеянные кванты [8—12].

Для описания информационной способности коллимационной системы введено понятие пространственно-статистической неопределенности (ПСН) по направлению сканирования Δ ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) [10].

Если учесть, что поток рассеянных квантов и квантов, попавших в детектор, описывается по закону Пуассона, то относительная статистическая погрешность измерения его интенсивности равна $\delta_{\text{ст}} = \frac{1}{\sqrt{N}}$, где N — количество квантов. Так как N пропорционально объему V с учетом того, что размеры вокселя малы, то можно представить $\delta_{\text{ст}}$ по следующей формуле:

$$\delta_{\text{ст}} = \frac{K}{\sqrt{V}}, \quad (2)$$

где K — коэффициент пропорциональности. Погрешность измерения координат или пространственная разрешающая способность в первом приближении определяется половиной ширины апертуры на полувысоте по заданному направлению

$$\delta_p = \frac{\Delta l}{2}. \quad (3)$$

Результирующая пространственно-статистическая неопределенность апертуры Δ может быть описана произведением $\delta_{\text{ст}} \cdot \delta_p$:

$$\Delta = \delta_{\text{ст}} \cdot \delta_p = \frac{\Delta l \cdot K}{2\sqrt{V}}. \quad (4)$$

Форма и размеры РО определяются формой и размером первичного и вторичного коллиматоров. Пространственно-статистическая неопределенность главным образом зависит от соотношения размеров первичного и вторичного коллиматоров. В качестве первичного коллиматора чаще всего используют «пинхол» [10], формирующий узкий «карандашный» пучок первичного (зондирующего) излучения. Вторичный коллиматор представляет собой «пинхол», растянутый вдоль одной оси по направлению сканирования (щель).

Взаимное пересечение первичного пучка и зоны чувствительности вторичного коллиматора формируют РО, геометрия РО представлена на рис. 1.

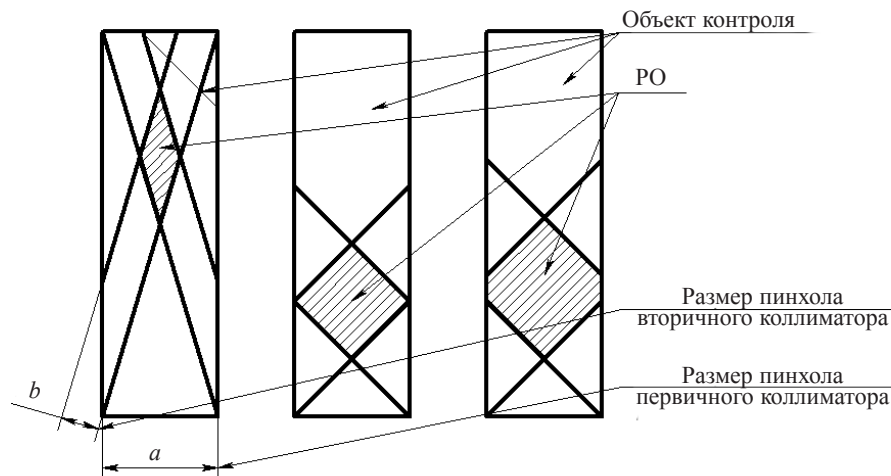


Рис. 1. Вариации формы РО в зависимости от размеров пинхола первичного коллиматора (a) и вторичного коллиматора (b).

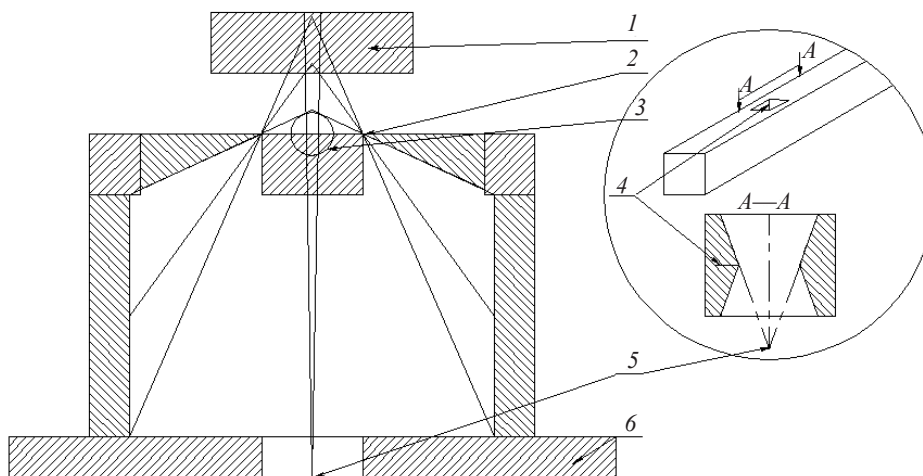


Рис. 2. Конструкция системы коллиматоров:

1 — объект контроля; 2 — вторичный коллиматор; 3 — первичный коллиматор; 4 — пинхол; 5 — рентгеновское излучение; 6 — коллимационная система.

Практическая конструкция, разработанная для контроля стальных изделий при одностороннем доступе толщиной до 10 мм, представлена на рис. 2.

Рентгеновское излучение 5, проходя через первичный коллиматор 3 преобразуется в узкий «карандашный» пучок пинхолом 4, далее комптоновски обратнорассеянное рентгеновское излучение коллимируется пинхолом вторичного коллиматора 2. Разработанная конструкция предполагает сканирование ОК. Существуют два способа сканирования ОК:

первый, при котором пинхол первичного коллиматора перемещается относительно ОК;

второй, при котором сама КС вместе с источником рентгеновского излучения перемещается относительно ОК, в данном случае пинхол неподвижен.

Первый способ оказывается намного проще второго по техническому исполнению. При реализации первого способа к пинхолу предъявляется ряд требований. Конструкция пинхола должна обеспечивать постоянное значение поперечного сечения для всех углов наклона, то есть поперечное сечение рабочего пучка рентгеновского излучения для каждого угла наклона должно быть одинаковым. При данном условии пространственно-статистическая неопределенность (в зависимости от угла наклона рабочего пучка рентгеновского излучения) будет постоянной. Также требованием к пинхолу является 100-процентное ослабление интенсивности рабочего пучка за стенками пинхола. Рассмотрим возможность реализации первого способа сканирования применительно к разработанной системе.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПИНХОЛА

В данной работе проведен анализ геометрии формирования РО и пространственно-статистической неопределенности сканирующей системы в целом. Рассмотрена система на основе рентгеновского излучения с напряжением на трубке 300 кВ. В качестве эффективной энергии рентгеновского излучения принято значение 200 кэВ. Первичный коллиматор (пинхол) выполнен из вольфрама толщиной 5 мм. Размер пинхола первичного коллиматора (см. рис.1) принят 1 мм. Для данной энергии рентгеновского излучения ослабление интенсивности первичного пучка в стенках пинхола составляет более 1000 раз. Сканирование проводилось вдоль продольной оси щели вторичного с длиной 50 мм. Расстояние от анода рентгеновской трубки до поверхности рассеивателя равно 163 мм (см. рис. 2).

Угол наклона рабочего пучка рентгеновского излучения для крайних точек перемещения α следующий:

$$\alpha = \arctg \frac{163}{25} \approx 8,72^\circ. \quad (5)$$

Рассмотрим возможную конструкцию пинхола, выполняющую требование постоянного поперечного значения рабочего пучка рентгеновского излучения. Постоянное значение поперечного сечения во всех углах наклона может быть выполнено для схемы пинхола, приведенной на рис. 3, где $\alpha = 8,72^\circ$; $a = 1$ мм.

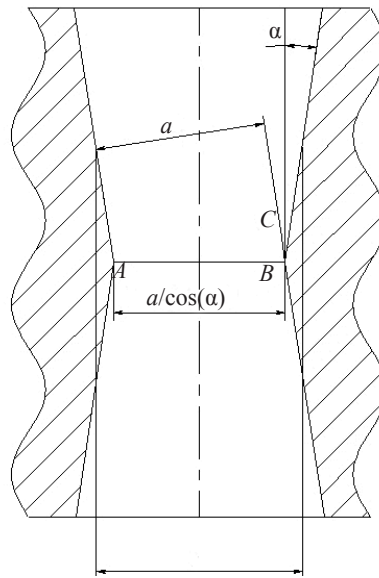


Рис. 3. Схема пинхола.

Как видно из рис. 3, схема обеспечивает максимальное отклонение диаметра рабочего пучка не более 0,2 %.

Геометрия на рис. 3 не обеспечивает требование 100-процентного ослабления интенсивности рабочего пучка в стенках пинхола, т.к. за границами *A* и *B* не происходит необходимого ослабления рабочего пучка. Физически это требование невыполнимо, поэтому при разработке конструкции пинхола было принято условие десятикратного ослабления за границами *A* и *B*.

Линейный коэффициент ослабления μ_w вольфрама при эффективной энергии 200 кэВ равен $14,417 \text{ см}^{-1}$. Минимальная толщина вольфрама *h*, при которой обеспечивается ослабление интенсивности пучка рентгеновского излучения в 10 раз, составляет

$$L(E_0, \mu_w) = \frac{\ln 10}{\mu_w(E_0)} = 1,6 \text{ мм.} \quad (6)$$

Учтем вычисленную толщину вольфрама для получившейся конструкции на рис. 4.

На левой части рис. 4 изображена схема пинхола с учетом требования по десятикратному ослаблению. Учесть два требования, предъявляемые к пинхолу, не удается. Поэтому исследуем

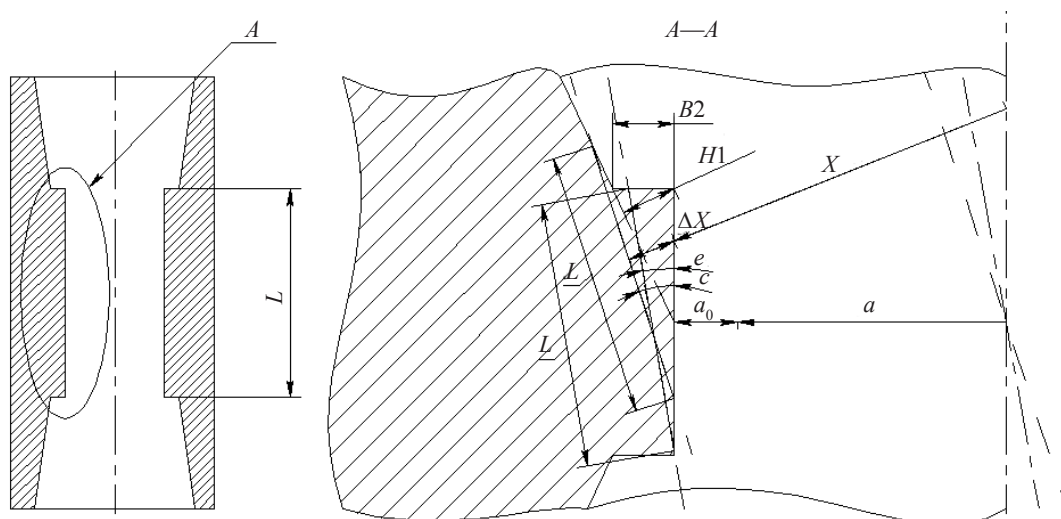


Рис. 4. Пинхол.

схему пинхола на рис. 4. Выделив часть A левого рис. 4, можно видеть (правая часть рис. 4), что требуемое ослабление на границах пучка обеспечивается при углах $8,72^\circ$ и 0° . Для углов, лежащих между этими значениями, требуемого ослабления излучения не будет. Но при увеличении поперечного сечения рабочего пучка для углов, при которых не обеспечивается достаточного ослабления интенсивности пучка, радиационная толщина достигнет необходимого значения при $X+\Delta X$ на рис. 4 (правая часть). Здесь X — поперечное сечение рабочего пучка; ΔX — дополнительная часть рабочего пучка, которая обеспечивает необходимое ослабление. Рассмотрим геометрию рис. 4 с целью определения поперечных размеров пучка $X+\Delta X$ для каждого угла α , а также для определения интенсивности излучения I рабочего пучка для каждого угла. Исходя из начальных условий, поперечное сечение пучка a (см. рис. 3) равно 1 мм, тогда ΔX будет определяться для данного угла только геометрией конструкции при угле α , равном $8,72^\circ$:

$$a_0(8,72) = 1 - \frac{a}{\cos(8,72)} = 5,874 \text{ мкм.} \quad (7)$$

Как видно из уравнения (7), поперечное сечение рабочего пучка при угле 0° увеличивается за счет геометрии конструкции всего на $2a_0$, то есть на 10 мкм. Величина фаски $B2$ пинхола

$$B2(\alpha) = \frac{L}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (8)$$

Величина фаски для угла $8,72^\circ$ равна 0,122 мм. При выполнении требуемых условий изменение сечения рабочего пучка для углов, отличных от 0° и $8,72^\circ$ без учета ослабления, будет

$$X(\alpha) = 2 \left(\frac{L}{2} + \Delta a_0(8,72) \right) \cos \alpha. \quad (9)$$

Анализ уравнения (9) показывает, что максимальным значение рабочего пучка будет для угла 0° и минимальным — для угла $8,72^\circ$.

Для анализа увеличения поперечных размеров пучка при углах, не равных 0° и $8,72^\circ$, учитывающих необходимое ослабление пучка, нужно рассмотреть два случая. Рассмотрим первый случай зависимости поперечного значения пучка для углов, меньших $\arcsin\left(\frac{B2(8,72)}{L}\right)$ (угол e на рис. 4). Значение ΔX составляет

$$\Delta X(\alpha) = \left(\frac{L}{\sin \alpha} - \frac{L}{2} \operatorname{tg} \alpha \right) \cos \alpha. \quad (10)$$

Анализ уравнения (10) показывает, что сечение рабочего пучка увеличивается при увеличении угла до $\arcsin\left(\frac{B2(8,72)}{L}\right)$. Второй случай возникает для углов, больших $\arcsin\left(\frac{B2(8,72)}{L}\right)$ (угол c на рис. 4). Отсюда значение ΔX для второго случая

$$\Delta X(\alpha) = \left(\frac{L \cdot \operatorname{tg} 8,72}{\operatorname{tg} \alpha} - \frac{L}{2} \right) \sin \alpha. \quad (11)$$

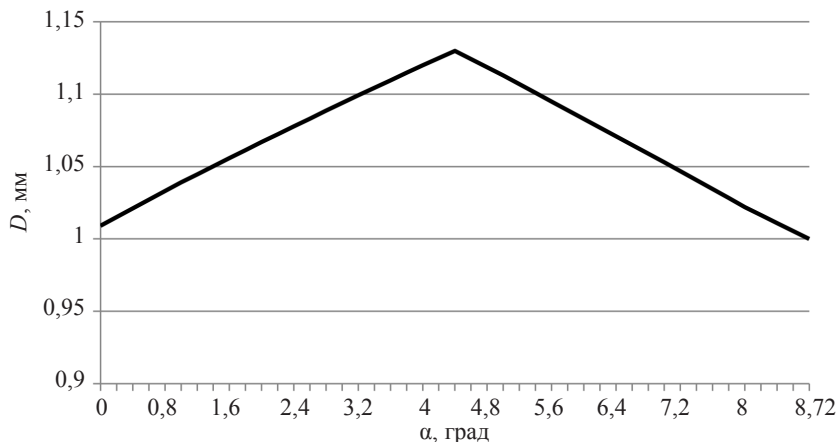


Рис. 5. Зависимость диаметра рабочего пучка излучения от угла.

Анализ уравнения (11) показал, что сечение пучка излучения уменьшается, начиная с угла $\arcsin\left(\frac{B2(8,72)}{L}\right)$, и минимально при угле $8,72^\circ$. На рис. 5 изображена зависимость сечения рабочего пучка излучения D для разных углов, обеспечивающая уменьшение интенсивности излучения в 10 раз.

Для определения зависимости полной интенсивности рабочего пучка от угла α рассмотрим рис. 4. Величина L должна составлять не менее 1,6 мм. Рабочий пучок излучения, для α отличных от 0° , будет частично задевать стенки пинхола, тем самым на его границах будет ослабление пучка. Для вычисления полной интенсивности излучения рабочего пучка проанализируем изменение L при перемещении вдоль отрезка $H1$

$$L(\alpha) = \frac{H1(\alpha)}{\sin\alpha \cdot \cos\alpha}. \quad (12)$$

Суммарная интенсивность излучения получается при интегрировании следующих уравнений:

$$I(x) = \begin{cases} e^{\frac{\mu_w(x-H1(\alpha))}{\sin\alpha \cdot \cos\alpha}} & \rightarrow 0 \leq x < H1(\alpha) \\ 1 & \rightarrow H1(\alpha) \leq x < 2(B2 + X) - H1(\alpha) \\ e^{\frac{-\mu_w(x-(2(B2+X)-H1(\alpha)))}{\sin\alpha \cdot \cos\alpha}} & \rightarrow 2(B2 + X) - H1(\alpha) \leq x < 2(B2 + X). \end{cases} \quad (13)$$

Проинтегрировав уравнения (13) по углам от 0 до $8,72^\circ$ включительно, получим следующее распределение нормированной интенсивности излучения $ln(x)$ рабочего пучка для заданных углов (см. рис. 6).

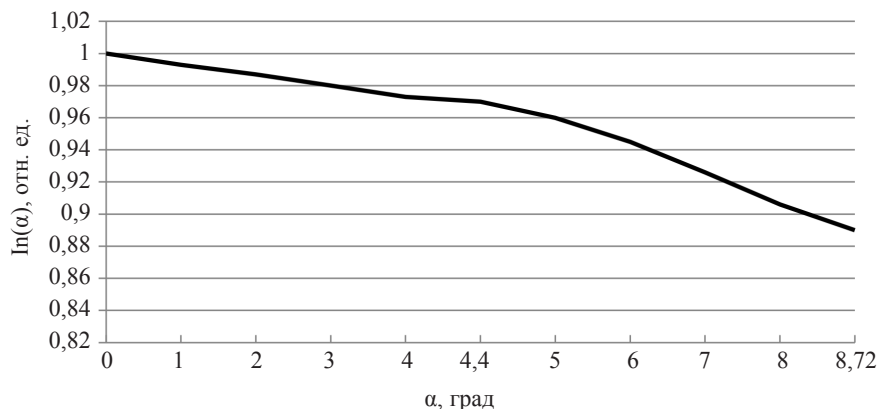


Рис. 6. Зависимость интенсивности излучения рабочего пучка от угла.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Расчеты показывают, что при выбранной геометрии пинхола отклонение оси пучка на $\pm 8,72^\circ$ вызывает отклонение интенсивности излучения не более 11 %. Это обеспечивает возможность аппаратной или программной коррекции уровней сигналов в системе. На рис. 7 изображена конструкция пинхола со всеми требуемыми геометрическими размерами.

Разработанный макет коллимационной системы для контроля стальных изделий представлен на рис. 8.

Результаты сканирования стальной пластинки I рентгеновским излучением с эффективной энергией 200 кэВ представлены на рис. 9.

Как видно из рис. 9, разница между максимальным уровнем сигнала $ln(\alpha)$ и минимальным составляет 20 %. Форма профиля экспериментального уровня на рис. 9 соответствует форме уровня расчетного сигнала на рис. 6.

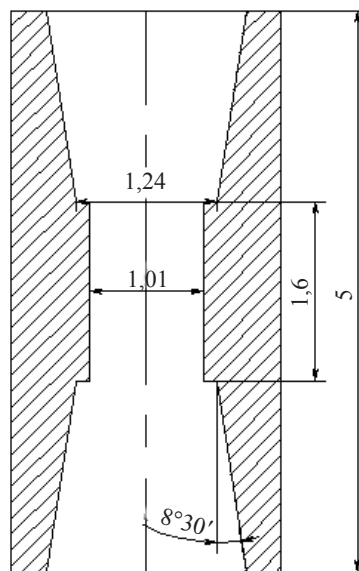


Рис. 7. Конструкция пинхола.

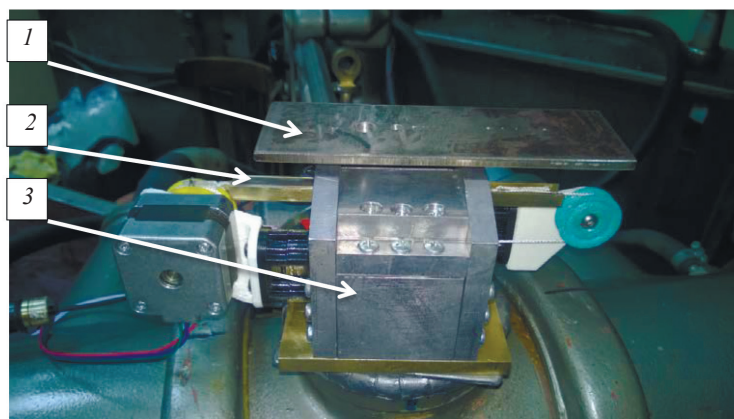


Рис. 8. Общий вид коллимационной системы:

1 — стальная пластинка; 2 — первичный коллиматор (пинхол); 3 — коллимационная система.

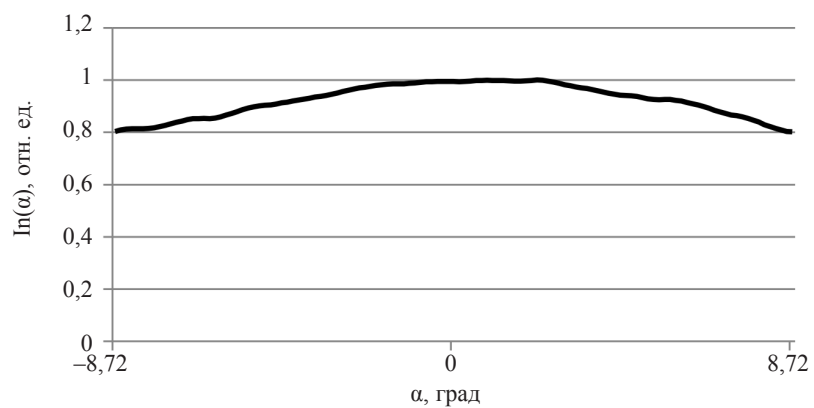


Рис. 9. Экспериментальные данные профиля стальной пластинки.

ВЫВОДЫ

1. Величина поперечного размера рабочего пучка для углов от 0 до $8,72^\circ$ изменяется не более чем на 15 %, что незначительно влияет на пространственно-статистическую неопределенность.
2. Интенсивность излучения максимальна при угле 0° и минимальна при угле $8,72^\circ$. Разница между максимальным уровнем интенсивности и минимальным составляет не более 11 %, что легко компенсируется аппаратно.
3. Разработанная геометрия пинхола позволяет осуществлять сканирование объекта контроля простым перемещением пинхола перпендикулярно оси рентгеновского пучка от анода трубки в пределах 50 мм при фокусном расстоянии 163 мм.
4. Формы расчетного и экспериментального уровней сигналов сопоставляются между собой. Разница между минимальным и максимальным уровнями расчетного и экспериментального сигналов составляет 9 %.
5. Разработанная методика позволяет проводить расчет параметров пинхола первичного коллиматора КС АКТ для заданной энергии и геометрии контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berecz T., Jenei P., Csóré A., Lábár J., Gubicza J., Szabó P.J. Determination of dislocation density by electron backscatter diffraction and X-ray line profile analysis in ferrous lath martensite // *Materials Characterization*. 2016. V. 113. P. 117—124.
2. 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.
3. 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. 113117.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Shinji Nomura, Kazunori Tejima, Ikuo Wakamoto. Scattered x-ray type defect detector and x-ray detector. JP. Patent No. 2001208705A. 03 August 2001.
8. Kapranov B.I., Mudrov M.A. Contribution of Compton scattering in problems associated with measuring the surface density of radiation protection coatings // *J. of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2016. V. 671. No. 1. P. 012038.
9. Kapranov B.I., Vavilova G.V., Volchkova A.V., Kuznetsova I.S. Mathematical modeling of tomographic scanning of cylindrically shaped test objects // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2018. V. 363. No. 1. P. 012015.
10. Капранов Б.И., Короткова И.А., Чахлов В.Л., Филинов В.Н., Маклашевский В.Я. Анализ систем сканирования в комптоновской томографии. Возможные области применения // *Изв. Томского политех. ун-та*. 2003. Т. 306. № 1. С. 122—127.
11. 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.
12. Cui S., Nimmagadda J.K., Baciak J.E. Backscatter Radiography as a Non-Destructive Examination Tool for Concrete Structures / *2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*. IEEE, 2017. P. 1—6.