

УДК 620.179.152.1

**Оценка точности геометрических измерений сферических объектов  
методом рентгеновской томографии**

Линъюэ Цзи, А.В. Батранин

Научный руководитель: доцент, к.т.н. А.В. Батранин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [batranin@tpu.ru](mailto:batranin@tpu.ru)

**Accuracy assessment of geometric measurements  
of spherical objects using X-ray tomography**

Lingyue Ji, A. V. Batranin

Scientific Supervisor: Assoc. Prof., PhD., A. V. Batranin

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [batranin@tpu.ru](mailto:batranin@tpu.ru)

**Abstract.** *In this work we measured the diameter of the glass spheres by both micrometer and X-ray tomography to derive the error produced by computed tomography in measuring the diameter. The 3d data of glass spheres were analyzed using the CTAnalyzer software. The results of the study help to assess the accuracy of the computed tomography geometry measurement.*

**Key words:** *computed tomography, image analysis, binary image, measure error.*

**Введение**

В настоящее время рентгеновская томография широко применяется в разнообразных сферах научной и практической деятельности. Она успешно задействована как в области медицины, так и в промышленности для неразрушающего контроля [1–3]. Проводя процедуру сегментации из томографических изображений, получают цифровые объекты, которые обладают измеримыми геометрическими характеристиками. В данной работе приводятся результаты измерений диаметров стеклянных шариков, выбранных в качестве тестовых объектов, которые получены методом рентгеновской томографии. Приведено сравнение с измерениями диаметров с помощью микрометра. Целью данной работы является оценка точности геометрических измерений методом рентгеновской томографии высокого разрешения.

**Экспериментальная часть**

Томография выполнялась на экспериментальной установке Орел-МТ, разработанной в ТПУ. Объектом исследования был стеклянные шарики малого размера. При томографическом сканировании образцы помещались внутрь пенополистирола с целью их фиксации в процессе сканирования [1]. Использовались три режима съемки с разным напряжением на рентгеновском аппарате:  $U = 60$  кВ, 100 кВ, 130 кВ при токе 35 мкА. Объект поворачивался на  $360^\circ$  с шагом  $0,4^\circ$ , для получения 900 проекционных снимков. Геометрическое увеличение было одинаковым для всех режимов, и было выбрано таким, чтобы размер пикселя изображений был равен 10 мкм. В результате томографической реконструкции были получены 8-битные индексированные изображения – томограммы [2]. Индексом в диапазоне 0–255 кодируется плотность материала: от черного, равного нулю, что соответствует воздуху, до белого, равного 255, что соответствует максимальной плотности объекта исследования. После получения набора томограмм их импортируют в программное обеспечение CTAnalyzer для сегментации и количественного анализа. Сегментация представляет собой процедуру выделения областей изображений, индекс которых превышает некоторое пороговое значение. Изображения становятся бинарными: фон, как правило,

кодируется нулем, а выделенный объект – единицей. Дополнительно была выполнена визуализация методом объемного рендеринга объекта исследования в программе CTvox [3] (см. рисунок 1).

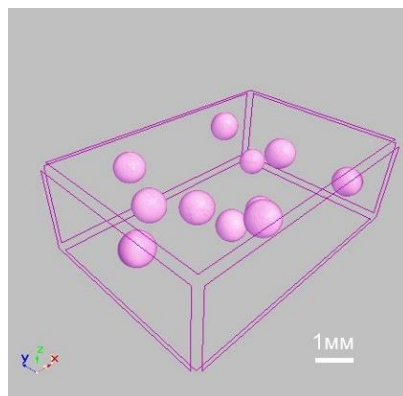


Рис. 1. Визуализация объекта исследования, стеклянных шариков, в программе CTvox

### Результаты

Измерение диаметров 15 стеклянных шариков, выбранных случайно из партии, состоящей из примерно 500 шариков, производилось микрометром с электронной индикацией, с точностью 1 мкм. По данным измерений микрометром средний диаметр шариков составил  $1.107 \pm 0.014$  мм.

Для проведения томографии измеренные шарики размещали в небольшом кусочке пенополистирола таким образом, чтобы между ними было некоторое расстояние. Это делалось, чтобы области контакта между отдельными шариками не возникало, так как наличие физического контакта очень усложняет расчет. Разместить компактно удалось 11 шариков из 15, что сузило выборку и увеличило ошибку среднего.

Мы хотели изучить, как режим томографии влияет на ошибку измерения средних значений. Поэтому томография была проведена на трех режимах, при разных значениях ускоряющего напряжения. Сегментация томограмм шариков проводилась в автоматическом режиме методом Оцу, предусмотренном в программе CTAnalyzer. Значения порога сегментации при этом варьировались, в виду различий в режиме томографической съемки. В процессе измерений выяснилось, что автоматическая сегментация дает значительную ошибку, поэтому для всех образцов повторно был выбран порог сегментации вручную, с визуальным контролем результата сегментации.

В программе, после сегментации, можно получать довольно широкий список численных значений разных геометрических и морфологических параметров. Были выбраны те, которые имеют отношение к вычислению диаметров изучаемых шариков. Был вычислен объем, значение диаметра по эквивалентному объему, значение диаметра по эквивалентной площади поверхности сферы, а также степень сферичности объектов. Доверительный интервал среднего рассчитывался по формуле:

$$CI = \pm A \frac{S_n}{\sqrt{n}}$$

где  $A$  – критическое значение  $t$ -распределения для 95 % вероятности по выборке;  $S_n$  – среднеквадратическое отклонение среднего;  $X_n$  – выборочное среднее;  $n$  – размер выборки.

Результаты измерений приведены в таблице №1 и на рисунке 2. Считая измерения, проведенные с помощью микрометра более точными, можно отметить, что измерения путем сегментации томограмм дают завышенные значения, т.е. наблюдается инструментальная погрешность. Это может быть связано с ошибкой измерения размера пикселя исходных изображений. Кроме этого, измерения диаметра методом подгонки по поверхности (surface-equivalent sphere diameter, ESDs) дают большую ошибку, чем измерения диаметра

методом подгонки по объему (volume-equivalent sphere diameter, ESDv). Это ошибка алгоритмов программы CTAnalyzer, на что указывает и то, что параметр «сферичность», связанный с ESDs и ESDv, не равен единице, как можно было ожидать для сферических объектов. Также, использование сегментации в автоматическом режиме приводит к еще большему отклонению от истинного значения. Режим сканирования заметного вклада в рост погрешности не вносит. В целом, расхождения измерений по томограммам с измерениями микрометром не превышают 10 % во всех случаях.

Таблица 1

Результаты измерений диаметров шариков при трех режимах сканирования

Параметр	Значение					
	60		100		130	
Напряжение, кВ	60		100		130	
Порог	108	145	104	145	101	145
Объем, мм <sup>3</sup>	0.794±0.040	0.762±0.041	0.801±0.041	0.764±0.041	0.796±0.041	0.755±0.042
ESDv, мм	1.148±0.020	1.132±0.021	1.152±0.020	1.133±0.021	1.149±0.020	1.129±0.022
ESDs, мм	1.201±0.020	1.183±0.022	1.205±0.020	1.185±0.022	1.221±0.026	1.187±0.022
Сферичность	0.915±0.003	0.917±0.001	0.913±0.003	0.914±0.001	0.887±0.029	0.905±0.003

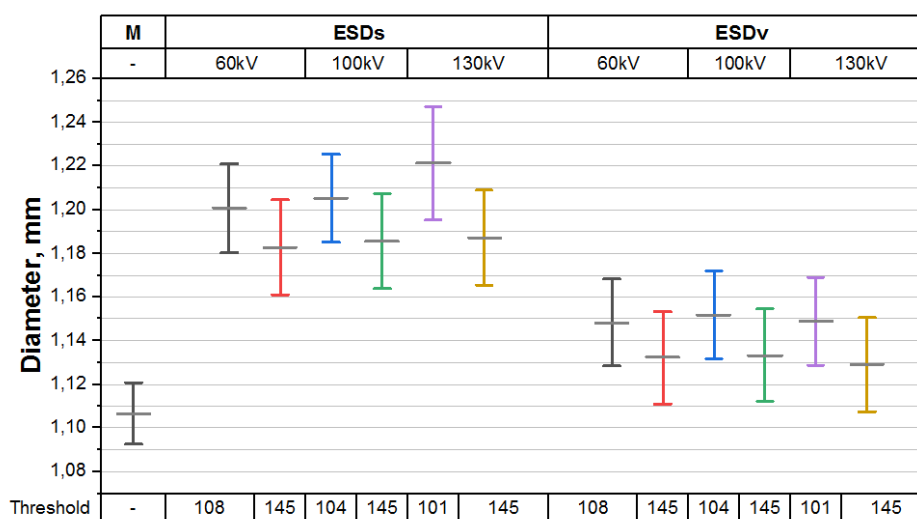


Рис. 2. Результаты измерений диаметров стеклянных шариков (M - микрометр; ESDs - эквивалентный диаметр по объёму; ESDv - эквивалентный диаметр по поверхности)

### Заключение

В данной работе показано, что рентгеновская томография на использованной установке Орел-МТ обеспечивает приемлемую точность геометрических измерений. Сам процесс томографии и используемое программное обеспечение вносят систематическую ошибку в измерения, что необходимо учитывать и, по возможности, корректировать. Полученные результаты мы планируем использовать при проведении измерений объектов со сложной внутренней структурой, например, вспененные металлические сплавы.

### Список литературы

1. Tkac J. et al. Possibilities of analysis of porous structures using industrial computed tomography // Engineering Failure Analysis. – 2022. – V. 137. – P. 106296.
2. Ojeda-Magaña B. et al. Detection and quantification of pore, solid and gravel spaces in CT images of a 3D soil sample // Applied Mathematical Modelling. – 2020. – V. 85. – P. 360–377.
3. Kruth J.P. et al. Computed tomography for dimensional metrology // CIRP annals. – 2011. – V. 60, № 2. – P. 821–842.