

*С. В. Двойнишников<sup>1✉</sup>, В. В. Рахманов<sup>1</sup>, В. А. Павлов<sup>1</sup>, В. О. Зувев<sup>1</sup>*

## **Метод контроля дефектов боковой и торцевой поверхности топливных таблеток**

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: dv.s@mail.ru

**Аннотация.** Топливные таблетки из диоксида урана – ключевой элемент ядерной энергетики, они требуют строгого контроля качества на всех этапах производства. Появление даже незначительных дефектов на боковой или торцевой поверхности таблетки может привести к серьезным последствиям в процессе эксплуатации, включая снижение эффективности, утечки или даже аварийные ситуации. Цель данной работы заключается в разработке метода контроля дефектов боковой и торцевой поверхности топливных таблеток из диоксида урана, обеспечивающего эффективность разбраковки более 99,5% в реальном времени. В результате разработаны и практически реализованы наукоемкие алгоритмы реального времени для обработки и анализа оптических сигналов и изображений, обеспечившие требуемое быстродействие многоканального оптико-электронного информационно измерительного комплекса для контроля урановых топливных таблеток. Технология практически реализована в Линии автоматизированного контроля внешнего вида и геометрических размеров топливных таблеток.

**Ключевые слова:** топливная таблетка, техническое зрение, дефекты внешнего вида

*S. V. Dvoynishnikov<sup>1✉</sup>, V. V. Rakhmanov<sup>1</sup>, V. A. Pavlov<sup>1</sup>, V. O. Zuev<sup>1</sup>*

## **Method of control of defects of the side and end surfaces of fuel pellets**

<sup>1</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: dv.s@mail.ru

**Abstract.** Fuel pellets made of uranium dioxide are a key element of nuclear power, requiring strict quality control at all stages of production. The appearance of even minor defects on the side or end surface of a pellet can lead to serious consequences during operation, including reduced efficiency, leaks or even emergency situations. The purpose of this work is to develop a method for monitoring defects on the side and end surfaces of fuel pellets made of uranium dioxide, ensuring a rejection efficiency of more than 99.5% in real time. As a result, science-intensive real-time algorithms for processing and analyzing optical signals and images have been developed and practically implemented, ensuring the required speed of a multichannel optical-electronic information-measuring complex for monitoring uranium fuel pellets. The technology has been practically implemented in the Line for automated monitoring of the appearance and geometric dimensions of fuel pellets.

**Keywords:** fuel pellet, machine vision, defects in appearance

### ***Введение***

Топливные таблетки из диоксида урана – ключевой элемент ядерной энергетики, они требуют строгого контроля качества на всех этапах производства.

Появление даже незначительных дефектов на боковой или торцевой поверхности таблетки может привести к серьезным последствиям в процессе эксплуатации, включая снижение эффективности, утечки или даже аварийные ситуации [1].

В последние десятилетия объемы производства топливных таблеток значительно возросли, что обусловлено растущими потребностями в устойчивых источниках энергии и активным развитием новых технологий. Это также поставило перед производителями новые вызовы в области обеспечения качества выпускаемых топливных таблеток. Научные исследования и разработки в области контроля дефектов становятся особенно актуальными, поскольку выявление и устранение проблем на ранних стадиях позволяет минимизировать риски и снизить затраты на ремонт и обслуживание энергетической установки [2-3].

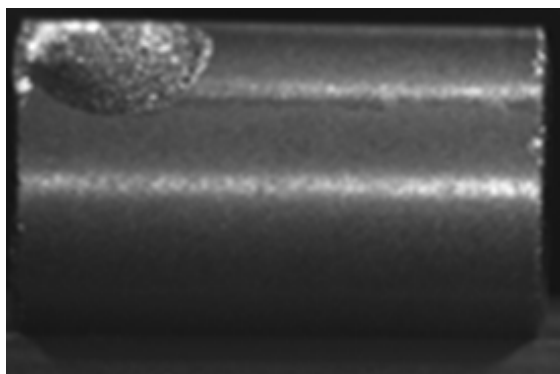
Дефекты внешнего вида таблеток могут быть в виде сколов, трещин на поверхности или дефекты механической обработки таблетки [4]. Существующие системы контроля дефектов внешнего вида таблеток имеют либо недостаточно высокую эффективность, либо не обеспечивают контроль всей боковой и торцевой поверхности таблетки, что может привести к попаданию таблетки с дефектами в годную продукцию.

Цель данной работы заключается в разработке метода контроля дефектов боковой и торцевой поверхностей топливных таблеток из диоксида урана, обеспечивающего эффективность разбраковки более 99,5% в реальном времени.

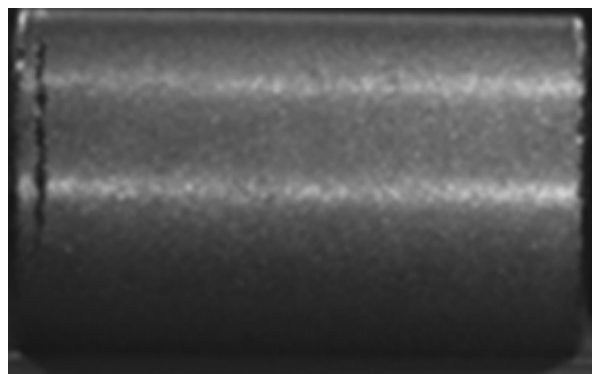
### ***Описание метода контроля***

Разработаны комплексные методы диагностики внешнего вида и геометрических параметров, предусматривающие создание измерительного комплекса, состоящего из 3 модулей. 1-й и 3-й выполняют поиск дефектов на боковой и торцевой поверхности, 2-й измеряет геометрию таблетки. Для формирования изображений используется пространственно-модулированное синхронное монохроматическое излучение и узкополосная оптическая фильтрация. Особенность данного комплекса заключается в механике движения таблеток. Транспортировка реализована таким образом, чтобы таблетка при перемещении от 1-го к 3-му узлу разворачивалась относительно оси на 180 градусов. Это обеспечивает реализацию контроля всей боковой поверхности таблетки.

Контроль боковой поверхности (рис. 1) выполнен на основе анализа двумерного распределения интенсивности и локальной дисперсии на изображении таблетки, поиск дефектов и их многопараметрическая фильтрация с использованием алгоритмов искусственного интеллекта на основе формальных критериев, определяемых заказчиком.



а)



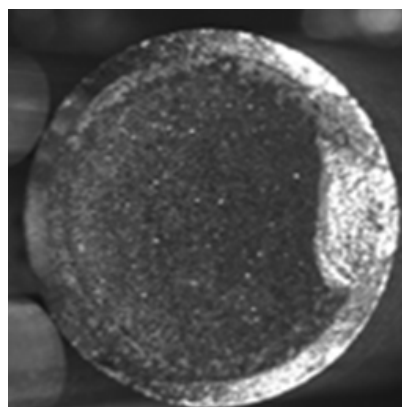
б)

Рис.1. Примеры изображений боковой поверхности топливной таблетки с дефектом: а) таблетка со сколом; б) таблетка с трещиной

Контроль торцевой поверхности выполняется на основе анализа распределения интенсивности и дисперсии интенсивности на радиальном сегменте. Такой подход позволяет не анализировать изображение маркировки таблетки, нанесенное на один из торцов (рис. 2).



а)



б)

Рис.1. Примеры изображений торцевой поверхности топливной таблетки с дефектом: а) торец с маркировкой; б) торец без маркировки

Алгоритм калибровки включает несколько этапов. На первом этапе формируется распределение интенсивности и дисперсии интенсивности поверхности таблетки без дефектов. На втором этапе калибровки выполняется поиск порогового критерия принятия решения о дефектности таблетки на основе статистического анализа экспериментальных данных.

### ***Практическая реализация***

Выполнена практическая реализация предложенных методов контроля внешнего вида топливных таблеток в составе линии автоматизированного контроля внешнего вида и геометрических размеров топливных таблеток. Произво-

длительность линии более 3 таблеток в секунду. Погрешность измерения диаметра менее 3 мкм. Требуемая достоверность контроля более 99,5%.

Выполнена метрологическая аттестация созданной линии контроля таблеток. В ходе аттестации проанализировано почти 30000 таблеток. Установлено, что показатель достоверности визуального контроля топливных таблеток 99,73%.

### ***Заключение***

Разработаны методы оптического контроля дефектов поверхности урановых топливных таблеток на основе активной структурированной засветки, многокурсовой синхронной регистрации изображений и комплексного компьютерного многопараметрического анализа изображений. Разработаны и практически реализованы наукоемкие алгоритмы реального времени для обработки и анализа оптических сигналов и изображений, обеспечившие требуемое быстродействие многоканального оптико-электронного информационно измерительного комплекса для контроля урановых топливных таблеток. Технология практически реализована в Линии автоматизированного контроля внешнего вида и геометрических размеров топливных таблеток. Линия автоматизированного контроля внешнего вида и геометрических размеров топливных таблеток принята в промышленную эксплуатацию в цехе по производству урановых таблеток АО «УМЗ», г. Усть-Каменогорск.

### ***Благодарности***

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головнин И.С., Горский В.В. Казеннов Ю.И., Меньшикова Т.С., Никулина А.В., Романеев В.В. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн. 1. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
2. Финогенов Л.В., Белобородов А.В., Ладыгин В.И., Чугуй Ю.В., Загоруйко Н.Г., Гуляевский С.Е., Шульман Ю.С., Лавренюк П.И., Пименов Ю.В. Оптико-электронная система автоматического контроля внешнего вида топливных таблеток // Дефектоскопия. 2007. – № 10. – С. 68–79.
3. Власов Е.В., Белобородов А.В., Завьялов П.С., Сырецкий Д.Г. Контроль внешнего вида торцов топливных таблеток в условиях конвейерного производства // Дефектоскопия. – 2023. – №7. – С. 33–43.
4. Бакакин Г.В., Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Павлов В.А. Способ изготовления и контроля качества имитаторов топливных урановых таблеток для настройки системы технического зрения контроля дефектов поверхности // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – №8 (122). – URL: <https://research-journal.org/archive/8-122-2022-august/10.23670/IRJ.2022.122.17>.

© С. В. Двойнишников, В. В. Рахманов, В. А. Павлов, В. О. Зуев, 2025