

## ВЫБОР СХЕМ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С СИММЕТРИЕЙ

*Чинь Ван Бак, С.П. Осипов*

*Томский политехнический университет, г. Томск  
Научный руководитель: Осипов С.П., к.т.н, ведущий научный сотрудник  
Российско-китайской научной лаборатории радиационного контроля и  
досмотра ИНК ТПУ*

В связи с развитием средств вычислительной техники, источников рентгеновского излучения и соответствующих систем детектирования в последнее время бурно развивается трехмерная томография, которая отличается от двумерной реализации РВТ, принято считать, более высокой производительностью. Применение томографии для исследования структуры протяженных объектов с симметрией, классическим примером которых являются цилиндрические тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ) [1–4], продолжает оставаться актуальной задачей. Совершенствование конструкций ТВЭЛ обуславливает необходимость проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований. На первом этапе необходимо определиться со схемой получения исходной информации для РВТ, то есть со схемой сканирования. Схема сканирования существенно влияет на производительность и качество получаемых трехмерных изображений внутренней структуры.

Основные схемы сканирования и методики расчета времени контроля

Обсудим наиболее распространённые схемы сканирования протяженных изделий на примере цилиндрических объектов контроля (ОК) диаметром  $H$  и длиной  $L$ , см. рис. 1–4. Производительность обратно пропорциональна общему времени контроля  $T$  объекта. Для всех схем время  $T$  определяется временем нахождения систем детекторов в одной позиции  $t_0$ , временем перемещения системы источник – детекторов из одной позиции в другую  $\Delta t$ , шагом по углу вращения  $\Delta\theta$  и количеством временных интервалов  $k$ , необходимых для калибровки по «черному» и по «белому».

*Схема 1.* На рис. 1 изображена схема, которая характерна для классического метода РВТ. В этой схеме набор необходимых исходных одномерных проекций формируется в результате дискретного (непрерывного) вращения объекта относительно некоторой оси. После получения проекций для одного слоя объект перемещается на величину шага сканирования  $\Delta x$  и процесс повторяется. Шаг сканирования  $\Delta x$  не должен

превышать размер размера чувствительного объема детектора в направлении сканирования  $d$ .

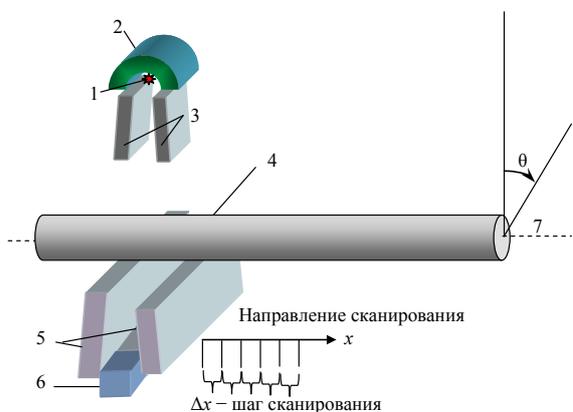


Рис. 1. Непрерывное (дискретное) вращение с дискретным линейным перемещением: 1 – источник излучения; 2 – радиационная защита источника; 3 – щелевой коллиматор источника; ОК; 5 – щелевой коллиматор детектора; 6 – линейка детекторов; 7 – ось вращения ОК

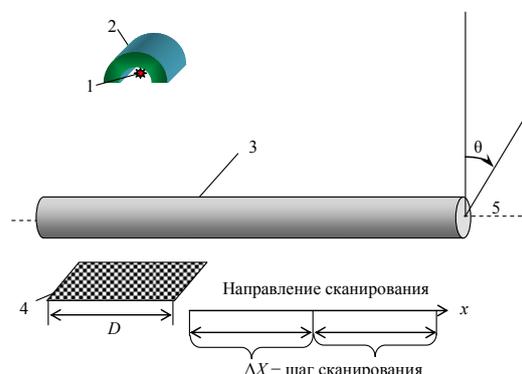


Рис. 2. Непрерывное (дискретное) вращение с дискретным линейным перемещением с формированием двухмерных проекций: 1 – источник излучения; 2 – радиационная защита источника; 3 – ОК; 4 – ось вращения ОК; 5 – панель (матрица) детекторов

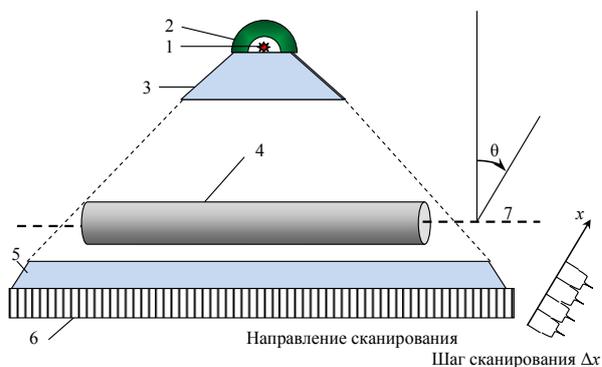


Рис. 3. Непрерывное (дискретное) линейное перемещение с дискретным вращением с формированием одномерных проекций: 1 – источник излучения; 2 – радиационная защита источника; 3 – коллиматор источника; ОК; 5 – коллиматор детектора; 6 – линейка детекторов; 7 – ось вращения ОК

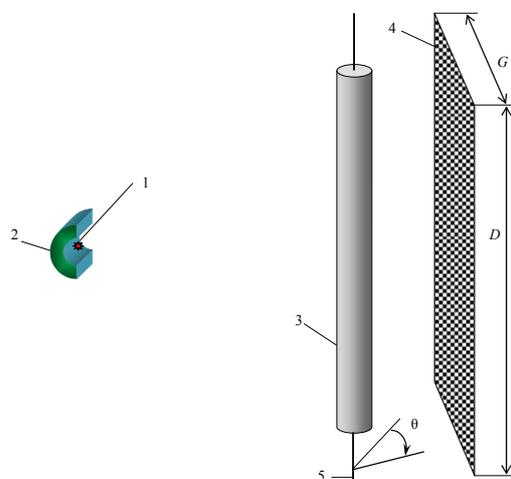


Рис. 4. Непрерывное (дискретное) вращение с формированием двухмерных проекций: 1 – источник излучения; 2 – радиационная защита источника; 3 – ОК; 4 – панель (матрица) детекторов; 5 – ось вращения ОК

Выражение для вычисления общего времени контроля  $T$  для первой схемы имеет вид

$$T = t_0 \cdot \frac{180}{\Delta\theta} \cdot \frac{L}{\Delta x} + \Delta t \frac{L}{\Delta x} + t_0 \cdot k. \quad (1)$$

*Схема 2.* Отличие схемы 2 (рис. 2) от схемы 1 заключается в том, что шаг дискретного линейного перемещения после формирования одного набора двумерных проекций  $\Delta X$  сопоставляется не с размером единичного детектора  $d$ , а с размером всей системы детектирования в направлении сканирования  $D$  ( $\Delta X \leq D$ ).

Время  $T$  оценивается по формуле

$$T = t_0 \cdot \frac{180}{\Delta\theta} \cdot \frac{L}{\Delta X} + \Delta t \frac{L}{\Delta X} + t_0 \cdot k. \quad (2)$$

*Схема 3.* В указанной схеме (рис. 3) на первом этапе формируется теневое изображение ОК в результате дискретного или непрерывного линейного перемещения объекта контроля относительно системы источник излучения – линейка детекторов. Затем объект контроля поворачивается на заданный угол и операции формирования двумерных проекций повторяются необходимое число раз.

Выражение для оценки времени  $T$  для схемы 3 имеет вид

$$T = t_0 \cdot \frac{180}{\Delta\theta} \cdot \frac{D_0}{\Delta x} + \Delta t \frac{180}{\Delta\theta} + t_0 \cdot k, \quad (3)$$

здесь  $D_0$  – поперечный размер тени объекта контроля.

*Схема 4.* Следующая схема отличается от схемы 3 регистратором рентгеновского излучения, в качестве которого выступает панельный детектор либо матрица радиометрических детекторов (рис. 4). В этой схеме тень от объекта контроля полностью помещается на лобовой поверхности системы детектирования, что позволяет исключить линейные перемещения объекта, а оставить лишь вращательное.

Формула для вычисления времени сканирования  $T$  выглядит следующим образом

$$T = t_0 \cdot \frac{180}{\Delta\theta} + \Delta t \frac{180}{\Delta\theta} + t_0 \cdot k. \quad (4)$$

### Пример расчета времени сканирования

Продemonстрируем возможности применения предложенной выше методики сравнения схем сканирования для цилиндрического объекта с максимальной массовой толщиной  $4 \text{ г/см}^2$ , эффективный атомный номер  $Z_{\text{eff}} \approx 15$ . Длина объекта 1300 мм. Поперечный размер единичного детектора  $0,1 \times 0,1 \text{ мм}^2$ . Угол  $\theta = 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ , максимальная энергия ис-

точника рентгеновского излучения –  $E_{\max} = 250$  кэВ. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

*Время сканирования  $T$ , отн. ед.*

$\theta, ^\circ$	Схема сканирования	$T$
40	1	1
	2	0,84
	3	30
	4	1,459
60	1	1
	2	0,039
	3	20,57
	4	0,665
80	1	1
	2	0,019
	3	13,419
	4	0,328

**Выводы:** Из анализа данных можно сделать достаточно неожиданный вывод: наибольшей эффективностью по производительности обладает вторая схема сканирования. Наименее эффективна третья схема. Причиной данного факта является необходимость сохранения поля облучения, приводящая к увеличению расстояния от источника излучения до объекта контроля. С увеличением угла  $\theta$  изменяется и эффективность схем сканирования. Третья схема и с увеличением угла остается самой малоэффективной. Вопрос выбора между второй и четвертой схемами сканирования остается за потребителем.

#### Список информационных источников

1. Yang M., Liu Q., Zhao H., Li Z., Liu B., Meng F. Automatic X – ray inspection for escaped coated particles in spherical fuel elements of high temperature gas-cooled reactor // *Energy*. – 2014. – Vol. 68. – P. 385–398.
2. Caruso S., Jatuff F. Design, development and utilisation of a tomography station for  $\gamma$ -ray emission and transmission analyses of light water reactor spent fuel rods // *Progress in Nuclear Energy*. – 2014. – Vol. 72. – P. 49–54.
3. Parker H.M., Joyce M.J. The use of ionising radiation to image nuclear fuel // *Progress in Nuclear Energy*. – 2015. – Vol. 85. – P. 297–318.
4. Ishimi, A., Katsuyama, K., Nakamura, H., Asaga, T., Furuya, H. Radial density distribution in irradiated FBR MOX fuel pellets // *Nuclear Technology*. – 2015. – Vol. 189. – № 3. – P. 312–317.