

УДК 004.932:681.7

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.61.10.001](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.61.10.001)

Снижение погрешности микроскопических измерений сквозных отверстий за счет оптимизации коэффициента относительного смещения порога при адаптивной бинаризации изображения

А.В. Ковалев✉, С.В. Бушуев, А.В. Шулепов

*Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва,
Российская Федерация*

Резюме. Видео-измерительные микроскопы (ВИМ) широко применяются в научных исследованиях и на производстве для контроля геометрии объектов сложной формы, однако результаты измерений на них сильно зависят от условий освещения и параметров обработки изображений. В работе исследуется влияние уровня нижней подсветки на выбор оптимального значения коэффициента относительного смещения порога относительно локального фона для адаптивной бинаризации изображений при измерении сквозных отверстий. Данный параметр был оптимизирован по критерию минимизации отклонения измеренного диаметра от эталонных данных, полученных на координатно-измерительной машине (КИМ, Carl Zeiss). После реализации обработки получаемых от микроскопа изображений и расчетов параметров полученных профилей окружностей было показано, что оптимальное значение коэффициента относительного смещения порога демонстрирует близкую к линейной зависимость от уровня нижней подсветки (30–85 в условных единицах ВИМ). На основании полученных данных была предложена методика автоматизации выбора коэффициента относительного смещения порога, снижающая влияние оператора на результаты измерений. Материалы статьи могут быть использованы для повышения воспроизводимости и снижения погрешности измерений в промышленных системах автоматизированного оптического контроля геометрии готовых изделий.

Ключевые слова: видео-измерительный микроскоп, оптимизация измерений, погрешности оптических измерительных систем, проекционные измерения, распознавание образов.

Для цитирования: Ковалев А.В., Бушуев С.В., Шулепов А.В. Снижение погрешности микроскопических измерений сквозных отверстий за счет оптимизации коэффициента относительного смещения порога при адаптивной бинаризации изображения. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(10). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2386> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.001

Reducing of the microscope error for the control of through holes by optimizing the relative threshold offset coefficient with adaptive image binarization

A.V. Kovalev✉, S.V. Bushuev, A.V. Shulepov

Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, the Russian Federation

Abstract. Video measuring microscopes (VMM) are widely used in scientific research and in production to control the geometry of objects of complex shape, however, the measurement results on them strongly depend on lighting conditions and image processing parameters. In this paper, the influence of the backlight level on the choice of the optimal value of the relative threshold offset coefficient relative to the local background for adaptive binarization of images when measuring through holes is investigated. This parameter has been optimized according to the criterion of minimizing the deviation of the

measured diameter from the reference data obtained on the coordinate measuring machine (CMM, Carl Zeiss). After processing the images obtained from the microscope and calculating the parameters of the obtained circle profiles, it was shown that the optimal value of the relative threshold offset coefficient demonstrates a close to linear dependence on the level of the lower illumination (30–85 in conventional VMM units). Based on the data obtained, a method was proposed for automating the selection of the relative threshold offset coefficient, which reduces the operator's influence on the measurement results. The materials of the article can be used to increase reproducibility and reduce measurement error in industrial systems of automated optical geometry control of finished products.

Keywords: video measuring microscope, measurement optimization, optical measurement errors, projection measurements, pattern recognition.

For citation: Kovalev A.V., Bushuev S.V., Shulepov A.V. Reducing of the microscope error for the control of through holes by optimizing the relative threshold offset coefficient with adaptive image binarization. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(10). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/journal/article?id=2386> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.001

Введение

Видео-измерительные микроскопы (ВИМ) играют ключевую роль в современной промышленной метрологии благодаря своей скорости измерений, неразрушающему характеру контроля и способности измерять мелкие геометрические объекты, где контактные методы неприменимы [1]. Вместе с тем, погрешность измерений на ВИМ зависит от параметров освещения и алгоритмов цифровой обработки изображений [2]. В работе [3] рассматриваются различные способы обработки изображений для оценки износа инструмента на основе геометрии.

При использовании нижней (просвечивающей) подсветки для измерения сквозных отверстий контраст формируется преимущественно на границах, а фоновая яркость может варьироваться в зависимости от уровня подсветки. Это делает неэффективными глобальные методы бинаризации, такие как метод Оцу [4], и требует применения адаптивных подходов. В настоящей работе предложен способ оптимизации параметра адаптивной бинаризации по методу Бредли [5] на основе текущего уровня подсветки с целью минимизации погрешности измерения диаметра сквозных отверстий.

Материалы и методы

Эксперимент проводился на трех эталонных объектах в форме калибровочных установочных колец Mitutoyo с различными номинальными диаметрами отверстий 2,504; 3,999; 5,006 мм. Истинные значения диаметров и параметров круглости получены на координатно-измерительной машине (КИМ) Carl Zeiss PRISMO navigator 7 (9/12/7), оборудованной измерительной головкой VAST gold S-ACC с погрешностью измерения $\pm(0,9+L/350)$ мкм.

Измерения на видеоизмерительной системе Norgau NVMII-4030Di (ВИМ) осуществлялись при фиксированном увеличении (коэффициент увеличения объектива 1,0х), с использованием цифровой RGB-камеры с разрешением 1280×1024 пикселей и регулируемым диаскопическим освещением. Уровень подсветки задавался в условных единицах от 0 до 255; в экспериментах использовался диапазон от 30 до 85 % диаскопического освещения. Известные значения масштаба (размер пикселя по $X = 0,005248$ и $Y = 0,005250$ в мм) позволяли переводить результаты измерений из пиксельных координат в метрические.

Для измерения диаметров сквозных отверстий на основе цифровых изображений, полученных с ВИМ, применяется последовательность этапов обработки, включающая преобразование цветного изображения в градации серого, адаптивную бинаризацию для

сегментации отверстия на фоне, выделение границ и аппроксимацию окружности (Рисунок 1). Каждый из этих этапов влияет на результат, поэтому особое внимание уделяется адаптации параметров обработки к текущим условиям освещения и геометрии объекта.

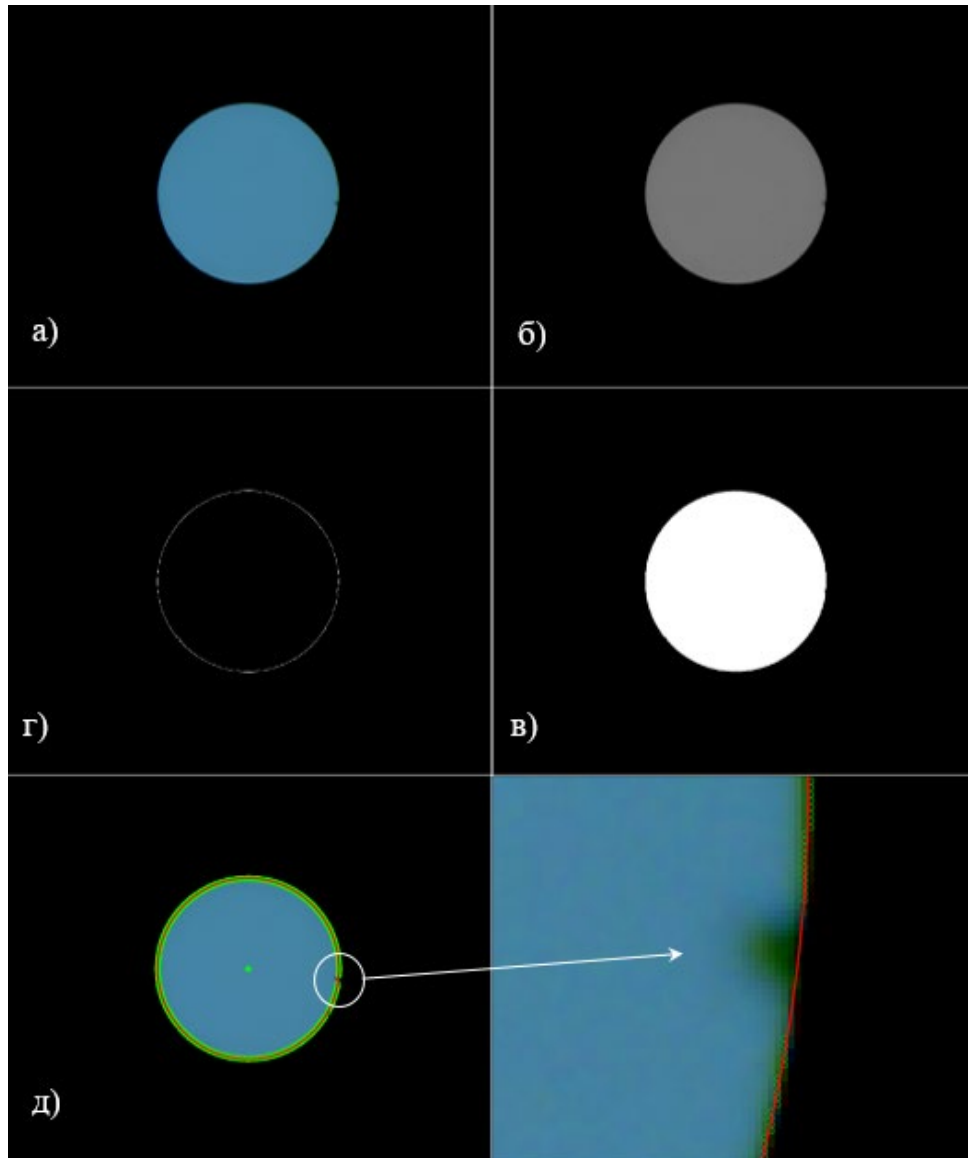


Рисунок 1 – Этапы обработки изображения с ВИМ: *a* – исходное изображение; *б* – изображение в градациях серого; *в* – бинарное изображение; *г* – контур; *д* – результат обработки: наложение, аппроксимирующей окружности на исходное изображение

Figure 1 – Stages of image processing with VMM: *a* – the original image, *b* – the grayscale image, *c* – the binary image, *d* – the contour, *e* – the result of processing: the overlay of an approximating circle on the original image

Исходные цветные изображения переводились в оттенки серого согласно формуле [6]:

$$I_{gray}(x, y) = 0,299 \cdot Red(x, y) + 0,587 \cdot Green(x, y) + 0,114 \cdot Blue(x, y), \quad (1)$$

где $I_{gray}(x, y)$ – изображение в градациях серого, $Red(x, y)$, $Green(x, y)$, $Blue(x, y)$ – каналы красного, зеленого и синего цветов изображения соответственно.

Затем применялась адаптивная бинаризация по методу Бредли [5]:

$$D(x, y) = \begin{cases} 1, \text{ если } I_{gray}(x, y) \leq \mu(x, y) \cdot (1 - s) \\ 0, \text{ если } I_{gray}(x, y) > \mu(x, y) \cdot (1 - s) \end{cases} \quad (2)$$

где $D(x, y)$ – бинарное изображение, $\mu(x, y)$ – локальное среднее значение яркости в окрестности (x, y) , вычисленное с помощью гауссового фильтра (размер окна 15×15 , $\sigma = 3$); s – коэффициент относительного смещения порога ($0 < s < 1$).

Параметр s определяет, насколько порог ниже локального фона. При больших значениях параметра s может быть захвачена избыточная область за пределами отверстия. В связи с этим, необходим корректный выбор величины данного параметра. Оптимизация данного параметра и рассматривается в данном исследовании.

После бинаризации изображения $D(x, y)$ к нему применялся оператор Кэнни для обнаружения краев [7]. Полученные граничные точки в пиксельных координатах (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, N$, использовались в качестве входных данных для кругового преобразования Хафа.

Для повышения вычислительной эффективности и устойчивости детекции был реализован модифицированный алгоритм Хафа [8] с априорными ограничениями. В отличие от полного перебора по всему изображению, поиск центра и радиуса проводился в ограниченной области, основанной на геометрических предположениях:

1. *Априорная оценка центра* принималась равной центру изображения:

$$(x_c^{prior}, y_c^{prior}) = \left(\frac{W}{2} \cdot px, \frac{H}{2} \cdot py \right), \quad (3)$$

где $H = 1024$, $W = 1280$ – высота и ширина изображения, $px = 0,005248$, $py = 0,005250$ мм/пиксель – масштабные коэффициенты (размеры пикселя).

2. *Оценка характерного радиуса* производилась как медиана расстояний от граничных точек до априорного центра:

$$R_{med} = median_{i=1, \dots, N} \left(\sqrt{(x_i - x_c^{prior})^2 + (y_i - y_c^{prior})^2} \right). \quad (4)$$

3. *Область поиска* задавалась следующим образом:

$$x_c \in [x_c^{prior} - \Delta, x_c^{prior} + \Delta], \quad (5)$$

$$y_c \in [y_c^{prior} - \Delta, y_c^{prior} + \Delta], \quad (6)$$

$$R \in [max(R_{med} - \Delta_R, 5p), R_{med} + \Delta_R], \quad (7)$$

где $\Delta = \Delta_R = 20 \cdot p$, $p = \min(px, py)$, что соответствует 20 пикселям в метрических единицах.

4. *Голосование в аккумуляторе* осуществлялось по критерию:

$$H(x_c, y_c, R) = \ln(|\sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} - R| \leq p), \quad (8)$$

где $\ln(\cdot)$ – индикаторная функция, p – размер пикселя.

5. *Выбор оптимальной окружности* производился по максимуму аккумулятора:

$$(x_c^*, y_c^*, R^*) = \underset{x_c, y_c, R}{argmax} H(x_c, y_c, R), \quad (9)$$

при условии, что значение максимума превышает порог:

$$H_{max} \geq t, t = 0,3 \cdot \frac{2\pi R_{med}}{2p}. \quad (10)$$

Порог t соответствует 30 % от ожидаемого числа голосов для идеальной окружности, учитывая дискретизацию шагом p .

6. *Фильтрация выбросов* (inliers) выполнялась по отклонению от найденной окружности:

$$\text{inlier}_i = |\sqrt{(x_i - x_c^*)^2 + (y_i - y_c^*)^2} - R^*| \leq 0,5p. \quad (11)$$

Измеренный диаметр вычислялся как:

$$D_{meas} = 2R^*. \quad (12)$$

Такой подход позволяет существенно сократить пространство параметров (с $O(HWR)$ до $O(\Delta^2 \cdot \Delta_R)$), повысить скорость вычислений и улучшить устойчивость к шуму и частичной окклюзии границы.

На Рисунке 1d изображен результат аппроксимации: зеленым обозначены точки, относящиеся к поверхности отверстия, красным – аппроксимирующая окружность.

Используя в качестве истинных значения с КИМ, были подобраны значения коэффициента относительного смещения порога s . На Рисунке 2 показана зависимость данного коэффициента от используемого значения освещенности нижней подсветки. Видно, что помимо освещенности влияет также доля, занимаемая отверстием на изображении.

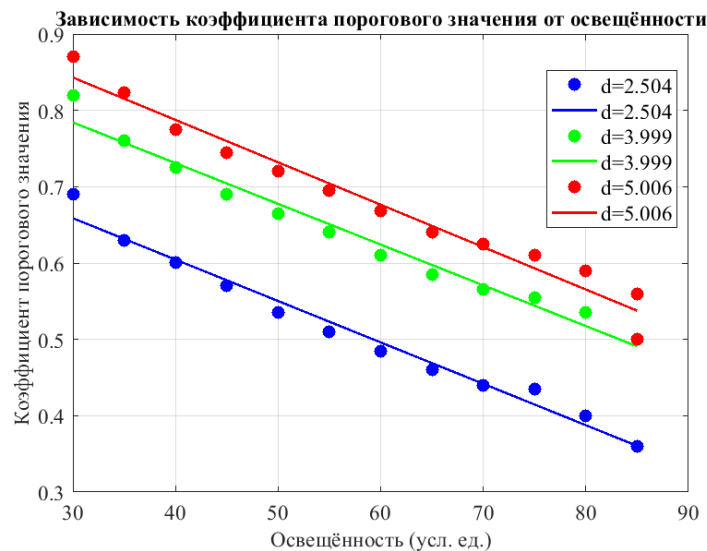


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента порогового значения от используемой освещенности
Figure 2 – Dependence of the threshold value coefficient on the illumination value

В Таблице 1 приведены значения коэффициентов линейной аппроксимации и значение коэффициента детерминации R^2 . Линейная аппроксимация проводилась методом наименьших квадратов [9], с функцией минимизации:

$$\sum_{i=1}^n (s_i - k_1 \cdot E_i - k_2)^2 \rightarrow \min, \quad (13)$$

где i – номер изображения, E – значение уровня подсветки, k_1 и k_2 – коэффициенты линейной аппроксимации.

Таблица 1 – Результаты линейной аппроксимации
Table 1 – Results of linear approximation

Диаметр	k_1	k_2	R^2
2,504	–0,0054	0,8214	0,9895
3,999	–0,0053	0,9443	0,9870
5,006	–0,0056	1,0096	0,9839

Поскольку значения углового коэффициента при линейной аппроксимации k_1 изменяются незначительно, то можно предположить, что он обусловлен изменением значения освещенности. Ввиду этого предположено, что изменение коэффициента k_2 обусловлено различной долей отверстия, занимаемой на изображении. Поэтому дальнейшее рассмотрение проводилось на основе функции от двух переменных: значения освещенности и доли отверстия на изображении.

Доля оценивалась с помощью суммы белых пикселей после бинаризации, которая проводилась по методу Оцу [4] в начальный момент по отношению к общему числу пикселей на изображении (1024×1280), так как изначально величина коэффициента смещения порога для адаптивной бинаризации не известна. Полученная зависимость коэффициента относительного смещения порога от освещенности и доли отверстия приведена на Рисунке 3.

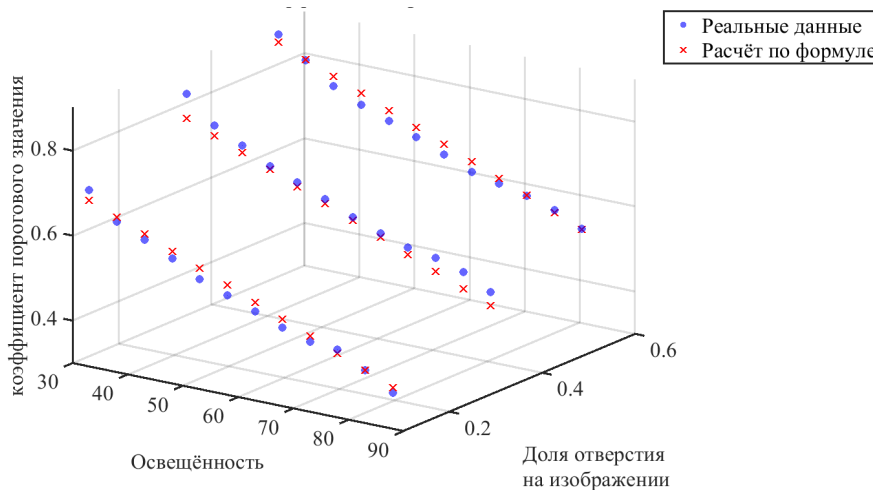


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента относительного смещения порога от освещенности и доли отверстия

Figure 3 – Dependence of the relative threshold offset coefficient on illumination and hole fraction

Экспериментально установлено, что оптимальное значение s :

$$s_{opt}(E, A) = k_1 E + k_2 A + k_3, \quad (14)$$

где значения получены методом наименьших квадратов на трех кольцах в диапазоне $E = 30-85$; A – доля, занимаемая отверстием, на изображении рассчитывается как сумма светлых пикселей после этапа глобальной бинаризации:

$$A = \frac{1}{H \cdot W} \sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H D_{Otsu}(x, y), \quad (15)$$

где $D_{Otsu}(x, y)$ – бинарное изображение, полученное методом Оцу, $H = 1024$, $W = 1280$.

Для определения коэффициентов k_1 , k_2 , k_3 использовался метод наименьших квадратов (МНК). Пусть для N экспериментов известны:

- E_i – уровень подсветки (в условных единицах ВИМ, $i = 1, \dots, N$),
- A_i – нормированная площадь отверстия на изображении,

– s_i – значение коэффициента s , при котором достигался минимум абсолютного отклонения $|D_{meas} - D_{ref}|$.

Тогда задача оценки параметров сводится к решению линейной системы:

$$\begin{bmatrix} E_1 & A_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ E_N & A_N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_N \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Тогда представляя уравнение в матричном виде:

$$M \cdot b = f, \quad (17)$$

где

$$M = \begin{bmatrix} E_1 & A_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ E_N & A_N & 1 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_N \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Решение в смысле наименьших квадратов получено как:

$$b = (M^T \cdot M)^{-1} \cdot M^T \cdot f. \quad (19)$$

Были получены следующие значения коэффициентов аппроксимации:

$$k_1 = -0,0054, \quad (20)$$

$$k_2 = 0,4818, \quad (21)$$

$$k_3 = 0,76236. \quad (22)$$

Коэффициент детерминации R^2 для данной модели составил 0,9694.

Результаты

Результаты по применению выявленной зависимости были валидированы на установочных кольцах и экспериментальной детали, которая также была измерена на КИМ. На Рисунке 4 приведены, отклонения значений полученных диаметров в ходе обработки изображений и результатов КИМ.

Полученное отклонение до 2,5 мкм (согласно Рисунку 4) для экспериментального отверстия, может быть обусловлено его геометрией. А именно неравномерностью толщины материала, а также дифракционными эффектами, которые искажают локальный профиль яркости на границе и, следовательно, влияют на точность бинаризации и детекции контура.

Наблюдаемое остаточное смещение (~0,7 мкм) может быть обусловлено структурой дифракционного профиля Френеля, формирующегося на краю сквозного отверстия при просвечивании. При дифракции плоской волны на кромке возникает характерный осциллирующий профиль интенсивности, ширина которого сопоставима с размером пикселя. Этот эффект искажает положение видимой границы и ограничивает точность традиционной бинаризации.

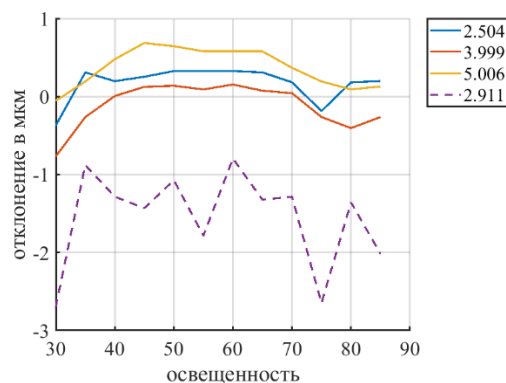


Рисунок 4 – Значения отклонений полученных диаметров с помощью предложенного метода от результатов измерений на КИМ

Figure 4 – Values of deviations of the obtained diameters using the proposed method from the measurement results on the CMM

Обсуждение

Перспективным направлением является моделирование профиля дифракции Френеля и использование его в качестве априорной функции для субпиксельной локализации границы [10]. Такой подход позволяет интерполировать положение истинной геометрической кромки с точностью до доли пикселя.

При увеличении уровня подсветки фоновая яркость растет, а градиент яркости на границе отверстия уменьшается из-за оптического размытия (дифракция, рассеяние), что, в свою очередь, требует уменьшения s (меньшего смещения порога), чтобы избежать завышенной оценки диаметра.

Метод применим только при использовании нижней просвечивающей подсветки и требует предварительной калибровки зависимости $s(E, A)$. Результаты не обобщаются на боковое или кольцевое освещение без дополнительных исследований.

Заключение

Подтверждена гипотеза о наличии устойчивой зависимости между уровнем подсветки и оптимальным значением коэффициента относительного смещения порога при адаптивной бинаризации изображений сквозных отверстий. Предложена простая линейная модель $s_{\text{opt}}(L, A)$, позволяющая автоматизировать выбор параметра и снизить влияние оператора на результат измерения.

В будущем планируется:

- расширить выборку объектов и уровней подсветки;
- исследовать применимость метода при других типах освещения;
- интегрировать физически обоснованную модель дифракции Френеля для субпиксельной локализации границы и дальнейшего снижения систематической погрешности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Зуйков А.А., Шулёпов А.В. Повышение точности измерения малогабаритных отверстий с помощью измерительного микроскопа на основе цифровой обработки изображения. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. 2012;127(2):45–48.
Zuykov A.A., Shulepov A.V. Improving accuracy at measuring small-scale holes by means of reading microscope based on image digital processing. *Electromechanical matters. VNIEM studies*. 2012;127(2):45–48. (In Russ.).
2. Shimizu Y., Chen L.-Ch., Kim D.W., et al. An insight into optical metrology in manufacturing. *Measurement Science and Technology*. 2021;32(4):042003.
<https://doi.org/10.1088/1361-6501/abc578>
3. Makhesana M.A., Bagga P.J., Patel K.M., et al. Comparative analysis of different machine vision algorithms for tool wear measurement during machining. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2025;36(7):4567–4591. <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02467-3>
4. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica*. 1975;11:23–27.
5. Bradley D., Roth G. Adaptive thresholding using the integral image. *Journal of Graphics Tools*. 2007;12(2):13–21. <https://doi.org/10.1080/2151237X.2007.10129236>
6. Burger W., Burge M.J. *Principles of Digital Image Processing: Core Algorithms*. London: Springer; 2009. 332 p.
7. Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986;PAMI-8(6):679–698. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>

8. Illingworth J., Kittler J. The adaptive Hough transform. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1987;PAMI-9(5):690–698. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1987.4767964>
9. Montgomery D.C., Peck E.A., Vining G.G. *Introduction to Linear Regression Analysis*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2022. 144 p.
10. Wang Y., Peng M., Cheng X. A subpixel localization method based on edge diffraction. In: *Conference on Optical Design and Testing III, Beijing, China*. SPIE; 2007. P. 607–610.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ковалев Александр Вячеславович, инженер 1 категории лаборатории линейно-угловых измерений, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация.
e-mail: kovalevaleks1991@yandex.ru

Alexander V. Kovalev, Engineer of the 1st Category at the Laboratory of Linear-Angular Measurements, Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, the Russian Federation.

Бушуев Семён Викторович, заведующий лабораторией, Лаборатория линейно-угловых измерений, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация.
e-mail: mtkenny@mail.ru

Semyon V. Bushuev, Head of the Laboratory of Linear-Angular Measurements, Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, the Russian Federation.

Шулепов Алексей Виленинович, кандидат технических наук, доцент кафедры измерительных информационных систем и технологий, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация.
e-mail: avshul@yandex.ru

Alexey V. Shulepov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Measuring Information Systems and Technologies, Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 17.06.2026; одобрена после рецензирования 21.09.2026; принята к публикации 30.09.2026.

The article was submitted 17.06.2026; approved after reviewing 21.09.2026; accepted for publication 30.09.2026.