

УДК 621.039

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИМПУЛЬСНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ МИКРООБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

© Т. Н. Байбикова¹, Е. П. Доморацкий²

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

²Московский финансово-юридический университет,
115191, Москва, ул. Серпуховский вал, 17, корп. 1
E-mail: tbaibicova@hse.ru
Domorackiy.E@mfa.ru

Рассмотрены созданные и апробированные методы динамического контроля микрообъектов (МО) ядерного топлива, основанные на реконструкции пространственных геометрических характеристик МО по контурам двумерных теневых проекций. Для описания размеров МО выбраны габаритные размеры и средний проектированный диаметр, для описания их формы используется коэффициент несферичности, определяемый как отношение максимального габаритного размера объекта к минимальному. Приведены метрологические характеристики методов контроля.

Ключевые слова: импульсная оптическая томография, микрообъект, способ реконструкции, геометрические характеристики, проекционное изображение, базовые признаки изображения, имитационное моделирование, метрологические характеристики.

DOI: 10.15372/AUT20210305

Введение. В настоящее время с развитием новых материалов, изделий и технологий возрастают требования к качеству контроля геометрических размеров и формы гранулоподобных объектов, имеющих различную физическую природу, в том числе микрообъектов (МО) ядерного топлива высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР) [1]. При массовом производстве топливных МО необходимо обеспечить быстроедействие не менее $20\text{--}100\text{ с}^{-1}$ при микронной точности и высокой (до 0,95) достоверности многомерных (объёмных) неразрушающих измерений [2]. Также для классификации и сортировки МО непосредственно в процессе их производства (в режиме реального времени) контроль должен быть динамическим, а его результаты для их партии и каждого отдельного МО — независимыми. Существующие традиционные методы контроля геометрических свойств объектов [3, 4] не удовлетворяют указанным требованиям.

Вследствие этого для развития теории и практики контроля геометрических характеристик МО ядерного топлива возникает необходимость создания новых методов, обеспечивающих одновременно автоматический быстроедействующий бесконтактный динамический дифференциальный объёмный и достоверный контроль как геометрических размеров, так и формы МО в реальном масштабе времени. Такой вид контроля позволит не только целенаправленно управлять качеством продукции, но и формировать её новые заданные свойства.

Разработка методов проекционного контроля заключается в решении следующих задач: выбор пространственных геометрических характеристик для определения размеров и формы объекта, выбор и определение оптимального вида и представительного числа (количества) проекционных изображений объекта, определение и выбор оптимальной пространственной ориентировки (ракурсов) проекционных изображений объекта, выбор и определение числовых значений оптимальных базовых геометрических признаков каждого проекционного изображения (прямая задача импульсной оптической томографии), разработка

математических моделей реконструкции геометрических характеристик трёхмерного объекта на основе числовых значений выбранных базовых признаков проекционных изображений (обратная задача импульсной оптической томографии) [5].

Вид первичной информации выбирается с помощью автоматизированной системы имитационного моделирования геометрических характеристик и методов импульсной оптической томографии МО [6].

В результате исследований определено, что наиболее информативным видом первичной информации является триада взаимоортогональных двумерных теневых проекций (или их изображений) [7]. Её сбор с движущихся микроэлементов обеспечивается оптико-электронным способом путём получения и регистрации их неподвижных электронных дискретных проекционных изображений с помощью импульсных источников оптического излучения и позиционно-чувствительных видеодетекторов с памятью, работающих в режиме раздельной записи и считывания информации. Для сокращения информационной избыточности и повышения быстродействия выполняется пространственное дифференцирование импульсных проекционных изображений проекций МО (выделение их контуров).

Численный анализ информативности различных видов первичных данных [7] показывает, что для обеспечения требуемой точности и достоверности дифференциального контроля при однократном считывании информации с триады проекционных двумерных изображений необходимо использовать статистическую стереологическую реконструкцию, в основе которой лежит статистическое соответствие (представительность) размеров и формы объекта контроля и его проекционных базовых элементов. Так как осуществить такую реконструкцию МО, имеющего сложную форму, за ограниченное время при быстродействующем контроле не представляется возможным, в основу новых методов контроля вместо статистической реконструкции размеров и формы объекта берётся его ближайшая известная аппроксимация. В качестве такой аппроксимации при контроле эквивалентного диаметра МО выбрана сфера, а при контроле коэффициента несферичности — эллипсоиды вращения и общего вида [8].

Цель данной работы — создание и применение оптимальных методов промышленного контроля элементов ядерного топлива ВТГР. На указанных принципах разработаны следующие оригинальные методы реконструкции (рис. 1).

Метод площадей. Базовыми элементами первичной информации являются площади трёх взаимоортогональных теневых двумерных проекций (S_1, S_2, S_3). Пространственные характеристики сферических объектов определяются в соответствии с формулами

$$D(\text{RS3}) = 2 \left(\frac{1}{3\pi} \sum_{i=1}^3 S_i \right)^{1/2}, \quad K(\text{RS3}) = \left[\frac{\max \{S_1, S_2, S_3\}}{\min \{S_1, S_2, S_3\}} \right]^{1/2},$$

где $i = 1-3$; D — эквивалентный диаметр МО; K — коэффициент несферичности.

Статистический метод. Базовыми элементами первичной информации являются максимальный l_1 и минимальный l_2 габаритные размеры для каждого из N контуров различно ориентированных в пространстве двумерных проекций МО. При этом пространственные характеристики определяются следующим образом:

$$D(\text{LN}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (l_{\max i} + l_{\min i}), \quad K(\text{LN}) = \max \left(\frac{l_{\max i}}{l_{\min i}} \right), \quad i = 1, \dots, N.$$

При $N = 3$ имеем частный случай статистического метода для триады взаимоортогональных теневых проекций — метод выбора $D(\text{WIBR}), K(\text{WIBR})$. Для измерения габаритных размеров контуров дискретных изображений двумерных теневых проекций используется модифицированный метод параллельных касательных [5].

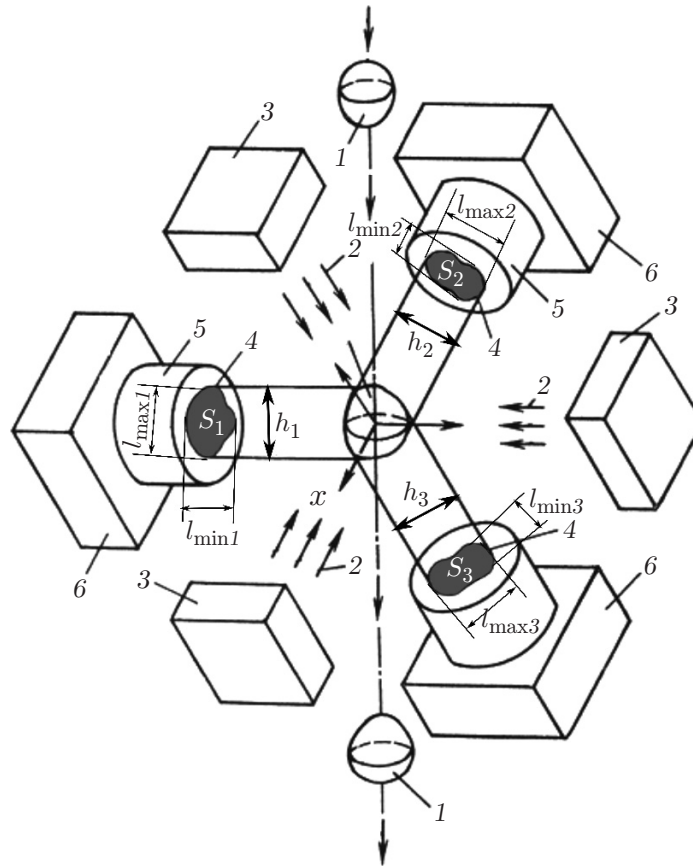


Рис. 1. Динамический контроль размеров и формы МО с реконструкцией по теневым проекциям: 1 — объект контроля, 2 — параллельный пучок оптического излучения, 3 — импульсный источник света, 4 — двумерная теневая проекция, 5 — изображающая оптика, 6 — позиционно-чувствительный детектор

Метод площадей и проекций основан на реконструкции формы МО по базовым признакам в виде площадей двумерных проекций (S_1, S_2, S_3) и взаимоортогональных одномерных проекций (h_1, h_2, h_3) [2]. Для аппроксимации объекта используется эллипсоид общего вида с размерами полуосей A_1, A_2, A_3 .

Пространственные характеристики МО определяются из следующих соотношений:

$$D(\text{RECS}) = \frac{2}{3} \sum_{i=1}^3 A_i, \quad K(\text{RECS}) = \frac{\max \{A_i\}}{\min \{A_i\}}, \quad i = 1-3.$$

Минимаксный метод основан на реконструкции формы МО по базовым характеристикам в виде максимального l_{1i} и минимального l_{2i} габаритных размеров ($i = 1-3$) контуров триады теневых проекций [8]. Пространственные характеристики объекта $D(\text{RECL})$ и $K(\text{RECL})$ определяются, как в предыдущем методе.

Метод обобщённой аппроксимации. Реконструкция осуществляется выбором эллипсоида вращения по точкам касания поверхности объекта с плоскостями, параллельными плоскостям теневых проекций. При этом диаметр объекта определяется из выражения

$$D(\text{APRC}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i + B_i),$$

где A_i и B_i — размеры большой и малой полуосей частного i -го эллипсоида вращения; $N = 34$ (число частных эллипсоидов в обобщённой аппроксимации). Коэффициент несферичности определяется тремя способами [6]:

$$K(\text{APR1}) = \frac{\max \{A_i\}}{\min \{A_i\}}, \quad K(\text{APR2}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{B_i},$$

$$K(\text{APR3}) = \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{\sum_{i=1}^N B_i}, \quad N = 34.$$

Исследование методов реконструкции. Для определения быстродействия, точности и достоверности разработанных методов реконструкции и методов контроля на их основе, а также получения численной оценки их предельных возможностей проведены сравнительные статистические исследования. При этом применён метод имитационного моделирования [6].

Методика исследования заключается в следующем. Задаются начальные данные эталонного эллипсоида общего вида (значение максимальной полуоси A_1 , диаметр D_0 , фактор формы K_0), доверительные интервалы ($2\Delta D_{\text{и}}$, $2\Delta K_{\text{и}}$), число реализаций процесса (N). Затем по равномерному случайному закону задаются текущие пространственные ориентировки (углы Эйлера) эталонного эллипсоида. После этого формируются массивы координат точек дискретных контуров триады двумерных теневых проекций. Далее определяются базовые признаки первичной информации выбранных методов контроля [6], в соответствии с которыми устанавливаются текущие пространственные характеристики D_i и K_i . По найденным значениям задаются абсолютные погрешности контроля ΔD_i , ΔK_i .

Быстродействие каждого метода контроля (среднее время) определяется путём регистрации времени начала и конца обработки информации (при n циклах). Исследования проведены для $A_1 = 25$ –100 дискрет; $\Delta D_{\text{и}} = 0,05$ –0,5 дискрета; $\Delta K_{\text{и}} = 0,01$ –0,035 отн. ед.; $K_0 = 1,025$ –1,3 отн. ед.; $N = 1000$, $n = 10\,000$.

С использованием данной методики определены точность и достоверность как новых методов контроля диаметра МО, так и известного метода контроля МО по площади одной теневой проекции D(RS1).

Результаты проведённых исследований представлены в виде зависимостей методических погрешностей контроля σ_D , σ_K и их доверительных вероятностей P_D , P_K от K . При этом габаритный размер изображения МО $A_1 = 100$ дискрет. Для получения данных зависимостей использован следующий подход. В результате обработки экспериментальных данных получен набор таблиц, содержащих статистические характеристики разработанных методов контроля. В табл. 1 представлены среднеквадратичные отклонения исследуемых методов (для исследования среднего диаметра) для различных факторов формы объекта.

Таблица 1
Среднеквадратичные погрешности среднего диаметра

KFO	WIBR	RS1	RS3	APRC	RECS	RECL
1,3	0,380	4,980	0,240	542,098	0,097	0,216
1,2	0,249	3,380	0,110	591,532	0,163	0,207
1,1	0,208	1,881	0,035	217,543	0,519	0,201
1,025	0,167	0,480	0,015	8,342	0,572	0,185

Среднеквадратичные отклонения из табл. 1 обрабатываются численным методом, определяющим степень и коэффициенты полинома, аппроксимирующего набор данных методом наименьших квадратов.

По найденным коэффициентам аппроксимирующего полинома получают его уравнение (методом регрессионного анализа). По табл. 1 получены уравнения

$$y_1 = 2,329x^2 - 4,677x + 2,520 \text{ (WIBR)},$$

$$y_2 = -5,693x^2 + 29,421x - 23,665 \text{ (RS1)},$$

$$y_3 = 2,755x^2 - 5,587x + 2,847 \text{ (RS3)},$$

$$y_4 = -10236x^2 + 25922x - 15838 \text{ (APRC)},$$

$$y_5 = 1,837x^2 - 6,211x + 5,043 \text{ (RECS)},$$

$$y_6 = -0,272x^2 + 0,738x - 0,284 \text{ (RECL)}.$$

По данным уравнениям строятся графики, отображающие зависимости исследуемого параметра (среднеквадратичные погрешности) от фактора формы (рис. 2).

В табл. 2 содержатся данные о доверительных вероятностях методов контроля диаметра объекта.

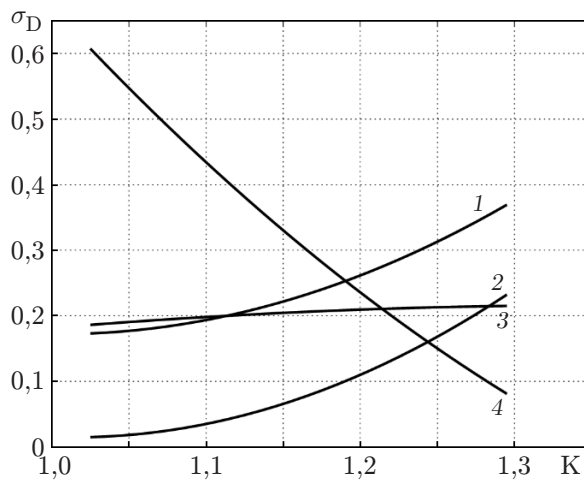


Рис. 2. Зависимости погрешности диаметра МО от коэффициентов несферичности: 1 — D(WIBR), 2 — D(RS3), 3 — D(RECL), 4 — D(RECS)

Таблица 2
Доверительные вероятности для среднего диаметра

KFO	WIBR	RS1	RS3	APRC	RECS	RECL
1,3	0,324	0,042	0,543	0,017	0,945	0,623
1,2	0,674	0,064	0,904	0,020	0,881	0,662
1,1	0,574	0,154	0,982	0,019	0,437	0,662
1,025	0,641	0,439	1,000	0,021	0,299	0,638

Уравнения для табл. 2 выглядят следующим образом:

$$y_1 = -8,804x^2 + 194,546x - 10,182 \text{ (WIBR)},$$

$$y_2 = 8,814x^2 - 21,846x + 13,556 \text{ (RS1)},$$

$$y_3 = -9,602x^2 + 20,739x - 10,182 \text{ (RS3)},$$

$$y_4 = -0,332x^2 + 0,062x - 0,010 \text{ (APRC)},$$

$$y_5 = -5,083x^2 + 14,399x - 9,159 \text{ (RECS)},$$

$$y_6 = -1,900x^2 + 4,364x - 1,839 \text{ (RECL)}.$$

На рис. 3 показаны зависимости доверительных вероятностей контроля диаметра объекта от коэффициента несферичности для различных методов контроля.

В табл. 3 содержатся среднеквадратичные погрешности фактора формы для разных значений K , $K(\text{RFD1})$ отличается от $K(\text{RS3})$ учётом систематической погрешности.

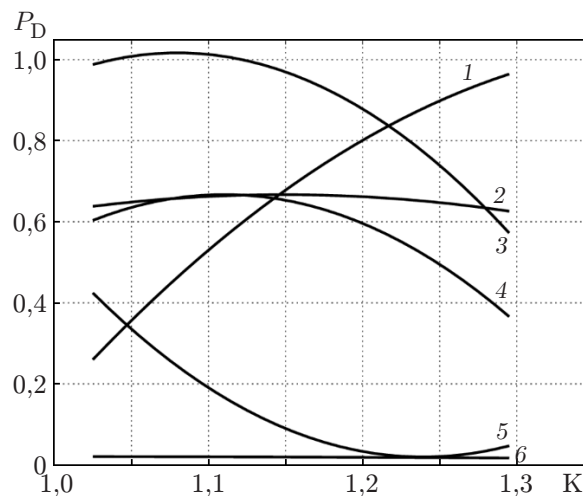


Рис. 3. Зависимости доверительных вероятностей контроля диаметра объекта от коэффициента несферичности: 1 — $D(\text{RECS})$, 2 — $D(\text{RECL})$, 3 — $D(\text{RS3})$, 4 — $D(\text{WIBR})$, 5 — $D(\text{RS1})$, 6 — $D(\text{APRC})$

Таблица 3
Среднеквадратичные погрешности для фактора формы

KFO	WIBR	RS3	RFD1	APR1	APR2	APR3	RECS	RECL
1,3	0,032	0,220	0,118	3498,432	5,980	0,672	0,054	0,008
1,2	0,130	0,137	0,079	5594,543	5,885	0,296	0,048	0,005
1,1	0,051	0,066	0,035	1195,749	4,850	0,184	0,045	0,003
1,025	0,003	0,014	0,009	72,794	7,675	0,124	0,112	0,002

Уравнения для табл. 3 примут следующий вид:

$$y_1 = 0,211x^2 - 0,382x + 0,172 \text{ (WIBR)},$$

$$y_2 = 0,392x^2 - 0,167x - 0,227 \text{ (RS3)},$$

$$y_3 = 0,072x^2 + 0,234x - 0,308 \text{ (RFD1)},$$

$$y_4 = -123100x^2 + 302050x - 180760 \text{ (APR1)},$$

$$y_5 = 85,108x^2 - 201,83x + 124,76 \text{ (APR2)},$$

$$y_6 = 8,526x^2 - 17,908x + 9,535 \text{ (APR3)},$$

$$y_7 = 2,257x^2 - 5,424x + 3,294 \text{ (RECS)},$$

$$y_8 = 0,0045x^2 - 0,0831x + 0,004 \text{ (RECL)}.$$

Графики зависимости среднеквадратичной погрешности фактора формы МО от коэффициента несферичности К показаны на рис. 4.

В табл. 4 содержатся данные о доверительных вероятностях методов контроля фактора формы объекта.

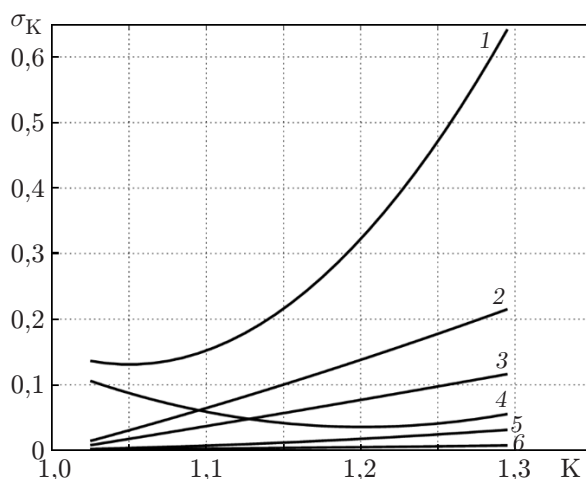


Рис. 4. Зависимости погрешности фактора формы МО от коэффициента несферичности: 1 — K(APR3); 2 — K(RS3); 3 — K(RFD1); 4 — K(RECS); 5 — K(WIBR); 6 — K(RECL)

Таблица 4

Доверительные вероятности для фактора формы

KFO	WIBR	RS3	RFD1	APR1	APR2	APR3	RECS	RECL
1,3	0,363	0,000	0,088	0,000	0,002	0,013	0,172	0,772
1,2	0,494	0,000	0,129	0,000	0,010	0,028	0,175	0,915
1,1	0,845	0,000	0,227	0,000	0,017	0,029	0,254	0,997
1,025	0,998	0,240	0,810	0,042	0,182	0,182	0,005	0,999

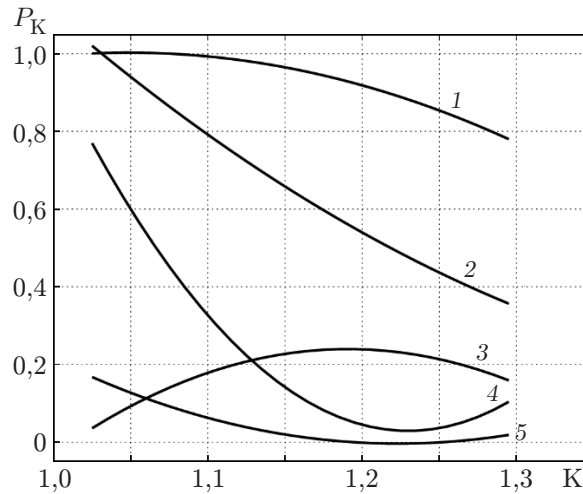


Рис. 5. Зависимости доверительных вероятностей контроля коэффициента несферичности объекта от его значения: 1 — K(RECL), 2 — K(WIBR), 3 — K(RECS), 4 — K(RFD1), 5 — K(APR3)

Уравнения для табл. 4 имеют вид

$$y_1 = 3,025x^2 - 9,477x + 7,555 \text{ (WIBR)},$$

$$y_2 = 7,067x^2 - 15,641x + 8,621 \text{ (RS3)},$$

$$y_3 = 17,636x^2 - 43,380x + 26,705 \text{ (RFD1)},$$

$$y_4 = 1,315x^2 - 3,189x + 1,925 \text{ (APR1)},$$

$$y_5 = 4,973x^2 - 12,134x + 7,382 \text{ (APR2)},$$

$$y_6 = 4,356x^2 - 10,658x + 6,516 \text{ (APR3)},$$

$$y_7 = -7,416x^2 + 17,662x - 10,276 \text{ (RECS)},$$

$$y_8 = -3,660x^2 + 7,673x - 3,019 \text{ (RECL)}.$$

На рис. 5 показаны зависимости доверительных вероятностей контроля фактора формы объекта от коэффициента несферичности для разных методов контроля.

Заключение. Анализ результатов работы методов показывает, что при контроле диаметра объекта наименьшую погрешность имеет метод площадей D(RS3), а наибольшую погрешность показали методы D(RS1) и D(APRC). При $K \leq 1,2$ отн. ед. наибольшую доверительную вероятность имеет метод D(RS3), при $K > 1,2$ отн. ед. — D(RECS) и D(RECL). Значительно меньшей достоверностью обладают методы D(APRC) и D(RS1).

Среди методов контроля формы наибольшей погрешностью обладают методы K(APR1) и K(APR2), а наименьшей — методы K(RECL) и K(WIBR). Метод K(RECL) обладает меньшей погрешностью при больших значениях K. Наибольшую достоверность при большинстве значений фактора формы и размеров имеет метод K(RECL), при малых значениях фактора формы — метод K(WIBR).

Проведённые исследования метрологических характеристик разработанных методов показывают, что они имеют различные возможности и при решении конкретных задач, исходя из требований к быстродействию, диапазону измерений, точности и достоверности результатов по приведённым графикам, позволяют выбрать оптимальный метод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гребенник В. И., Кухаркин Н. Е., Пономарев-Степной Н. Н.** Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы — инновационное направление развития атомной энергетики. М.: Энергоатомиздат, 2008. 136 с.
2. **Доморацкий Е. П., Байбикова Т. Н.** Лазерный метод оптико-электронного контроля размеров и формы движущихся микрообъектов с реконструкцией по их импульсным проекционным изображениям // Тр. XIV Междунар. науч.-техн. конф. «Оптические методы исследования потоков». М.: Изд-во «Перо», 2017. С. 275–281.
3. **Хермен Г.** Восстановление изображения по проекциям. Основы реконструктивной томографии. М.: Мир, 1983. 352 с.
4. **IAEA.** High Temperature Gas Cooled Reactor Fuels and Materials. IAEA-TECDOC-1645. Vienna: IAEA Publ., 2010. 182 p.
5. **Доморацкий Е. П., Байбикова Т. Н.** Способ автоматического анализа геометрических характеристик дискретных телевизионных изображений // Матер. Междунар. науч.-практич. конф. «Фундаментальная информатика, информационные технологии и системы управления: реалии и перспективы (ФИПТМ-2014)». Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. С. 125–129.
6. **Байбикова Т. Н., Доморацкий Е. П.** Система имитационного моделирования операций, геометрических характеристик и методов импульсной оптической томографии микрообъектов ядерного топлива // Датчики и системы. 2020. № 5. С. 34–40.
7. **Доморацкий Е. П.** Методика оценки информативности геометрических характеристик проекционных изображений микрообъектов // Качество. Инновации. Образование. 2014. № 2. С. 42–45.
8. **Байбикова Т. Н., Доморацкий Е. П.** Способ динамической реконструкции размеров и формы трёхмерных объектов по размерам их проекционных изображений // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. 74, № 5. С. 109–117.

Поступила в редакцию 20.02.2021

После доработки 26.03.2021

Принята к публикации 08.04.2021
