

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-2-436-441

УДК 681.142.37

## Метрологический анализ бесцентровой схемы контроля овальности крупногабаритных оболочек вращения

Александр Николаевич Шилин<sup>1</sup>, Рамез Ганиевич Атаманюк<sup>2</sup>✉,  
Егор Юрьевич Беседин<sup>3</sup>, Михаил Романович Пастухов<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, 400005, Российская Федерация

<sup>4</sup> ООО «КНС ГРУПП», Москва, 123376, Российская Федерация

<sup>1</sup> shanvstu@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-4893-8812>

<sup>2</sup> atamanuk17@gmail.com✉, <https://orcid.org/0009-0000-3123-6524>

<sup>3</sup> egor\_besedin2004@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5258-5459>

<sup>4</sup> mixail.nbox@list.ru, <https://orcid.org/0009-0004-1444-307X>

### Аннотация

**Введение.** Контроль геометрических параметров крупногабаритных обечаек (базовых деталей энергетического и нефтегазового оборудования) является критически важной задачей, определяющей качество и производительность их сборки. Существующие методы, основанные на измерении элементов круга, обладают существенными методическими погрешностями и требуют точного центрирования, что затруднительно для деталей больших габаритов, имеющих отклонения от круглой формы, в первую очередь овальность. Выполнена разработка и метрологический анализ бесцентровой метода контроля диаметра и отклонения от круглости формы, свободной от методических погрешностей и позволяющего повысить точность и эффективность измерений в условиях производства. **Метод.** В основе метода лежит фундаментальное геометрическое свойство круга, согласно которому его диаметр равен максимальному расстоянию между двумя точками на внутренней поверхности детали. Метод реализован в виде оптико-электронного прибора, содержащего лазерный дальномер, установленный на каретке, перемещающейся по контуру обечайки. Дальномер осуществляет угловое сканирование противоположного участка внутренней поверхности обечайки, а управляющий блок фиксирует массив расстояний и определяет диаметр как максимальное значение в сечении. Конструкция прибора обеспечивает соблюдение принципов Аббе и инверсии, что делает схему измерения инвариантной к погрешностям позиционирования. Для верификации метода проведено компьютерное моделирование процесса измерения для обечаек с овальной формой поперечного сечения. **Основные результаты.** Определено, что инструментальная погрешность лазерного дальномера ( $\pm 1$  мм) является основной и не превышает установленный технологический допуск в 1 % от номинального диаметра обечайки. Метрологический анализ на моделях овального сечения показал, что погрешность определения диаметра функционально зависит от величины овальности, при этом в пределах допустимых значений овальности требования технологического процесса выполняются. **Обсуждение.** Разработанный метод и прибор позволяют напрямую, с высокой точностью и без требования центрирования контролировать диаметр и отклонение от круглости внутренней поверхности крупногабаритных обечаек. Основными преимуществами предложенного решения являются инвариантность, автономность и простота технической реализации. Устройство может быть применено для послеоперационного и приемочного контроля в атомном, энергетическом и нефтегазовом машиностроении, а также в других отраслях для снижения трудоемкости сборки и обеспечения качества стыковки деталей.

### Ключевые слова

крупногабаритные обечайки, контроль размеров, отклонение от круглости, овальность, оптико-электронные приборы, лазерный дальномер, метрологический анализ, принцип Аббе, инвариантная схема измерения

### Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу кафедры «Электротехники» Волгоградского государственного технического университета за помощь в проведении исследований и ценные замечания при подготовке статьи.

**Ссылка для цитирования:** Шилин А.Н., Атаманюк Р.Г., Беседин Е.Ю., Пастухов М.Р. Метрологический анализ бесцентровой схемы контроля овальности крупногабаритных оболочек вращения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 2. С. 436–441. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-2-436-441

© Шилин А.Н., Атаманюк Р.Г., Беседин Е.Ю., Пастухов М.Р., 2026

## Analysis of a centerless control scheme for profiles of large-sized shells in the process of their shaping

Aleksandr N. Shilin<sup>1</sup>, Ramez G. Atamaniuk<sup>2</sup>✉, Egor Yu. Besedin<sup>3</sup>, Mikhail R. Pastukhov<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation

<sup>4</sup> KNS GROUP LLC, Moscow, 123376, Russian Federation

<sup>1</sup> shanvstu@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-4893-8812>

<sup>2</sup> atamanuk17@gmail.com✉, <https://orcid.org/0009-0000-3123-6524>

<sup>3</sup> egor\_besedin2004@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5258-5459>

<sup>4</sup> mixail.nbox@list.ru, <https://orcid.org/0009-0004-1444-307X>

### Abstract

Control of the geometric parameters of large-sized shells — the basic parts of energy and oil and gas equipment — is a critically important task that determines the quality and productivity of their assembly. Existing methods based on measuring the elements of a circle have significant methodological errors and require precise centering, which is difficult for large parts with deviations from the round shape, primarily ovality. Development and metrological analysis of a centerless method for monitoring diameter and deviation from roundness, free from methodological errors and allowing improving the accuracy and efficiency of measurements in production conditions has been proposed. The method is based on the fundamental geometric property of a circle, according to which its diameter is equal to the maximum distance between two points on the inner surface. The method is implemented in the form of an optoelectronic device containing a laser rangefinder mounted on a carriage moving along the contour of the shell. The rangefinder performs an angular scan of the opposite section of the inner surface, and the control unit captures an array of distances and determines the diameter as the maximum value in the section. The design of the device ensures compliance with the principles of Abbe and inversion which makes the measurement scheme invariant to positioning errors. To verify the method, a computer simulation of the measurement process was performed for shells with an oval cross-section shape. It is established that the instrumental error of the laser rangefinder ( $\pm 1$  mm) is the main one and does not exceed the established technological tolerance of 1 % of the nominal diameter. Metrological analysis on oval cross-section models has shown that the error in determining the diameter functionally depends on the amount of ovality, however, within the permissible values of ovality, the requirements of the technological process are met. The developed method and device make it possible to directly control, with high accuracy and without the requirement of centering, the diameter and deviation from the roundness of the inner surface of large shells. The main advantages of the proposed solution are invariance, autonomy, and simplicity of technical implementation. The device can be used for postoperative and acceptance control in nuclear, energy, and oil and gas engineering as well as in other industries to reduce the complexity of assembly and ensure the quality of parts joining.

### Keywords

large-sized shells, dimensional control, roundness deviation, ovality, optoelectronic devices, laser rangefinder, metrological analysis, Abbe principle, invariant measurement scheme, computer modeling

### Acknowledgments

The authors would like to thank the staff of the Department of Electrical Engineering at Volgograd State Technical University for their help in conducting research and valuable comments during the preparation of the article.

**For citation:** Shilin A.N., Atamaniuk R.G., Besedin E.Yu., Pastukhov M.R. Analysis of a centerless control scheme for profiles of large-sized shells in the process of their shaping. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 2, pp. 436–441 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-2-436-441

### Введение

В атомном машиностроении, выпускающем крупногабаритное энергетическое оборудование, основными базовыми деталями являются оболочки вращения — обечайки. Эти детали изготавливают методом давления на валковых листогибочных машинах из листового материала [1]. На первом этапе производства обечайек выполняются операции гибки и сварки, а затем — калибровка (правка) на валковых листогибочных машинах с целью придания обечайке цилиндрической формы. После сварки обечайка может иметь отклонения от окружности в поперечном сечении с преобладанием овальной формы. Информация о форме детали необходима для управления технологическим процессом ее калибровки, поскольку алгоритм управления основан на данных о первоначальной форме. После заключительной операции изготовления обечайек часто перед сборкой корпусного оборудования из базовых деталей (обечайек и днищ) возникает необходимость контроля

геометрических параметров базовых деталей. Это обусловлено тем, что производство обечайек и их сборка может производиться в разных местах, что связано с ее транспортировкой и возможной деформацией. Кроме того, производство обечайек может выполняться в нагретом состоянии и при остывании полученной детали из-за температурной деформации может изменяться форма обечайки.

Кроме того, транспортировка крупногабаритных обечайек также может приводить к дополнительным деформациям, несмотря на применение временных элементов жесткости (например, распорных колец или конструктивных усилений). Для толстостенных обечайек такие средства могут быть ограниченно применимы [1], что повышает требования к точности контроля геометрии после перевозки.

Цилиндрические корпуса нефтегазового оборудования собираются из базовых деталей с помощью сварки. Технологическая точность оказывает влияние на производительность сборочных и монтажных операций

и на эксплуатационные характеристики выпускаемой продукции. Наибольшее влияние на качество и производительность сборочных операций оказывает смещение кромок стыкуемых обечаек корпуса при сварке. Это смещение определяется формой поперечного сечения обечаек и их взаимным расположением и не должно превышать 10 % толщины листов обечаек (менее 3 мм)<sup>1</sup>. Поскольку величина допуска на изготовление обечайки составляет 1 % от ее номинального диаметра, а смещение кромок регламентируется толщиной листового материала, то при больших габаритах корпусов ограничение на величину смещения кромок не всегда выполнимо. Решение данного противоречия возможно за счет индивидуального подбора стыкуемых обечаек и их относительного углового расположения [2]. Таким образом, существует потребность в прямом методе измерения диаметра и формы крупногабаритных обечаек, который был бы инвариантен к характерным для них отклонениям профиля.

Цель работы — разработка и метрологический анализ метода, основанного на прямом определении диаметра как максимального расстояния между точками внутренней поверхности, и его аппаратной реализации.

#### Анализ существующих методов и средств контроля обечаек

Для измерения радиуса кривизны цилиндрических деталей больших размеров разработаны различные накладные приборы, которые называются приборами измерения по элементам круга [3]. Данные приборы косвенно определяют диаметр детали по результатам измерения радиуса кривизны участка цилиндрической детали. Основное преимущество накладных приборов перед приборами, которые измеряют абсолютный размер, — относительно малые габариты при больших диапазонах измерения. Принцип действия накладных приборов основан на том, что один из параметров детали задается, а другой измеряется. В качестве параметров кривизны участка круга используются следующие геометрические величины: длина хорды; высота сегмента; расстояние от вершины описанного угла до поверхности; длина дуги; угол между касательными, образующими описанный угол и другие.

Принцип действия накладных приборов определяется комбинацией пар параметров элементов круга и, поэтому существует большое количество вариантов конструкций измерительных приборов. Приборы с подобными схемами измерения применимы для контроля деталей с правильной цилиндрической формой, например, деталей, изготавливаемых на карусельных станках. Профилограммы деталей, изготавливаемых методом гибки из листовых заготовок, содержат гармонические составляющие, обусловленные волнистостью листовых заготовок. Из особенностей технологического процесса производства обечаек следует, что в валковой листогибочной машине поддается исправлению волнистость

листового материала только с длинами волн, большими, чем расстояния между осями валков. Следует отметить, что современные средства контроля крупногабаритных цилиндрических деталей, такие как лазерные трекары [4, 5] или оптические коллиматоры, находят применение в авиационной и космической отраслях. Однако для контроля обечаек в условиях серийного производства эти методы часто оказываются неприменимы из-за необходимости точного центрирования, высокой стоимости, сложности автоматизации и зависимости от квалификации оператора.

Выполненный анализ выявил отсутствие серийно выпускаемых средств, позволяющих напрямую, с высокой точностью и без требования центрирования контролировать диаметр и отклонение от круглости внутренней поверхности крупногабаритных обечаек [4, 5].

#### Описание разработанного метода и прибора

На основе проведенного анализа существующих методов и средств измерения геометрических параметров был предложен метод и реализован оптико-электронный прибор (рис. 1), позволяющие относительно просто решить задачу измерения диаметра обечайки [6]. Разработанный метод дает возможность осуществлять контроль диаметра обечайки и основан на геометрическом свойстве круга, а именно диаметр представляет собой максимальное расстояние между точками окружности внутри круга. Принцип действия прибора аналогичен механизму работы штангенциркуля, который по максимальному значению показания измеряет диаметр цилиндрической детали без привязки к центру поперечного сечения и нутромера, который определяет внутренний диаметр по максимальному значению показания. Измерительное устройство, реализующее метод, содержит дальномер, который закреплен на перемещающейся каретке с возможностью колебательного движения в некотором угловом диапазоне и осуществляет сканирование противоположного участка внутренней поверхности детали. В процессе сканирования выполняется измерение расстояний между точками внутренней поверхности обечайки, после чего блок управления заносит максимальное значение в память. Это значение равно диаметру. При проектировании метода измерения был использован эвристический прием, который приводится в источниках по теории решения изобретательских задач, а именно использовать отрицательный эффект в положительных целях [7]. В оптико-электронных измерительных приборах одной из основных погрешностей является погрешность углового позиционирования измерительного преобразователя. В предложенном методе при угловом сканировании угловое положение лазерного дальномера не фиксируется, а определяется максимальное значение расстояния. Погрешность углового положения практически не оказывает влияние на результат измерения, поскольку в этом случае соблюдается принцип Аббе, согласно которому в схеме измерения линия передачи первичного измерительного сигнала должна совпадать с линией измерения. Рассмотрим влияние угловой погрешности

<sup>1</sup> ГОСТ 34347-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Введ. 07.01.2018. М.: Стандартинформ, 2018.

$\alpha$  установки приборов на точность измерения размера. При малых углах  $\alpha$  относительная погрешность измерения размера дальномером составляет:

$$\delta_D = \Delta_D/l = (1 - \cos\alpha)/\cos\alpha \approx (1 - \cos\alpha) \approx 0,5 \cdot \alpha^2,$$

где  $l$  — измеряемый размер;  $\Delta_D$  — абсолютная линейная погрешность измерения расстояния.

Рассчитаем относительную погрешность смещения лазерного пятна:

$$\delta_{\Pi} = \Delta_{\Pi}/l = \operatorname{tg}\alpha \approx \alpha,$$

где  $\Delta_{\Pi}$  — абсолютная погрешность смещения лазерного пятна.

Отметим, что при измерении геометрических параметров проекционным методом не соблюдается принцип Аббе и погрешность измерения на порядок больше, чем при измерении дальнометрическим методом [8]. Таким образом, угловые погрешности практически не оказывают влияние на точность определения диаметра. Заметим, что для реальных профилей, отличающихся от идеальной окружности, максимальное измеренное расстояние соответствует хорде, а не диаметру. Однако за счет сканирования в пределах небольшого углового диапазона и выбора максимального значения хорды достигается приближение к истинному диаметру. Конструкция прибора обеспечивает перпендикулярность луча лазера хорде, соединяющей точки касания роликов каретки с контуром обечайки, что минимизирует методическую погрешность.

При проектировании измерительных средств для повышения точности измерения необходимо соблюдать два основных принципа измерения Аббе и инверсии. Согласно принципу инверсии при проектировании необходимо учитывать изменение назначения детали при изготовлении, измерении и эксплуатации [9]. Из этого принципа вытекает практическое требование проектирования — обеспечение единства баз. Принцип инверсии так же соблюдается в разработанном методе, поскольку базовой поверхностью обечайки для установки элементов является внутренняя поверхность. Следовательно, разработанный оптико-электронный измерительный прибор является инвариантным, поскольку практически отсутствует методическая составляющая погрешности, а инструментальная погрешность лазера составляет 1 мм. Это значение погрешности укладывается в допуск на диаметр обечайки 1 %. Например, допуск на диаметр 1000 мм составит 10 мм. Прибор предназначен для контроля жестких обечайек. Крупногабаритные обечайки деформируются под собственной массой, изменяя свою геометрическую форму. Значение деформации зависит от отношения толщины листового материала  $h$  к диаметру  $D$ . На практике обечайки считают жесткими при отношении:  $h/D > 1\%$  [1], в этом случае деформацией оболочки пренебрегают. Жесткие обечайки обычно изготавливают на листогибочных машинах для уменьшения деформирующих усилий при нагретом состоянии в диапазоне температур 600–1100 °С.

Оптико-электронный прибор (рис. 1) для измерения размеров обечайек содержит оптическую головку 1, представляющую собой сканирующий оптический дальномер 2, который установлен на приводе вращения 3 и серводвигателя 4. Привод вращения дальномера выполнен с возможностью углового сканирования противоположного внутреннего участка обечайки. Привод вращения закреплен на каретке перемещения 5 по контуру обечайки с помощью серводвигателя 6. На каретке перемещения установлен также блок управления 7, к входу которого подключен информационный выход оптического дальномера, а управляющие выходы блока управления соединены с серводвигателем 4 привода вращения и серводвигателем 6 каретки перемещения и оптического дальномера. Механизм каретки 5 выполнен с возможностью перемещения по контуру обечайки 8 с помощью двух пар роликов 9 и 10, каждая пара которых содержит по прижимной пружине 11 и 12, а один ролик 10 механически соединен с серводвигателем 6 образуя привод перемещения.

Прибор работает следующим образом. Перед началом измерения каретка перемещения устанавливается на обечайку, затем блок управления включает дальномер и угловое сканирование с помощью привода противоположного внутреннего участка обечайки в некотором диапазоне. Несколько результатов измерения расстояний между точками противоположных участков внутренней поверхности обечайки регистрируются в блоке управления 7. Поскольку максимальное рас-

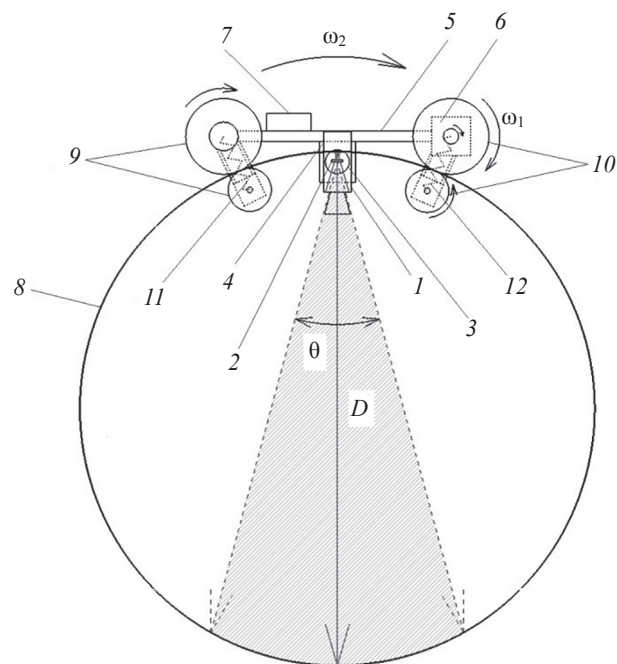


Рис. 1. Схема оптико-электронного прибора для измерения размеров обечайек:  $\omega_1$  — угловая скорость вращения ведущего ролика;  $\omega_2$  — угловая скорость перемещения прибора по контуру обечайки;  $\theta$  — угол углового сканирования дальномера

Fig. 1. Diagram of an optoelectronic device for measuring shell sizes:  $\omega_1$  is angular velocity of the driving roller;  $\omega_2$  is angular velocity of the device movement along the shell contour;  $\theta$  is rangefinder angular scanning angle

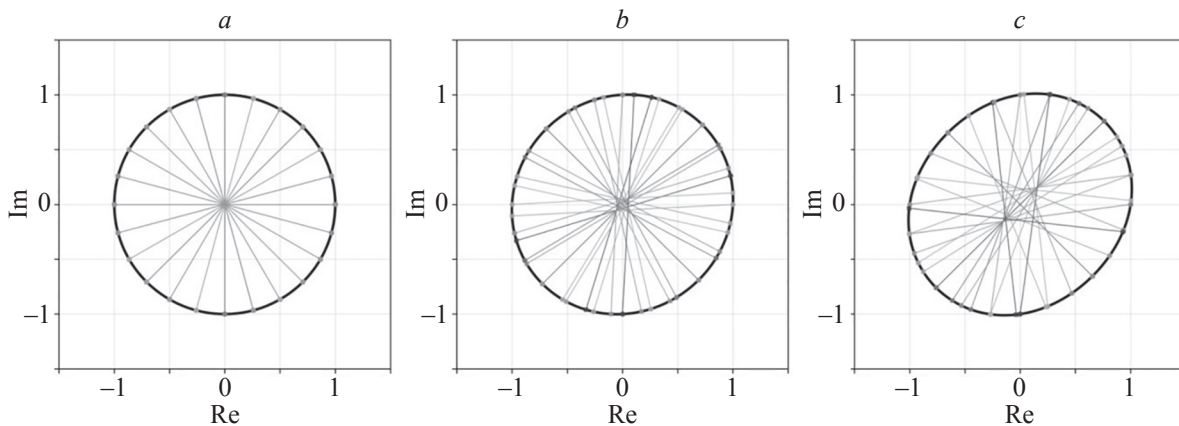


Рис. 2. Смещение измеренного центра сечения относительно геометрического центра при степенях овальностей: 0 % (a); 5 % (b); 15 % (c)

Fig. 2. Displacement of the measured cross-section center relative to the geometric center at

стояние между точками круга равно диаметру, то блок управления из массива результатов выбирает максимальное значение, которое равно диаметру обечайки. Далее блок управления отключает режим сканирования и дальномер, включает механизм перемещения 5, каретка устанавливается в новой точке контура профиля, затем процесс измерения диаметра повторяется. После измерения диаметров во всех точках контура с помощью блока управления строится профилограмма поперечного сечения детали, т. е. регистрация формы [10–12].

### Метрологический анализ метода измерения

Для проведения метрологического анализа в качестве объекта исследования была использована модель обечайки с овальной формой поперечного сечения, поскольку согласно технологии производства данная форма сечения преобладает в реальных обечайках. Кроме того, овальная форма является центрально-симметричной и удобна для исследования.

Анализ метода проводился методом компьютерного моделирования. На первом этапе задавалась величина овальности  $a = 2(D_{\max} - D_{\min}) / (D_{\max} + D_{\min})$ , где  $D_{\max}$

и  $D_{\min}$  — большой и малый диаметры сечения. Далее моделировалось измерение с регистрацией положения измеряемого диаметра. Поскольку форма поперечного сечения модели не является окружностью, то возможны погрешности, которые определялись по смещению диаметра относительно центра (рис. 2).

Из рис. 3 следует, что с увеличением овальности погрешности увеличиваются. Была определена функциональная зависимость погрешности определения диаметра в зависимости от овальности, из которой следует, что в пределах допуска на овальность погрешность удовлетворяет требованиям технологического процесса [13–15].

### Заключение

Разработан и подвергнут метрологическому анализу бесцентровый метод контроля диаметра и отклонения от круглости крупногабаритных обечаек. Метод основан на прямом измерении диаметра как максимального расстояния между точками внутренней поверхности, что реализует принцип действия, аналогичный штангенциркулю.

Разработанный оптико-электронный прибор обладает простой конструкцией и малыми габаритами по сравнению с контролируемым объектом. Его ключевое преимущество — инвариантность: параметры измерительной схемы (погрешности углового позиционирования) не влияют на точность результата благодаря соблюдению принципов Аббе и инверсии. Установлено, что основным источником погрешности является инструментальная погрешность лазерного дальномера, составляющая 1 мм. Данное значение укладывается в стандартный технологический допуск на диаметр обечайки 1 %. Компьютерное моделирование для обечаек с овальной формой сечения подтвердило, что методическая погрешность, обусловленная отклонением от круглости, находится в допустимых пределах при типичных значениях овальности.

Перспективы дальнейших исследований связаны с адаптацией метода для контроля других геометрических параметров (например, соосности отдельных

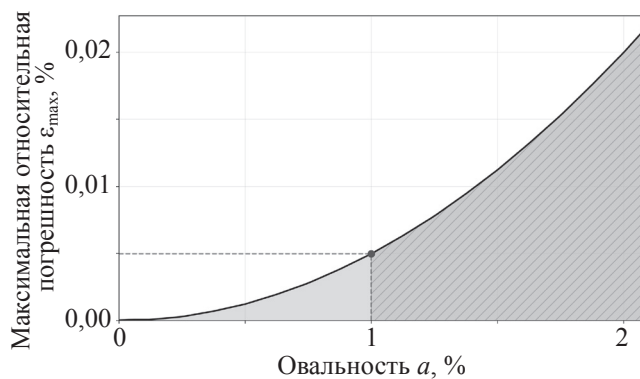


Рис. 3. Зависимость максимальной относительной ошибки ( $\epsilon_{\max}$ ) от степени овальности

Fig. 3. Dependence of the maximum relative error ( $\epsilon_{\max}$ ) vs. the ovality degree

обечаек в собранной конструкции), а также с миниатюризацией устройства и повышением быстродействия системы сканирования. Разработанное устройство может найти широкое применение в технологических

процессах сборки и монтажа крупногабаритного оборудования в атомной, энергетической, нефтегазовой отраслях, аэрокосмической технике и железнодорожном транспорте.

### Литература

1. Берлинер Ю.И., Балашов Ю.А. Технология химического и нефтяного аппаратостроения. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.
2. Шилин А.Н., Петров С.А., Заярный В.П. Автоматизация определения оптимальных условий сборки корпусов нефтегазового оборудования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 6. С. 10–14.
3. Рубинов А.Д. Контроль больших размеров в машиностроении: Справочник. Л.: Машиностроение, 1982. 120 с.
4. Muralikrishnan B., Phillips S., Sawyer D. Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review // Precision Engineering. 2016. V. 44. P. 13–28. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.12.001>
5. Schmitt R.H., Peterek M., Morse E., Knapp W., Galetto M., Härtig F., et al. Advances in Large-Scale Metrology – review and future trends // CIRP Annals. 2016. V. 65. N 2. P. 643–665. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.002>
6. Патент на полезную модель № 240080 U1 Российская Федерация, МПК G01B 11/08. оптико-электронное устройство для измерения размеров обечаек: заявл. 04.08.2025; опубл. 24.12.2025 / А.Н. Шилин, Р.Г. Атаманюк, Е.Ю. Беседин, М.Р. Пастухов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».
7. Петров В. Основы ТРИЗ. Теория решения изобретательских задач. 2-е изд., испр. и доп. Екатеринбург: Издательские решения, 2018. 752 с.
8. Кузнецов В.А., Ялунина Г.В. Общая метрология. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. 268 с.
9. Chen L., Zhang S., Ji S., Chang B., Yu J. Laser scanning system for large diameter measurement // Proceedings of SPIE. 2009. V. 7506. P. 750625. <https://doi.org/10.1117/12.838280>
10. Chen Q., Zhao D., Yang C., Huo Y. Self-triggering pulsed time-of-flight laser range-finding method // Optical Engineering. 2003. V. 42. N 12. P. 3608–3611. <https://doi.org/10.1117/1.1621407>
11. Yang T., Wang Z., Wu Z., Li X., Wang L., Liu C. Calibration of laser beam direction for inner diameter measuring device // Sensors. 2017. V. 17. N12. P. 294. <https://doi.org/10.3390/s17020294>
12. Zhang G.Y., Xu X.P., Fu X.H., Yang L., Li C.Z. The measurement and control of diameter in large-scale part processing // Journal of Materials Processing Technology. 2002. V.129. N 1-3. P. 653–657. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(02\)00675-1](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(02)00675-1)
13. Hu C., Lv F., Xue L., Li J., Zhong X., Xu Y. Full-range static method of calibration for laser tracker // Electronics. 2023. V. 12. N 22. P. 4709. <https://doi.org/10.3390/electronics12224709>
14. Bryan J. International status of thermal error research // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 1990. V. 39. N 2. P. 645–656. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63001-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63001-7)
15. Estler W.T., Edmundson K.L., Peggs G.N., Parker D.H. Large-scale metrology — an update // CIRP Annals. 2002. V. 51. N 2. P. 587–609. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61702-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61702-8)

### Авторы

**Шилин Александр Николаевич** — кандидат технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, 400005, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0004-4893-8812>, [shanvstu@gmail.com](mailto:shanvstu@gmail.com)

**Атаманюк Рамез Ганиевич** — преподаватель, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, 400005, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0000-3123-6524>, [atamanuk17@gmail.com](mailto:atamanuk17@gmail.com)

**Беседин Егор Юрьевич** — студент, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, 400005, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0000-5258-5459>, [egor\\_besedin2004@mail.ru](mailto:egor_besedin2004@mail.ru)

**Пастухов Михаил Романович** — студент, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, 400005, Российская Федерация; стажер, ООО «КНС ГРУПП», Москва, 123376, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0004-1444-307X>, [mikhail.nbox@list.ru](mailto:mikhail.nbox@list.ru)

### References

1. Berliner Yu.I., Balashov Yu.A. *Technology for Chemical and Petroleum Apparatus Engineering*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 256 p. (in Russian)
2. Shilin A.N., Petrov S.A., Zayarny V.P. Automatic definitions of optimization conditions for oil and gas equipment body assembly. *Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making*, 2010, no. 6, pp. 10–14. (in Russian)
3. Rubinov A.D. *Large-Scale Control in Mechanical Engineering: Reference Book*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1982, 120 p. (in Russian)
4. Muralikrishnan B., Phillips S., Sawyer D. Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review. *Precision Engineering*, 2016, vol. 44, pp. 13–28. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.12.001>
5. Schmitt R.H., Peterek M., Morse E., Knapp W., Galetto M., Härtig F., et al. Advances in Large-Scale Metrology — review and future trends. *CIRP Annals*, 2016, vol. 65, no. 2, pp. 643–665. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.002>
6. Shilin A.N., Atamanuk R.G., Besedin E.Yu., Pastukhov M.R. Optical-electronic device for measuring sizes of shells. *Patent RU 240080 U1*, 2025. (in Russian)
7. Petrov V. *Fundamentals of TRIZ. Theory of Inventive Problem Solving*. Ekaterinburg, Izdatel'skie Resheniya, 2018, 752 p. (in Russian)
8. Kuznetsov V.A., Yalunina G.V. *Metrology*. Moscow, IPK Standard Publishing, 2001, 268 p. (in Russian)
9. Chen L., Zhang S., Ji S., Chang B., Yu J. Laser scanning system for large diameter measurement. *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7506, pp. 750625. <https://doi.org/10.1117/12.838280>
10. Chen Q., Zhao D., Yang C., Huo Y. Self-triggering pulsed time-of-flight laser range-finding method. *Optical Engineering*, 2003, vol. 42, no. 12, pp. 3608–3611. <https://doi.org/10.1117/1.1621407>
11. Yang T., Wang Z., Wu Z., Li X., Wang L., Liu C. Calibration of laser beam direction for inner diameter measuring device. *Sensors*, 2017, vol. 17, no.12, pp. 294. <https://doi.org/10.3390/s17020294>
12. Zhang G.Y., Xu X.P., Fu X.H., Yang L., Li C.Z. The measurement and control of diameter in large-scale part processing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol.129, no. 1-3, pp. 653–657. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(02\)00675-1](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(02)00675-1)
13. Hu C., Lv F., Xue L., Li J., Zhong X., Xu Y. Full-range static method of calibration for laser tracker. *Electronics*, 2023, vol. 12, no. 22, pp. 4709. <https://doi.org/10.3390/electronics12224709>
14. Bryan J. International status of thermal error research. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 1990, vol. 39, no. 2, pp. 645–656. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63001-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63001-7)
15. Estler W.T., Edmundson K.L., Peggs G.N., Parker D.H. Large-scale metrology — an update. *CIRP Annals*, 2002, vol. 51, no. 2, pp. 587–609. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61702-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61702-8)

### Authors

**Aleksandr N. Shilin** — PhD, Full Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0004-4893-8812>, [shanvstu@gmail.com](mailto:shanvstu@gmail.com)

**Ramez G. Atamanuk** — Lecturer, Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0000-3123-6524>, [atamanuk17@gmail.com](mailto:atamanuk17@gmail.com)

**Egor Yu. Besedin** — Student, Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0000-5258-5459>, [egor\\_besedin2004@mail.ru](mailto:egor_besedin2004@mail.ru)

**Mikhail R. Pastukhov** — Student, Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation; Intern, KNS GROUP LLC, Moscow, 123376, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0004-1444-307X>, [mikhail.nbox@list.ru](mailto:mikhail.nbox@list.ru)