

ИЗМЕРЕНИЕ НЕСООСНОСТИ ДВУХ ЦИЛИНДРОВ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОГРАФИИ

MISALIGNMENT MEASURING WITH ROENTGENOGRAPHY METHOD FOR TWO CYLINDERS

А. Н. Субботин, В. И. Потанин, А. В. Баландин, К. Г. Плужан
A. N. Subbotin, V. I. Potarin, A. V. Balandin, K. G. Pluzyan

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
 пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия
 Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

В работе предложен способ вычисления геометрических характеристик тел простой формы на основе их рентгенографических проекций. Для измерений используется привлечение фактической информации о редакции измерений и пространственного аналитического представления геометрии объекта исследований.

A method of calculating geometric characteristics of simple-shape objects on the base of their roentgenographic projections is presented. The application of actual information on measurements editing and spatial analytical representation of the investigated object geometry is used for measurements.

Работа выполнена для целей расчета геометрических размеров цилиндрической модели на основе её рентгенографической проекции.

В эксперименте напряжение рентгеновской трубки составляло 225 кВ, ток трубки 11 мА. Размер фокусного пятна – 2 мм.

Спектр РИ установки для граничной энергии 225 кэВ рассчитан методом Монте-Карло [1].

Схематично геометрия измерений приведена на рис. 2.

Постановка измерений

В качестве модели выбран стальной цилиндр с внутренним цилиндрическим отверстием. Ось цилиндрического отверстия смещена относительно оси всей модели на 0,5 мм. Модель выточена на координатно-расточном станке с погрешностью изготовления ± 10 мкм.

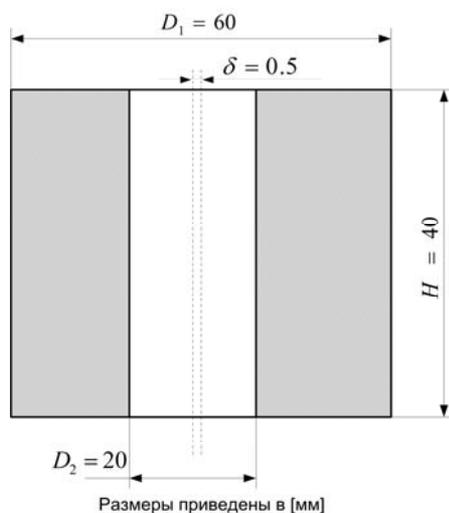


Рис. 1. Разрез цилиндрической модели

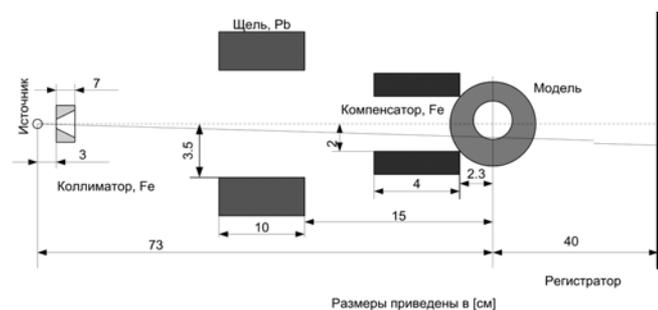


Рис. 2. Схема измерений

В выбранной геометрии масштаб проецирования изображения равен $(73+40)/73 \approx 1,5$. Для просвечивания модели формировался пучок рентгеновского излучения с помощью конического Fe коллиматора и Pb щели. В качестве регистратора использовалась рентгеновская пленка РТ-1 производства «Тасма» (Россия) совместно с усиливающим экраном типа ВП-2. Сцинтилляционный экран представляет собой порошок CaWO_4 толщиной 0,5 мм, нанесенный на картонную подложку.

Результаты измерений

Полученная рентгенограмма после обработки на сканере Epson 4870 с разрешением 1200 пикселей/дюйм приведена на рис. 3 (а).

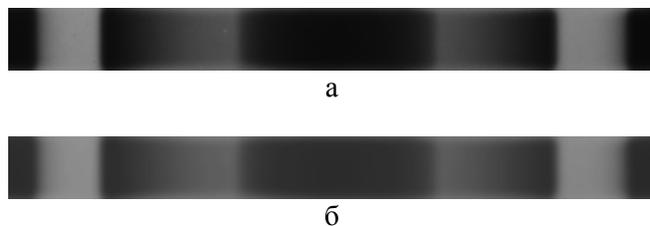


Рис. 3. Экспериментальная рентгенограмма модели со смещением 500 мкм – а, расчетная рентгенограмма (GNUOctave [2]) модели – б

Рентгенограмма переводилась в единицы плотностипочернения посредством выражения:

$$D = \log_{10} \left(\frac{2^{16}}{N_{sc}} \right),$$

где N_{sc} – число отсчетов сканера; 2^{16} – максимальное число отсчетов в отсутствие «почернения» для 16 градаций оттенков серого цвета.

Результаты измерений (координаты осей цилиндров) получаются из сравнения расчетной интенсивности излучения на регистраторе F_{cal} и экспериментально полученных интенсивностей F_{exp} . Для перевода экспериментальных значений D в значения интенсивности излучения необходимо знание характеристической кривой регистратора. В нашем эксперименте излучение зарегистрировано в линейной области детектора и характеристическая кривая не потребовалась.

Расчет интенсивности излучения на регистраторе проводился для точечного источника в «узкой» геометрии, когда излучение в каждом слое поглотителя ослабляется экспоненциально. Влияние конечного размера источника моделировалось сверткой матрицы интенсивности с функцией источника размером 2x2 мм с равномерным распределением яркостей. Функция размытия детектором определяется расчетным методом Монте-Карло для толщины чувствительного элемента CaWO_3 200 мкм.

При описании цилиндра полагалось, что ось цилиндра параллельна оси Z в декартовых координатах (см. рис. 4). Пространство между цилиндрическими поверхностями заполнено материалом.

Каждая из цилиндрических поверхностей с радиусом R описывается уравнением:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \quad (1)$$

где x_0 и y_0 – координаты пересечения оси цилиндра с плоскостью (x, y) .

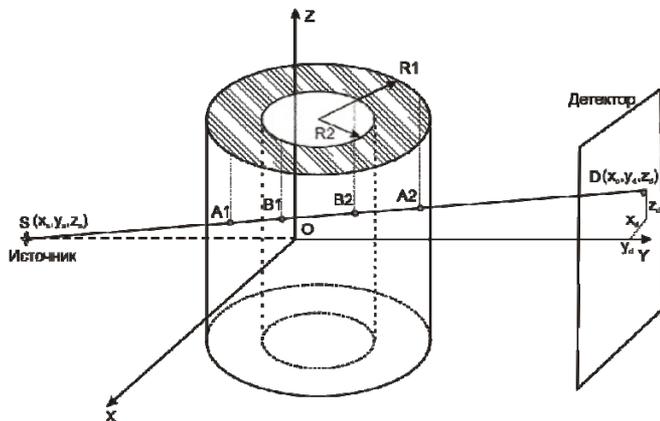


Рис. 4. Положение цилиндра с отверстием в декартовой системе координат

Алгоритм получения рентгеновской проекции детали на плоскость для точечного источника можно кратко описать следующим образом. По двум точкам, положение источника (x_s, y_s, z_s) и точкой на плоскости приемной поверхности регистратора (x_d, y_d, z_d) , записывается уравнение прямой, проходящей через эти точки:

$$\frac{x - x_d}{x_s - x_d} = \frac{y - y_d}{y_s - y_d} = \frac{z - z_d}{z_s - z_d} \quad (3)$$

Находятся точки пересечения этой прямой со всеми поверхностями детали, и по ним определяются толщины поглотителей РИ в детали на пути от источника до приемника. Тогда флюенс на детекторе F_{cal} для точечного источника с единичным выходом РИ можно получить по формуле:

$$F_{cal} = \frac{1}{4\pi \cdot L^2} \cdot e^{-\sum \mu_i \cdot h_i} \quad (4)$$

где L – расстояние по лучу от источника до приемника, см;

μ – линейный коэффициент ослабления в веществе, см^{-1} ;

h – длина участка детали с поглощением РИ, см.

Суммирование ведется по всем отрезкам поглотителей h_i , найденных из точек пресечения луча из источника с поверхностями детали.

Для иллюстрации на рис. 4 изображен один из лучей РИ. Цилиндрическая поверхность с радиу-

сом R1 пересекается лучом SD в точках A1 и A2, поверхность с радиусом R2 пересекается в точках B1 и B2. Луч можно разбить на участки с поглощением РИ в детали и без ослабления. Это, соответственно, отрезки A1B1+B2A2 и SA1+V1B2+A2D.

Выше описанный алгоритм расчета реализован в программе GNUOctave [2]. Сравнивая экспериментальную и расчетную рентгенограммы, можно получить оптимальные значения положения осей. Для этого меняется расчетное положение цилиндров и находится минимальное значение невязки расчетной и экспериментальной матриц полученных рентгенограмм. Таким образом, число свободных параметров для решения данной задачи восстановления равно 6 – по 3 координаты для осей каждого из цилиндров.

Была обработана рентгенограмма, изображенная на рис. 3 (а). В табл. 1 приведены результаты расчетов.

Таблица 1

Экспериментально полученные и фактические параметры цилиндрической модели

Параметр	Внешний радиус, см	Внутренний радиус, см	Смещение оси внешнего цилиндра, мкм	Смещение оси внутреннего цилиндра, мкм	Несоосность, мкм
Фактически	3	1	0	500	500
Экспериментально	3,01 4	0,99 7	-22	549	527

Расчет проводился в системе координат, выбранной по экспериментальной рентгенограмме «вручную» по приблизительному положению центра внутреннего цилиндра. Как видно из таблицы, получено удовлетворительное согласие между фактическими и экспериментально полученными параметрами цилиндрической модели.

На рис. 5 приведены сечения экспериментальной и расчетной рентгенограммы для найденных параметров модели.

Сравнение расчета и эксперимента проводилось в двух интервалах рентгенограммы: область края внешнего цилиндра (20–50) пикселей + (395–425) пикселей; область внутреннего цилиндра (150–290) пикселей. Таким образом, выделяется область интересов для данной расчетной модели,

включающая в себя только границы цилиндрических поверхностей. Исключены области сформированные компенсаторами, так как засветка в этой области практически полностью определяется ими, а не цилиндрической моделью.

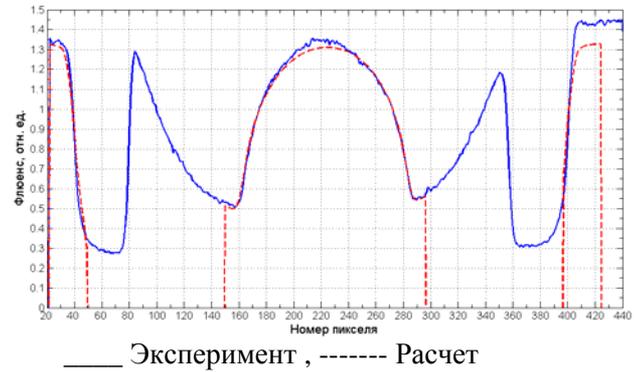


Рис. 5. Сечение расчетной и экспериментальной рентгенограмм по оси Y

Наибольшее различие в расчетной и экспериментальной рентгенограммах наблюдается в области прохождения излучения через компенсатор – (410–420) пикселей и, в районе центра внутреннего цилиндра – (200–240) пикселей. Наиболее вероятная причина расхождения – неучтенный вклад рассеянного излучения в этих областях.

Выводы

В работе выполнен расчет несоосности цилиндрической стальной модели. Конкретная величина погрешности может быть указана после тщательного анализа всех её составляющих. Она, частично, может быть получена из ковариационной матрицы.

Список литературы

1. В. Н. Васильев, Л. А. Лебедев, В. П. Сидорин, Р. В. Ставицкий. Спектры излучения рентгеновских установок. Москва, Энергоатомиздат, 1990. 144 с.
2. Е. Р. Алексеев, О. В. Чеснокова. Введение в Octave для инженеров и математиков. Москва, ALT Linux, 2012. 368 с.