

СТЕНД КСД-2 ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СКОРОСТИ И ДЛИНЫ

И. В. Алексеев*, Д. С. Замятин

Уральский научно-исследовательский институт метрологии —
филиал Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева,
Екатеринбург, Россия

* alekseeviv.work@gmail.com

Аннотация. Обсуждается текущее состояние в области метрологического обеспечения лазерных и оптических измерителей скорости и длины. Показана актуальность совершенствования эталонной базы для метрологического обеспечения таких средств в соответствии с современными потребностями. Для решения задачи разработан стенд измерения скорости и длины (пройденного пути) КСД-2, позволяющий проводить измерения скорости в диапазоне 0,1–50 м/с и длины в диапазоне 1–99 999 м. Представлено описание конструкции и принципа работы стенда, приведены результаты экспериментального определения его метрологических характеристик. Рассмотрены основные вклады, составляющие доверительные границы относительной погрешности измерения скорости и длины (пройденного пути) стенда КСД-2. Результаты исследования представляют интерес для метрологов, работающих в области измерения механических величин, инженеров-конструкторов, а также производителей и пользователей лазерных и оптических измерителей скорости и длины.

Ключевые слова: эталон, скорость, длина, лазерные датчики, бесконтактные датчики, датчики скорости, измерители скорости

Благодарности: работа выполнена при частичной финансовой поддержке УНИИМ — филиала ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в рамках ОКР „Скорость“; авторы выражают глубокую признательность заведующему отделом метрологии электрических измерений А. А. Ахмееву за предоставление оборудования для экспериментальных исследований, исполняющей обязанности заведующего лабораторией метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля И. С. Цай и М. А. Малыгину за развитие данного направления в деятельности УНИИМ.

Ссылка для цитирования: Алексеев И. В., Замятин Д. С. Стенд КСД-2 для метрологического обеспечения лазерных и оптических измерителей скорости и длины // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 5. С. 435–444. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-435-444.

STAND KSD-2 FOR METROLOGICAL SUPPORT OF LASER AND OPTICAL SPEED AND LENGTH METERS

I. V. Alekseev*, D. S. Zamyatin

Ural Research Institute of Metrology — Branch of the D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology,
Ekaterinburg, Russia

* alekseeviv.work@gmail.com

Abstract. The current state of the art in the field of metrological support for laser and optical speed and length meters is discussed. The relevance of improving the reference base for metrological support of such tools in accordance with modern needs is shown. To solve the problem, the KSD-2 stand for measuring speed and length (distance traveled) is developed, allowing measurements of speed in the range of 0.1–50 m/s and length in the range of 1–99999 m. A description of the design and operation principle of the stand is presented, and experimentally determined metrological characteristics of the stand are given. The main contributions that make up the confidence limits of the relative error in measuring the speed and length (traveled path) of the KSD-2 stand are considered. The results of the study are of interest

to metrologists working in the field of measuring mechanical quantities, design engineers, as well as manufacturers and users of laser and optical speed and length meters.

Keywords: *standard, speed, length, laser sensors, contactless sensors, speed sensors, speed meters*

Acknowledgments: this work was partially financial supported by UNIIM — VNIIM within framework of RTD “Velocity”; authors expresses deep gratitude to Andrey A. Akhmeev, Head of the Department of Metrology of Electrical Measurements, for providing equipment for experimental research, to Irina S. Tsay, Acting Head of the Laboratory of Metrology of Magnetic Measurements and Non-Destructive Testing, and Mikhail A. Malygin for development of this direction in activities of UNIIM.

For citation: Alekseev I. V., Zamyatin D. S. Stand KSD-2 for metrological support of laser and optical speed and length meters. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 5. P. 435–444 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-435-444.

Введение. Измерение скорости и длины является распространенной задачей во многих областях промышленности. Измерители скорости и длины различного типа (роликовые, прижимные, индукционные и др.) используются на производственных линиях для измерения длины прокатного материала или в работе конвейерных весов и дозаторов непрерывного действия для расчета производительности и массы прошедшего груза. Одним из наиболее удобных способов измерений является бесконтактный способ, основанный на применении лазерных и оптических датчиков. Целесообразность применения данного способа обусловлена большой вариативностью монтажа датчиков в рабочую область без необходимости существенного изменения производственной линии с одновременным повышением точности измерений. Например, при аттестации государственного эталона единицы массы 5-го разряда* использовался бесконтактный измеритель скорости и длины ИСД-5, с помощью которого удалось уменьшить относительную погрешность при передачи единицы массы до 0,3 %. Кроме того, бесконтактные измерители скорости и длины являются мобильными, что позволяет легко перемещать их между объектами, где требуется контроль скорости и длины.

В настоящее время наиболее распространены бесконтактные измерители скорости и длины на основе методов доплеровской велосиметрии [1, 2] и пространственной фильтрации [3, 4] (далее — измерители), разработанные в 70-х годах прошлого века. Такие бесконтактные измерители применяются как по прямому назначению [5–9], так и в специфических целях, например, для измерения скорости при взрывных экспериментах [10]. На текущий момент в России Уральский научно-исследовательский институт метрологии — филиал Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург) является основной организацией, осуществляющей метрологическое обеспечение подобных бесконтактных измерителей с помощью „Государственного эталона единицы скорости в диапазоне значений от 0,2 до 50 м/с, единицы длины в диапазоне значений от 1 до 99999 м“ (далее — КСД-1). Следует отметить, что несмотря на наличие эталонов, таких как ГЭТ 189-2014 и ГЭТ 150-2012, в области измерений линейной скорости отсутствуют государственные поверочные схемы и государственные эталоны (за исключением КСД-1).

С помощью КСД-1 успешно проведены испытания бесконтактных измерителей как на основе метода доплеровской велосиметрии, так и на основе метода пространственной фильтрации. Наилучшая точность измерения скорости представленными измерителями характеризуется относительной погрешностью $\pm 0,1$ %, которая сопоставима с погрешностью ранее разработанных измерителей, равной $\pm 0,2$ % [5], однако последние были выполнены в виде крупногабаритных установок и имели ограниченный диапазон измерений в отличие от современных миниатюрных измерителей. Прогресс в этой области привел к увеличению востребованности бесконтактных измерителей с одновременным повышением требований к точности измерений в несколько раз. КСД-1 не в состоянии обеспечить современные потребности пользователей.

* Государственный эталон единицы массы 5-го разряда для весов непрерывного действия с диапазоном измерений массы свыше 100 кг, диапазоном измерения производительности свыше 500 кг/ч, диапазоном линейной плотности от 10 до 250 кг/м (номер 3.1.ZZB.0414.2022 в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений; Росстандарт, 2022.

В связи с этим в УНИИМ был разработан стенд измерения скорости и длины (пройденного пути) КСД-2 (далее — стенд КСД-2), расширяющий технические и метрологические возможности существующего эталона. Основные технические отличия стенда КСД-2 заключаются в установке более функционального мотора, инкрементального энкодера с большим разрешением и контроллера, осуществляющего управление стендом КСД-2, с опцией синхронного измерения скорости и длины и обработки полученной информации.

Цель настоящей статьи — экспериментальное определение действительных метрологических характеристик стенда КСД-2.

Описание стенда КСД-2. Конструктивно стенд КСД-2 состоит из мотора, управляемого контроллером мотора, прецизионного колеса, приводимого в движение мотором, внешнего инкрементального энкодера, контроллера стенда КСД-2 и персонального компьютера с установленным специализированным программным обеспечением (рис. 1). Мотор, прецизионное колесо и внешний энкодер установлены на одном валу. В основу работы стенда КСД-2 положен принцип имитации движения поверхности с помощью вращающегося колеса.

Работа стенда КСД-2, структурная схема которого представлена на рис. 2, осуществляется следующим образом. С помощью специализированного программного обеспечения на компьютере задаются параметры измерений: скорость, длительность измерений, задержка перед измерениями. Соответствующий запрос отправляется в контроллер стенда КСД-2, где происходит преобразование запроса в команды контроллера мотора. Контроллер мотора осуществляет функции управления и отслеживания параметров работы мотора. Мотор стенда КСД-2 приводит в движение прецизионное колесо и позволяет с высокой стабильностью поддерживать скорость колеса в диапазоне от 0,1 до 50 м/с. Здесь и далее за скорость прецизионного колеса принята линейная скорость вращения (V). Поддержание заданной скорости производится в автоматическом режиме контроллером мотора, который непрерывно получает сигнал с внутреннего энкодера мотора с разрешением

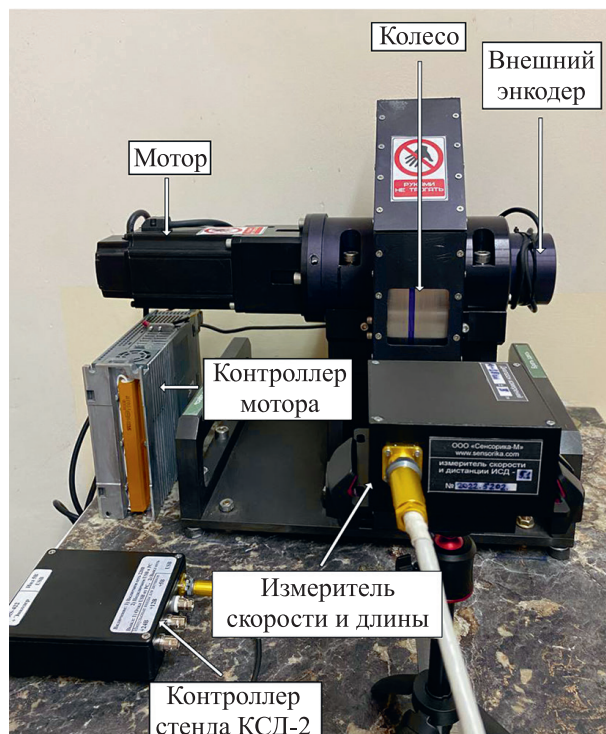


Рис. 1

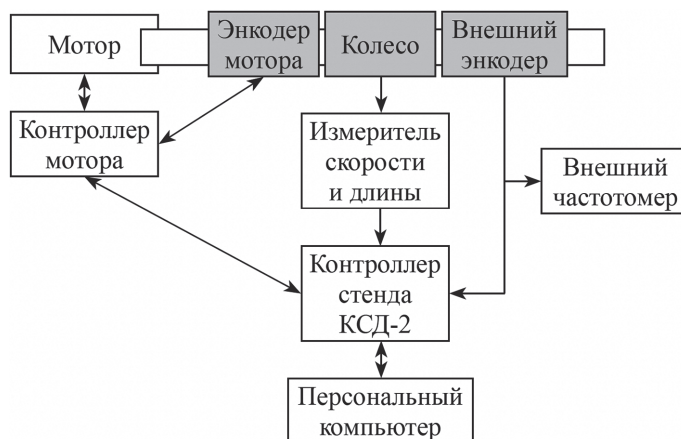


Рис. 2

3000 имп/об. Прецизионное колесо с номинальной длиной окружности, равной 1 м, служит для хранения, воспроизведения и передачи единицы длины: внешний инкрементальный энкодер имеет разрешение 10 000 имп/об (в два раза выше, чем в КСД-1), которое с учетом длины окружности колеса может быть представлено в единицах длины — импульсы/метр. Передача единицы скорости осуществляется косвенным способом путем подсчета количества импульсов, сгенерированных энкодером за 1 с, и пересчета количества импульсов в единицу длины. Дискретность отсчета интервала времени составляет 10 мкс. Длина (пройденный путь) рассчитывается путем интегрирования скорости за время измерений. Передача единицы скорости и единицы длины лазерным и оптическим измерителям скорости и длины осуществляется методом сличения показаний стенда КСД-2 и контролируемого измерителя. Для этого импульсный выход контролируемого измерителя подключается к контроллеру стенда КСД-2, который производит подсчет количества импульсов и пересчет в единицу скорости и единицу длины. Получение сигнала с внешнего энкодера стенда КСД-2 и измерителя скорости и длины происходит одновременно. По завершении измерения на персональном компьютере создается файл с параметрами и результатами измерений.

Методика эксперимента и использованное оборудование. Опорные значения скорости и длины (пройденного пути) стенда КСД-2 определялись косвенным способом с помощью внешнего частотомера и микрометра. Опорным значениям соответствуют независимо определенные значения скорости прецизионного колеса и воспроизведенной длины (пройденного пути) стендом КСД-2 — эти значения являются основой для сравнения с показаниями стенда КСД-2. Микрометр и частотомер обеспечивают метрологическую прослеживаемость соответственно к ГЭТ 2-2021 и ГЭТ 1-2022 согласно локальной поверочной схеме для стенда КСД-2, утвержденной УНИИМ. Используемые средства измерений поверены.

Для проведения экспериментов использовалось следующее оборудование:

- частотомер электронно-счетный АКИП-5102, диапазон измерения количества импульсов от 1 до 10^{18} , пределы допускаемой абсолютной погрешности ± 1 импульс;
- микрометр Micron мод. МКЦ, диапазон измерения от 300 до 400 мм, пределы допускаемой абсолютной погрешности ± 9 мкм.

Контроль длины окружности прецизионного колеса. С помощью микрометра измерялся диаметр прецизионного колеса в пяти сечениях (примерно через каждые 35°). Действительная длина окружности прецизионного колеса вычислялась по формуле

$$l_d = \pi \sum_{m=1}^5 D_m / 5, \quad (1)$$

где D_m — диаметр прецизионного колеса в m -й точке.

Контроль скорости. Для определения метрологических характеристик измерения скорости с помощью специального переходника сигнал с внешнего энкодера стенда КСД-2 дублировался и один из выходов подключался к частотомеру в режиме измерения количества импульсов. После этого одновременно запускались измерения количества импульсов с помощью частотомера и скорости с помощью стенда КСД-2.

При скорости 0,1 м/с внешний энкодер стенда генерирует 1000 имп/об, поэтому относительная погрешность частотомера при этой скорости равна 0,1 %. Чтобы обойти это ограничение, измерения количества импульсов и скорости в диапазоне скоростей 0,1 ... 1 м/с производились в течение 10 с. Единичный результат измерения опорной скорости (определенной с помощью частотомера) вычислялся по формуле

$$V_{i, \text{on}} = \frac{N_i l_d}{\tau r}, \quad (2)$$

где N_i — единичный результат измерения количества импульсов, τ — время измерений, r — разрешение внешнего энкодера стенда КСД-2 (10 000 имп/об).

За единичный результат измерения скорости стендом КСД-2 принималось среднее арифметическое из измерений скоростей за 10 с. Такие пары измерений проводились 10 раз, за результат измерений принималось среднее арифметическое из 10 единичных измерений. При скорости свыше 1 м/с измерения частотомером и стендом проводились один раз в секунду. Единичное значение опорной скорости вычислялось по формуле (2), где $\tau = 1$ с. За результат измерений опорной и измеренной стендом скорости принималось среднее арифметическое из 10 измерений.

В табл. 1 представлены составляющие погрешности, доверительные границы относительной погрешности результата измерений и формулы, по которым они вычислялись. Следует отметить, что так как измерения скорости с помощью частотомера и стенда происходят одновременно и в одинаковых условиях, случайная составляющая, в основном связанная с нестабильностью поддержания скорости, для этих двух величин одинакова. Вследствие того, что случайные вклады одинаковы, при вычислении смещения (разности между опорным и измеренным значениями) они взаимокompенсируются. Поэтому вычислялось смещение единичных результатов измерений скорости от опорного значения, а случайная составляющая измерений выражена в виде среднеквадратического отклонения (СКО) смещений.

Таблица 1

Характеристика	Формула	Пояснение
Пределы допускаемой относительной погрешности частотомера	$\delta_{\text{ч}} = \max\left\{\frac{1}{N}100\right\}$	N_i — единичный результат измерения количества импульсов
Пределы допускаемой относительной погрешности микрометра	$\delta_{\text{м}} = \frac{0,000009}{l_{\text{д}}}100$	$l_{\text{д}}$ — действительная длина окружности прецизионного колеса, м
Погрешность индикации	$\delta_d = \frac{d}{2} \frac{100}{V_{\text{КСД}}}$	d — дискретность показаний стенда, м/с; $V_{\text{КСД}}$ — результат измерения скорости стендом КСД-2, м/с
Смещение	$\Delta_i = \frac{V_{i, \text{КСД}} - V_{i, \text{оп}}}{V_{i, \text{оп}}}100,$ $\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n}$	$V_{i, \text{КСД}}$ — единичный результат измерения скорости стендом КСД-2, м/с; $V_{i, \text{оп}}$ — единичный результат измерения опорной скорости, м/с; Δ_i — единичное смещение измеренной стендом КСД-2 скорости от опорного значения, %; n — количество измерений
Доверительные границы неисключенной систематической погрешности	$\theta = 1,1\sqrt{\delta_{\text{ч}}^2 + \delta_{\text{м}}^2 + \delta_d^2 + \Delta^2}$	—
Среднеквадратическое отклонение	$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \Delta)^2}{n(n-1)}}$	—
Доверительные границы относительной погрешности	$\delta = \frac{tS + \theta}{S + \theta/(1,1\sqrt{3})} \sqrt{S^2 + \left(\frac{\theta}{1,1\sqrt{3}}\right)^2}$	t — коэффициент Стьюдента при $P = 0,95$ и $n - 1$ степеней свободы

Контроль длины (пройденного пути). Для определения метрологических характеристик измерения длины (пройденного пути) дублированный выход внешнего энкодера стенда КСД-2 подключался к частотомеру в режиме измерения количества импульсов. С помощью программного обеспечения стенда КСД-2 задавались минимальная длина (L) и соответствующие параметры стенда согласно табл. 2. Одновременно запускались измерения количества импульсов с помощью частотомера и длины (пройденного пути) с помощью стенда КСД-2. Спустя установленное время измерения после остановки стенда считывались показания стенда и частотомера. Единичный результат измерения опорной длины (определенной с помощью частотомера) вычислялся по формуле

$$L_{i, \text{оп}} = \frac{N_i l_{\text{д}}}{r}. \quad (3)$$

Таблица 2

Заданная длина L , м	Скорость прецизионного колеса V , м/с	Время измерения τ , с	Количество единичных измерений n
1	0,1	10	10
100	10	10	10
10 000	25	400	5

Измерения повторялись в соответствии с табл. 2. За результат измерений принималось среднее арифметическое единичных измерений. Алгоритм расчета составляющих погрешности и доверительных границ относительной погрешности результата измерений полностью аналогичен алгоритму при контроле скорости (см. табл. 1).

Результаты измерений и обсуждение. На основе результатов измерений диаметра прецизионного колеса действительное значение длины окружности прецизионного колеса $l_d = 1,000000$ м. СКО результата измерения длины окружности колеса l_d составляет 0,0003 %, что пренебрежимо мало и не учитывается в дальнейших расчетах, а погрешность микрометра учитывается при расчете доверительных границ неисключенной систематической погрешности (см. табл. 1).

На рис. 3, а представлены составляющие доверительных границ неисключенной систематической погрешности θ (далее — НСП) при измерении скорости; вклад каждой составляющей НСП показан на рис. 3, б. На основе анализа полученных данных можно выделить три области по влиянию составляющих НСП: в диапазоне скоростей 0,1...0,3 м/с основной вклад в НСП (C_θ) вносит погрешность частотомера $\delta_{\text{ч}}$, в диапазоне 0,3...1 м/с — погрешность микрометра $\delta_{\text{м}}$, а в диапазоне 5...50 м/с — смещение и погрешность микрометра. Следует отметить, что для последнего диапазона наблюдаемое смещение практически не меняется и приблизительно равно $-0,005$ %. На данный момент не совсем ясен источник этой систематической погрешности. Вероятно, это связано с тем, что высокочастотный сигнал с внешнего энкодера подключается напрямую к частотомеру, что может сопровождаться электрическими помехами, тогда как в контроллере стенда КСД-2 сигнал фильтруется от электрических помех. Как следствие, частотомер начинает измерение раньше, что приводит к сдвигу интервала счета импульсов между частотомером и стендом. Однако показания частотомера и стенда фиксировались с помощью видеосъемки, и расхождения в индикации результатов измерений не наблюдалось. Тем не менее СКО единичных смещений в диапазоне скоростей 5...50 м/с пренебрежимо мало (см. рис. 4), поэтому измерения все еще можно считать одновременными.

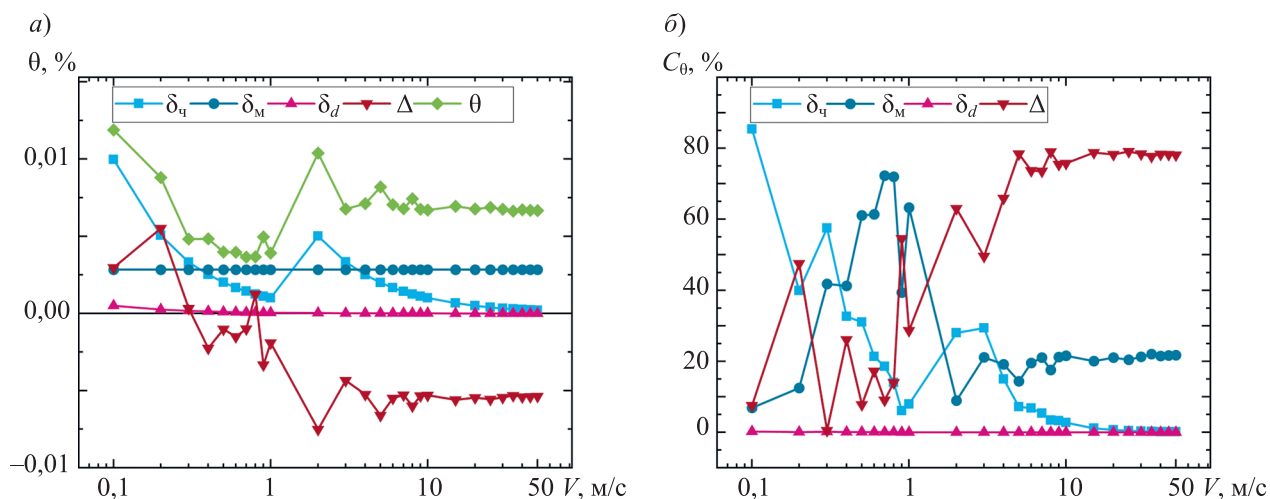


Рис. 3

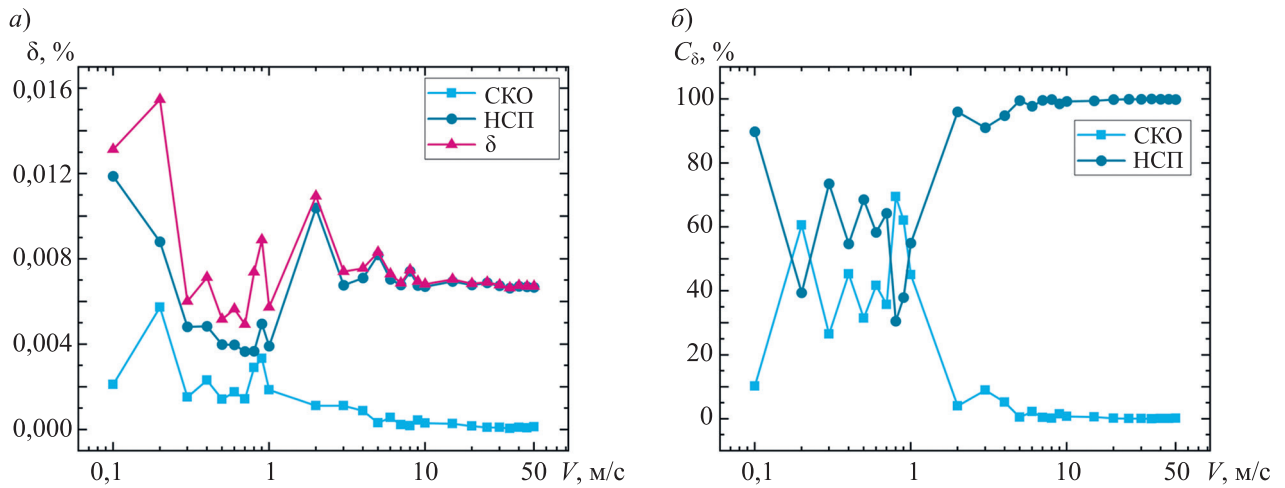


Рис. 4

На рис. 4, *a* представлены составляющие доверительных границ относительной погрешности δ результата измерения скорости, а на рис. 4, *б* — их соотношение. В диапазоне скоростей 0,1...1 м/с вклады (C_δ) НСП и СКО сопоставимы, при скорости свыше 1 м/с СКО становится пренебрежительно мало и основной вклад вносит НСП. Поэтому при устранении смещения, которое обусловлено методом измерения и вносит основной вклад в НСП, доверительные границы относительной погрешности измерений скорости стендом КСД-2 при скорости свыше 1 м/с могут быть увеличены до значений порядка 0,003 %.

Результаты определения метрологических характеристик измерения длины (пройденного пути) представлены в табл. 3. Наибольшее значение погрешности S наблюдается при минимально заданной длине. Это, как было упомянуто выше, связано с погрешностью частотомера, которая вносит большой вклад в НСП при малом количестве измеренных импульсов. При большей длине влияние частотомера пренебрежимо мало и основной вклад вносит погрешность микрометра. Примечательно, что СКО при $L > 1$ м значительно меньше, чем при измерениях скорости. Это связано с тем, что при измерении длины (пройденного пути) измерения количества импульсов и скорости производились в течение всего времени работы стенда: от начала движения колеса до его полной остановки. Таким образом, отсутствуют возможные сдвиги интервала времени измерений, что также выражается в практически нулевом отклонении измеренной длины от опорного значения.

Таблица 3

Заданная длина L , м	S , %	$\delta_{\text{ч}}$, %	$\delta_{\text{м}}$, %	$\delta_{\text{д}}$, %	Δ , %	θ , %	δ , %
1	0,003	0,009	0,0028	0,0000	-0,0034	0,011	0,017
10	0,0001	0,0001	0,0028	0,0000	-0,0001	0,003	0,003
10000	0,0000	0,0000	0,0028	0,0000	0,0000	0,003	0,003

Сравнение стенда КСД-2 с зарубежными аналогами и его практическая значимость.

Зарубежные аналоги систем для метрологического обеспечения лазерных и оптических измерителей скорости, в основе которых лежат методы доплеровской велосиметрии или пространственной фильтрации, имеют различные технические реализации, но базируются на принципиально одинаковом методе — имитации движения поверхности.

Важно отметить, что в зарубежных аналогах нормируется неопределенность результата измерений скорости. Несмотря на то, что алгоритмы расчета неопределенности и доверительных границ погрешности результата измерений различаются, как правило, результирующая расширенная неопределенность и доверительные границы погрешности отличаются друг от

друга незначительно, поэтому полученные метрологические характеристики стенда КСД-2 могут быть сопоставлены с метрологическими характеристиками зарубежных аналогов. Также следует отметить, что длина зачастую вычисляется как интеграл скорости по времени измерений, поэтому зарубежные аналоги нормируются только по диапазону воспроизводимых и измеряемых скоростей. Наиболее близкие по конструкции и принципу действия аналогичные системы представлены в работах [11, 12], где в качестве поверхности используется торец цилиндра или диска, а параметры вращения контролируются энкодером. В работах [13, 14] также в качестве имитируемой поверхности используется торец диска, однако в исследовании [13] его скорость контролируется другим лазерным измерителем скорости, а в [14] плоскость диска имеет перфорации, через которые проходит луч отдельно установленного лазера, направленного на светочувствительный датчик. Контроль скорости в этом случае осуществляется на основе частоты сигнала, генерируемого светочувствительным датчиком. Установка для контроля скорости, представленная в работах [15, 16], также оснащена системой, содержащей лазер и светочувствительный датчик, между которыми помещен диск с двумя отверстиями. Особенность этой установки заключается в том, что диск вращается в горизонтальной плоскости, а луч контролируемого измерителя скорости направлен на светоотражающую тонкую проволоку, расположенную перед оптической ловушкой (выемка на диске), минимизирующей нежелательные отражения. Авторы работы [17] предлагают совершенно другой подход к определению метрологических характеристик измерителей скорости: в качестве имитируемой поверхности используется не торец, а плоскость диска, на которой расположена прорезь. В данном случае скорость зависит от координат, куда направлен лазерный луч измерителя скорости относительно центра диска, и контроль скорости осуществляется с помощью светочувствительного датчика, детектирующего луч измерителя скорости, проходящий через прорезь диска.

В табл. 4 представлены технические и метрологические характеристики зарубежных аналогов стенда КСД-2.

Технические и метрологические характеристики разработанного стенда КСД-2, как было сказано, сопоставимы с характеристиками зарубежных аналогов, а при скоростях свыше 5 м/с значительно их превосходят. Основным преимуществом стенда КСД-2 по сравнению с аналогами является синхронность измерений, что позволяет не учитывать нестабильность воспроизведения скорости прецизионного колеса, СКО которой при скоростях от 0,1 до 1 м/с вносит весомый вклад порядка 0,3–0,01 %. Отметим, что предложенные в работах [12, 13, 17] системы являются прототипами. Установка, представленная в [11], крупногабаритная и немобильная. Устройство, используемое в [15, 16], является частью эталонной установки для калибровки средств измерения воздушного потока, разработанной Национальным институтом стандартов и технологий США. Стенд КСД-2 — законченное устройство и благодаря малым габаритам может быть транспортирован и использован в разных лабораториях.

Таблица 4

Аналог-источник	Имитация поверхности	Диапазон скоростей, м/с	Наилучшая расширенная неопределенность, %, $k = 2$, $P = 0,95$
[11]	Торец цилиндра	0–55,5	0,03
[12]	Торец колеса	0,02–10	0,08–0,5
[13]	Торец колеса	0–120 ¹	0,1
[14]	Оптический модулятор	0–32	0,05
[15, 16]	Специальный диск	0,15–40 (0,2–10) ²	1,2–0,32 (0,41)
[17]	Плоскость диска	—	0,24

Примечания:

¹ В основе установки лежит точный доплеровский измеритель скорости с диапазоном измерения скоростей от 0 до 120 м/с.

² В рамках модернизации неопределенность при малых скоростях улучшена.

Тем не менее по сравнению с аналогами стенд КСД-2 ограничен в диапазоне воспроизведения скоростей меньше 0,1 м/с, однако данное ограничение можно обойти, используя в конструкции стенда мотор, оптимизированный для воспроизведения малых скоростей.

Полученные экспериментальные данные использовались для проведения испытаний стенда КСД-2 в целях утверждения типа. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 января 2024 г. № 256 стенд КСД-2 утвержден в качестве типа средства измерений с регистрационным номером 91195-24 и может быть использован в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. В частности, открывается возможность проведения испытаний в целях утверждения типа и проверок лазерных и оптических измерителей скорости и длины (пройденного пути) с пределами допускаемой относительной погрешности измерений 0,06 %, что в 2,5 раза меньше текущих значений.

Заключение. Выполнены экспериментальные исследования стенда измерения скорости и длины (пройденного пути) КСД-2, предназначенного для метрологического обеспечения лазерных и оптических измерителей скорости и длины, основанных на методах доплеровской велосиметрии и пространственной фильтрации. Доверительные границы относительной погрешности измерения скорости в диапазоне 0,1...50 м/с находятся в диапазоне от $\pm 0,015$ до $\pm 0,007$ %, доверительные границы относительной погрешности измерения длины (пройденного пути) в диапазоне 1...99 999 м находятся в диапазоне от $\pm 0,017$ до $\pm 0,003$ %. При скоростях до 1 м/с основной вклад в погрешность измерений вносят частотомер и микрометр, при скоростях выше 5 м/с основной вклад в погрешность вносит смещение, обусловленное, по всей видимости, наличием электромагнитных помех. При измерении минимальной длины (1 м) основной вклад в погрешность измерений вносит частотомер, при более значительной длине — микрометр. Погрешность индикации при всех измерениях пренебрежительно мала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yeh Y., Cummins H. Z. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer // Appl. Physics Letters. 1964. Vol. 4, N 10. P. 176–178.
2. Cummins H. Z., Knable N., Yeh Y. Observation of Diffusion Broadening of Rayleigh Scattered Light // Physical Rev. Letters. 1964. Vol. 12, N 6. P. 150–153.
3. Ator J. T. Image-Velocity Sensing with Parallel-Slit Reticles // JOSA. 1963. Vol. 53, N 12. P. 1416–1422.
4. Aizu Y., Asakura T. Principles and development of spatial filtering velocimetry // Appl. Physics B. 1987. Vol. 43. P. 209–224.
5. Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н. Лазерное устройство для измерения скорости движения поверхностей // Квантовая электроника. 1986. Т. 13, № 12. С. 2442–2446.
6. Gong J. M., Yang H., Lin S. H. et al. Spatial filtering velocimetry for surface velocity measurement of granular flow // Powder Technology. 2018. Vol. 324. P. 76–84.
7. Hosokawa S., Matsumoto T., Tomiyama A. Measurement of bubble velocity using spatial filter velocimetry // Experiments in Fluids. 2013. Vol. 54. P. 1–12.
8. Расстов С. Ф. Оптические и лазерные датчики скорости и длины // Мир измерений. 2018. № 1. С. 12–14.
9. Меледин В. Г., Кротов С. В., Бакакин Г. В. и др. Лазерная доплеровская анемометрия горячего проката // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 175.
10. Беловолов М. И., Вовченко В. И., Канель Г. И. и др. Применение лазерных интерферометрических измерителей скорости во взрывных экспериментах // ЖТФ. 1987. Т. 57, № 5. С. 918–924.
11. Huang R., Nie X., Zhou J. Laser Doppler velocimeter and its calibration system // Measurement. 2019. Vol. 134. P. 286–292.
12. Piccato A., Francese C., Malvano R. A portable rotating disk prototype for LDA calibration // Flow Measurement and Instrumentation. 2014. Vol. 38. P. 54–61.
13. Liu C., Liu J. G., Kennel R. A rotational speed measuring and calibration system based on Laser Doppler velocimetry // XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”, Prague, Czech Republic, Aug. 30 – Sept. 4, 2015 [Электронный ресурс]: <http://www.chenyang-ism.com/2015-IMEKO-ChengLiu.pdf>, 04.05.2024.
14. Terra O., Hussein H. M. Simple and accurate calibration system for Laser Doppler Velocimeters // Optik. 2019. Vol. 179. P. 733–739.

15. Yeh T. T., Hall J. M. Uncertainty of NIST airspeed calibrations// Measurement Science Conf., Anaheim, California, USA, March 10–14, 2008 [Электронный ресурс]: <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/calibrations/2008mscair.pdf>, 04.05.2024.
16. Shinder I. I., Crowley C. J., Filla B. J., Moldover M. R. Improvements to NIST'S air speed calibration service // Flow Measurement and Instrumentation. 2015. Vol. 44. P. 19–26.
17. Shirai K., Ishimura S., Kawanami T., Hirasawa S. Development of a new velocity calibration method for laser velocimetry using multiple scattering points on a single slit aperture // Microsystem Technologies. 2016. Vol. 22. P. 1351–1357.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Игорь Викторович Алексеев

— Уральский научно-исследовательский институт метрологии — филиал Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева, лаборатория метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля; мл. науч. сотрудник;
E-mail: alekseeviv.work@gmail.com

Денис Сергеевич Замятин

— Уральский научно-исследовательский институт метрологии — филиал Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева, лаборатория метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля; заместитель заведующего лабораторией;
E-mail: lab261@uniim.ru

Поступила в редакцию 14.12.2023; одобрена после рецензирования 22.12.2023; принята к публикации 22.03.2024.

REFERENCES

1. Yeh Y., Cummins H. Z. *Applied Physics Letters*, 1964, no. 10(4), pp. 176–178.
2. Cummins H. Z., Knable N., Yeh Y. *Physical Review Letters*, 1964, no. 6(12), pp. 150–153.
3. Ator J. T. *JOSA*, 1963, no. 12(53), pp. 1416–1422.
4. Aizu Y., Asakura T. *Applied Physics B*, 1987, vol. 43, pp. 209–224.
5. Belousov P. Ya., Dubnischchev Yu. N. *Quantum Electronics*, 1986, no. 12(13), pp. 2442–2446. (in Russ.)
6. Gong J. M., Yang H., Lin S. H. et al. *Powder Technology*, 2018, vol. 324, pp. 76–84.
7. Hosokawa S., Matsumoto T., Tomiyama A. *Experiments in fluids*, 2013, vol. 54, pp. 1–12.
8. Rastopov S. F. *Mir izmereniy*, 2018, no. 1, pp. 12–14 (in Russ.).
9. Meledin V. G., Krotov S. V., Bakakin G. V. et al. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no. 2, pp. 175. (in Russ.).
10. Belovolov M. I., Vovchenko V. I., Kanel G. I. et al. *Technical Physics*, 1987, no. 5(57), pp. 918–924 (in Russ.).
11. Huang R., Nie X., Zhou J. *Measurement*, 2019, vol. 134, pp. 286–292.
12. Piccato A., Francese C., Malvano R. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2014, vol. 38, pp. 54–61.
13. Liu C., Liu J. G., Kennel R. *XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry"*, Prague, Czech Republic, August 30–September 4, 2015, URL: <http://www.chenyang-ism.com/2015-IMEKO-ChengLiu.pdf>.
14. Terra O., Hussein H. M. *Optik*, 2019, vol. 179, pp. 733–739.
15. Yeh T. T., Hall J. M. *Measurement Science Conference*, Anaheim, California, USA, March 10–14, 2008, <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/calibrations/2008mscair.pdf>.
16. Shinder I. I., Crowley C. J., Filla B. J., Moldover M. R. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2015, vol. 44, pp. 19–26.
17. Shirai K., Ishimura S., Kawanami T., Hirasawa S. *Microsystem Technologies*, 2016, vol. 22, pp. 1351–1357.

DATA ON AUTHORS

Igor V. Alekseev

— Ural Research Institute of Metrology — Branch of the D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, Laboratory of Metrology of Magnetic Measurements and Non-Destructive Testing; Junior Researcher;
E-mail: alekseeviv.work@gmail.com

Denis S. Zamyatin

— Ural Research Institute of Metrology — Branch of the D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, Laboratory of Metrology of Magnetic Measurements and Non-Destructive Testing, Deputy Head of the Laboratory;
E-mail: lab261@uniim.ru

Received 14.12.2023; approved after reviewing 22.12.2023; accepted for publication 22.03.2024.