

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Научная статья

УДК 53.089.68::681.269.6

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-2-95-106>



Первичная аттестация эталона единицы массы 5-го разряда для поверки конвейерных весов и весовых дозаторов непрерывного действия с повышенной точностью передачи единицы массы

Д. С. Замятин  , А. П. Подшивалов

УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Екатеринбург, Россия

 lab261@uniim.ru

Аннотация: Лаборатория метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля Уральского научно-исследовательского института метрологии – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» в 2021 году разработала и аттестовала эталон единицы массы 5-го разряда. Эталон предназначен для метрологического обеспечения промышленных средств измерений массы – конвейерных весов и дозаторов непрерывного действия.

Однако относительная погрешность аттестованного эталона единицы массы 5-го разряда, равная 0,3 %, позволяла проводить поверку только конвейерных весов и дозаторов непрерывного действия, имеющих погрешность 1 % и более. В то время как значительная часть конвейерных весов и дозаторов непрерывного действия имеет предел погрешности 0,5 %.

Цель работы – снизить погрешность способа передачи единицы массы эталону 5-го разряда с 0,3 до 0,16 %, чтобы допустить применение аттестованных эталонов для передачи единицы массы конвейерным весам и дозаторам весовым непрерывного действия, имеющим погрешность 0,5 %. За основу исследования взята материально-техническая база и математическая модель передачи единицы массы, использованная в 2021 году при аттестации исходного эталона единицы массы 5-го разряда.

Проведен анализ доминирующих влияющих факторов, возникающих при передаче единицы массы от эталона 4-го разряда эталону 5-го разряда, и принят комплекс мер по их минимизации. Доработана математическая модель передачи единицы массы, позволяющая учитывать влияние ненагруженной конвейерной ленты соразмерно ее положению относительно конвейерных весов. Разработано реализующее указанную математическую модель программное обеспечение с повышенной частотой дискретизации и встроенными алгоритмами анализа. Установлен датчик скорости с погрешностью измерения, сниженной до 0,06 %. Настроена механическая стабилизация положения и натяжения конвейерной ленты.

В результате устранения влияющих факторов и доработки математической модели передачи единицы массы удалось провести аттестацию эталона единицы массы 5-го разряда, имеющего расширенную неопределенность (относительную погрешность) 0,16 %. Практическая значимость работы заключается в том, что появилась возможность проводить точное метрологическое обеспечение высокотехнологичного весового оборудования в условиях промышленной эксплуатации.

Ключевые слова: передача единицы эталону, эталон массы, конвейерные весы, весовые дозаторы, эталон массы, математическая модель, метрология и метрологическое обеспечение

Для цитирования: Замятин Д. С., Подшивалов А. П. Первичная аттестация эталона единицы массы 5-го разряда для поверки конвейерных весов и весовых дозаторов непрерывного действия с повышенной точностью передачи единицы массы // Эталоны. Стандартные образцы. 2026. Т. 22, № 2. С. 95–106. <https://doi.org/>

Статья поступила в редакцию 16.03.2026; одобрена после рецензирования 23.04.2026; принята к публикации 25.06.2026.

MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Research Article

Primary Certification of a 5th Class Mass Unit Standard for Verification of Belt Weigher and Continuous Weigh Feeders with Enhanced Accuracy of Mass Unit Transfer

Denis S. Zamyatin  , Aleksey P. Podshivalov

UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Yekaterinburg, Russia
 lab261@uniim.ru

Abstract: In 2021, the Laboratory of Metrology of Magnetic Measurements and Non-Destructive Testing of UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology developed and certified a 5th class mass unit standard. The standard is intended for metrological support of industrial mass measuring instruments – belt weigher and continuous weigh feeders.

However, the relative error of the certified 5th class mass unit standard, equal to 0.3 %, allowed verification only of belt weigher and continuous weigh feeders having an error of 1 % or more. Meanwhile, a significant portion of belt weigher and continuous weigh feeders have an error limit of 0.5 %.

The aim of the work is to reduce the error of the method for transferring the mass unit to the 5th class standard from 0.3 % to 0.16 %, thereby allowing the use of certified standards for transferring the mass unit to belt weigher and continuous weigh feeders with an error of 0.5 %.

The research is based on the material and technical facilities and the mathematical model of mass unit transfer used in 2021 during the certification of the initial 5th class mass unit standard.

An analysis was carried out of the dominant influencing factors arising during the transfer of the mass unit from the 4th class standard to the 5th class standard, and a set of measures was adopted to minimize them. The mathematical model of mass unit transfer was refined to account for the influence of the unloaded conveyor belt proportionally to its position relative to the belt weigher. Software implementing this mathematical model was developed with an increased sampling rate and built-in analysis algorithms. A speed sensor with a measurement error reduced to 0.06 % was installed. Mechanical stabilization of the position and tension of the conveyor belt was adjusted.

As a result of eliminating the influencing factors and refining the mathematical model of mass unit transfer, it became possible to certify a 5th class mass unit standard having an expanded uncertainty (relative error)

of 0.16 %. The practical significance of the work lies in the fact that it is now possible to provide accurate metrological support for high-tech weighing equipment under industrial operating conditions.

Keywords: transfer of the unit to a standard, mass standard, belt weigher, weigh feeders, mass standard, mathematical model, metrology and metrological assurance

For citation: Zamyatin DS, Podshivalov AP. Primary certification of a 5th class mass unit standard for verification of belt weigher and continuous weigh feeders with enhanced accuracy of mass unit transfer. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2026;22(2):95–106. (In Russ.). <https://doi.org/>

The article was submitted 16.03.2026; approved after reviewing 23.04.2026; accepted for publication 25.06.2026.

Введение

Метрологическое обеспечение промышленных средств измерений (СИ) массы, таких как конвейерные весы [1–4] и дозаторы весовые непрерывного действия [5–7], сопряжено с существенными трудностями. Процедура поверки проводится по ГОСТ 8.005–2012¹ и ГОСТ 8.469–2012² с использованием контрольных проб: поскольку вес проб для промышленных СИ достигает десятков тонн, в условиях действующего производства точное выполнение регламентных процедур становится невозможным или экономически нецелесообразным.

Тем не менее, в сфере государственного регулирования обязательно применение только поверенного оборудования. Исключить неудобства при проведении калибровки помогли альтернативные методы [8]. Метрологическое обеспечение измерений больших масс было возможно несколькими способами:

1) методом поверки весов без применения гирь, например при помощи эталонных силоизмерительных машин [9];

2) для конвейерных весов и дозаторов непрерывного действия – методом без применения контрольной пробы [2], т. е. при помощи разработанного и аттестованного в лаборатории метрологии магнитных измерений

и неразрушающего контроля Уральского научно-исследовательского института метрологии – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» эталона единицы массы 5-го разряда³ (далее – ГПС массы).

Однако относительная погрешность упомянутого эталона, равная 0,3 %, позволяла проводить поверку только конвейерных весов и дозаторов непрерывного действия, имеющих погрешность 1 % и более⁴. В то же время многие конвейерные весы и дозаторы непрерывного действия, являющиеся ключевым оборудованием для дозирования сыпучих материалов, часто работают с пределами погрешности 0,5 %.

Описанные обстоятельства наглядно демонстрируют необходимость в модернизации подхода к передаче единицы массы от эталона 4-го разряда к эталону 5-го разряда.

Цель представленного в статье исследования – усовершенствовать метод передачи единицы массы с его апробацией посредством аттестации нового эталона единицы массы 5-го разряда с пределами относительной погрешности в 0,16 %, чтобы согласно ГПС массы при стандартном соотношении 1:3 передавать единицу массы рабочим средствам измерений, имеющим погрешность в 0,5 %.

Для достижения этой цели планируется:

1) проанализировать факторы, влияющие на точность передачи единицы массы от эталона 4-го разряда эталону 5-го разряда:

¹ ГОСТ 8.606-2012 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов.

² ГОСТ 8.469-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Дозаторы автоматические весовые непрерывного действия. Методика поверки.

³ Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений массы : Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 июля 2022 года № 1622.

⁴ В соответствии с ГПС массы, соотношение между пределами допускаемой погрешности применяемого эталона и средства измерений не должно превышать 1/3.

- погрешности программного обеспечения;
- неоднородность конвейерной ленты;
- положение конвейерной ленты;
- настройки измерителя скорости и длины;

2) реализовать комплекс мероприятий по минимизации установленных влияющих факторов;

3) провести первичную аттестацию эталона единицы массы 5-го разряда с откорректированными характеристиками.

Материалы и методы

Анализ влияющих факторов

Программное обеспечение (ПО). Эксперименты по передаче единицы массы от эталона 4-го разряда эталонам 5-го разряда согласно ГПС массы установили, что основная проблема при передаче единицы заключалась в несовершенстве ПО. ПО написано на языке LabView. Его возможности позволяли снимать данные с каждого измерительного канала с частотой 1 Гц. Однако с части датчиков сигналы не успевали приходить даже 1 раз в секунду, и ПО фиксировало полученный сигнал равным 0, что создавало ряд проблем, в том числе – потерю времени, потому что весь эксперимент приходилось начинать заново. **Детальное**

описание исследования дано в разделе статьи «Программное обеспечение».

Графики распределения линейной плотности. Анализ графиков распределения линейной плотности пустой конвейерной ленты и имитаторов линейной плотности от времени установил основной влияющий фактор – неоднородность конвейерной ленты. **Детальное описание исследования дано в разделе статьи «Неоднородность конвейерной ленты».**

Бюджет неопределенности. Анализ бюджета неопределенности установил значительное влияние неопределенности, вызванной применением датчика измерения скорости и длины ИСД-5: наибольшая расширенная относительная неопределенность измерения скорости равняется 0,15 % при $k=2$. **Детальное описание исследования дано в разделе статьи «Измеритель скорости и длины».**

Программное обеспечение

Минимизировать установленные влияющие факторы позволила разработка специализированного программного обеспечения. Представим далее последовательность работы.

Первая версия ПО, написанного на LabView (рис. 1), имела ряд ограничений:

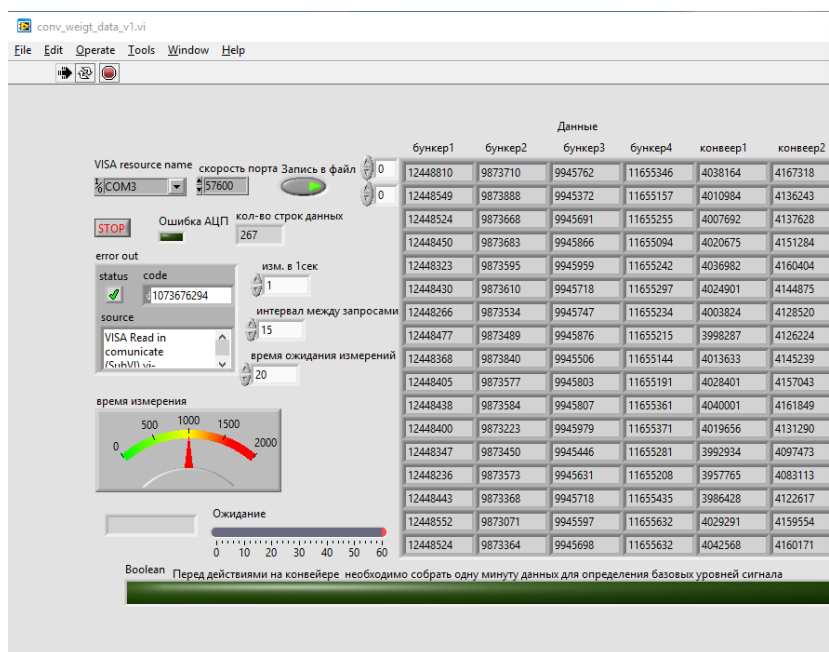


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 1. Внешний вид ПО, написанного на LabView

Fig. 1. Appearance of the software written in LabView

1) частота дискретизации не превышала 1 Гц, что приводило к сбоям, например при передаче нулевых кодов требовались повторные эксперименты;

2) ПО только снимало показания с весоизмерительных датчиков, так что анализ данных, их пересчет в единицы массы, вычисление всех необходимых коэффициентов и неопределенностей производило другое ПО.

Устранить указанные ограничения позволило новое специализированное ПО на языке программирования более низкого уровня Python (рис. 2).

Основные особенности разработанной версии ПО:

– стабильное получение данных с весоизмерительных датчиков с регулируемой частотой, превышающей 30 Гц;

– сохранение данных в.csv файл аналогично формату данных, используемых в прошлой версии ПО;

– возможность проводить автоматические вычисления по математическим алгоритмам непосредственно в ПО с вычислением необходимых параметров и построением графиков для возможности оперативного контроля в случае обнаружения расхождения в данных

при проведении экспериментов (пример проведенного анализа приведен на рис. 3);

– возможность загружать данные из файлов, в т. ч. полученных в старом ПО, и проводить анализ данных (см. предшествующий пункт);

– наличие встроенной системы обнаружения ошибок, позволяющей оперативно выявлять отсутствие сигнала с датчиков в течение 1 сек.

Для валидации модуля проведения анализа данных были проведены вычисления по трем экспериментам (в т. ч. в старой версии ПО и загруженным в новую): в ПО, с использованием формул и вычислений в Excel. Результаты не отличались ни на один знак.

Новая версия ПО значительно повысила скорость и надежность проведения экспериментов и обработки результатов, ни за один последующий эксперимент с датчиков не был получен «нулевой» сигнал, а при обработке сигналов «пустой» конвейерной ленты удалось получить новые закономерности, приведенные далее в статье.

Неоднородность конвейерной ленты

При проведении работ по измерению линейной плотности имитаторов линейной плотности (ИЛП) зависимость линейной плотности от времени представляла собой повторяющиеся

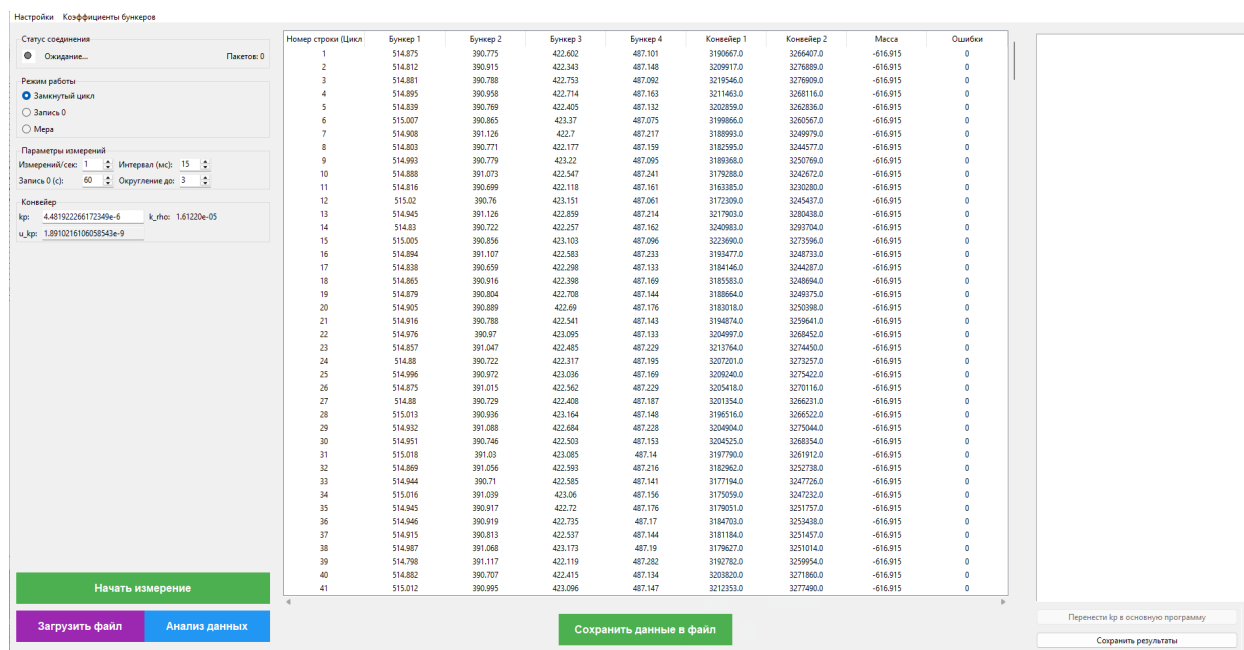


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 2. Внешний вид обновленного ПО для работы с эталоном

Fig. 2. Appearance of the updated software for working with the standard

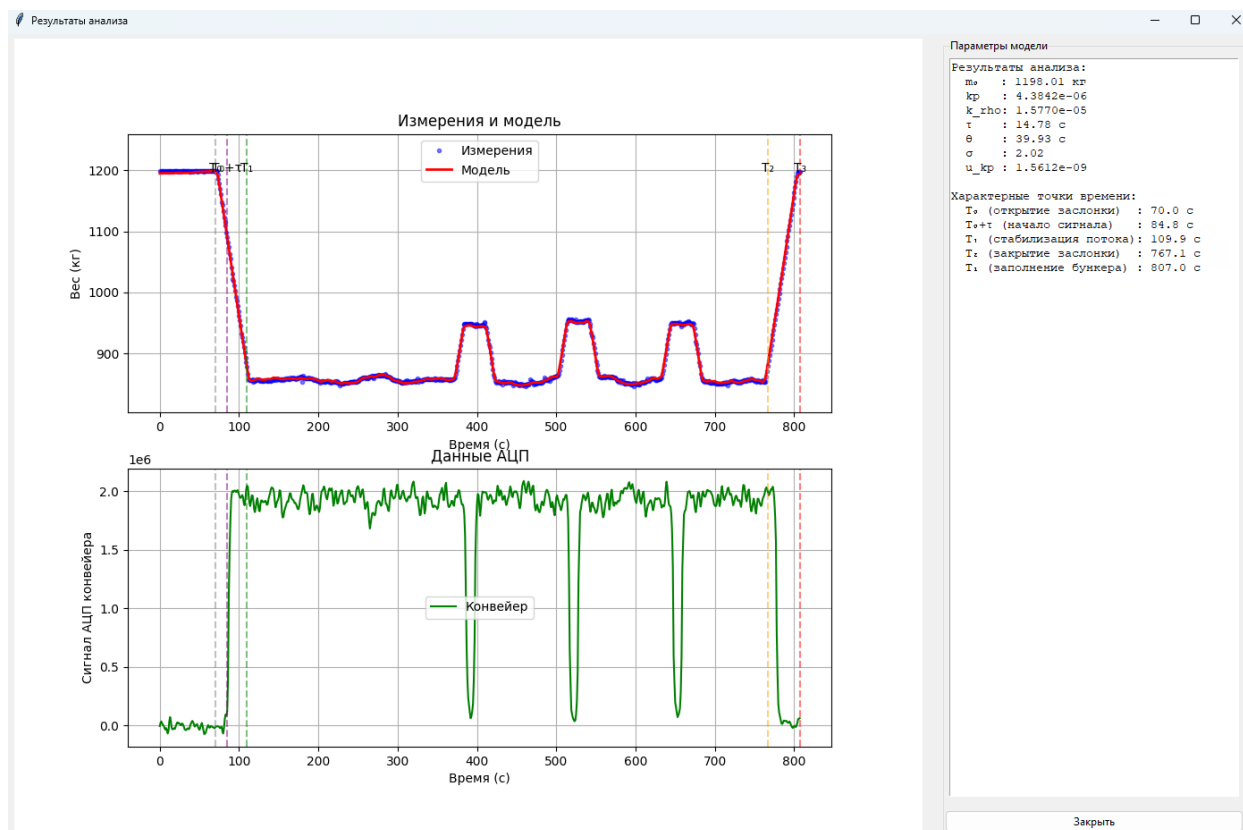


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 3. Пример результата обработки данных

Fig. 3. Example of data processing result

колебания с периодом в 60 сек. (время полного оборота конвейерной ленты). Эскиз обычных значений, получаемых при измерениях, приведен на рис. 4.

Поскольку повтор колебаний происходит каждый оборот конвейерной ленты, самая очевидная гипотеза заключалась в неоднородности

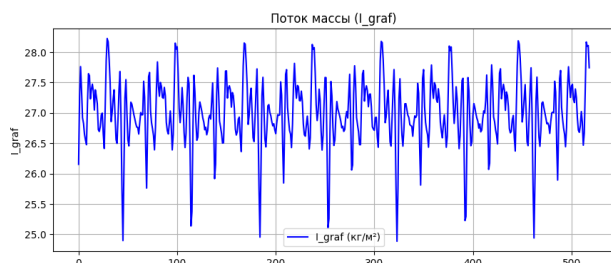


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 4. Зависимость показаний измеренной линейной плотности от времени

Fig. 4. Dependence of measured linear density readings on time

конвейерной ленты. Несмотря на это, при съеме сигналов с весоизмерительных датчиков с использованием старой версии ПО с последующей обработкой график не позволял выявить четко выраженные повторяющиеся колебания. Пример одного из экспериментов приведен на рис. 5.



Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 5. График определения нулевых показаний датчиков АЦП

Fig. 5. Graph for determining zero readings of ADC sensors

Новая версия ПО с повышенной дискретизацией позволила отразить сигналы, которые образовывали явно повторяющиеся колебания (рис. 6).



Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 6. График определения нулевых показаний датчиков АЦП при использовании нового ПО

Fig. 6. Graph for determining zero readings of ADC sensors when using the new software

Анализ графика (рис. 6) привел к выводам:
первый вывод: сигнал имеет явно выраженную периодичность;

второй вывод: сигнал имеет небольшой тренд на снижение пиков, что особенно заметно по верхним экстремумам на промежутках по 60 сек.

Второй вывод будет отдельно проанализирован в следующем пункте влияющих факторов. Что касается периодичности сигнала, то необходимо было решить следующие задачи по устранению данного влияющего фактора:

- 1) вычислить период колебаний;
- 2) вычислить массив данных размером в одно колебание, который будет содержать усредненное значение за все колебания, происходящие при процедуре снятия «нуля»;
- 3) при проведении работ соизмеримо вычесть данные колебания из полезного сигнала.

Решение первой задачи. В первую очередь произвели вычисление среднего значения показаний нуля $\bar{I}_0$ по формуле

$$\bar{I}_0 = \frac{\sum_{t=1}^T I_0(t)}{T}, \quad (1)$$

где T – время записи нулевого сигнала; $I_0(t)$ – сигнал датчиков АЦП в момент времени t .

Точное определение периода провели по методу автоковариации⁵, последовательно вычисляя для каждого коэффициента смещения времени k_t , с, начиная с 1 до $T/2$:

$$R_{I_0}(k_t) = \sum_{t=0}^{T-1-k_t} \left[(I_0(t) - \bar{I}_0)(I_0(t+k_t) - \bar{I}_0) \right], \quad (2)$$

где $\bar{I}_0$ – средние показания конвейерных весов при измерении нуля, ед. АЦП; T – время записи нулевого сигнала; k_t – коэффициент смещения времени.

Значение периода колебаний (который совпал с периодом вращения ленты) T_0 нашли как первый максимум $R_{I_0}(k_t)$.

Решение второй задачи. Сначала определили переменную Ob , за которую взяли целочисленный остаток от деления всего времени измерений (T) на период вращения ленты T_0 .

После произвели вычисление массива данных, который содержит усредненные значения, производя вычисления при j от 0 до T_0 по формуле

$$S_{(j)} = \frac{\sum_{g=0}^{Ob} I_0(j+g \cdot T_0)}{Ob}. \quad (3)$$

Так мы получили общий усредненный по нескольким периодам нулевой сигнал одного оборота конвейерной ленты.

Решение третьей задачи. Полученный сигнал далее вычли из полезных показаний, полученных при измерениях. Для этого вначале определили коэффициент смещения ks по модифицированной формуле (2):

$$R_{IS}(ks) = \sum_{j=0}^{T_0} \left[(S(j) - \bar{S})(I(j+ks) - \bar{I}) \right], \quad (4)$$

где S – массив с усредненными значениями нулевого показания конвейерной ленты, вычисленный по (3), ед. АЦП; I – массив с полезными данными, полученными в результате измерений, ед. АЦП; $\bar{S}$ и $\bar{I}$ – средние значения массивов данных, вычисленные аналогично формуле (1), ед. АЦП.

Для получения достоверного схождения достаточно было проанализировать один оборот

⁵ Берикашвили В. Ш., Оськин С. П. Статистическая обработка данных, планирование эксперимента и случайные процессы : учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры. 2-е изд., испр. и доп. М. : Издательство Юрайт, 2019. 164 с.

конвейерной ленты. Аналогично прошлому шагу получили коэффициент k_s (первое максимальное значение $R_{IS}(k_s)$), благодаря которому можно было провести соразмерное вычитание из полезного сигнала колебаний шума конвейерной ленты.

В качестве демонстрации на рис. 7 показан график измерения линейной плотности от времени при измерении линейной плотности около 77 кг/м.

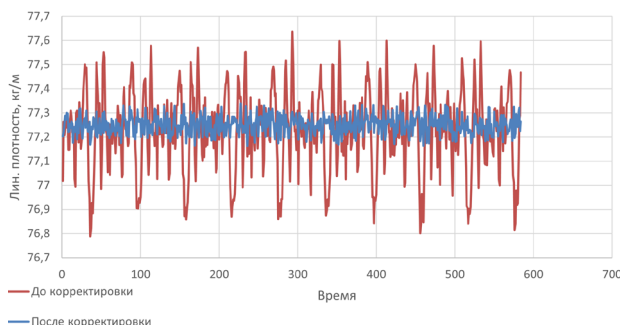


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 7. Полученные результаты измерений линейной плотности МЛПВ-75 в кг/м до и после корректировки

Fig. 7. Obtained linear density measurement results of MLPV-75 in kg/m before and after adjustment

Положение конвейерной ленты

Как было отмечено по результату анализа графика на рис. 6, у «нулевого» сигнала конвейерной ленты имеется тренд на смещение колебаний.

В ходе 10 полных циклов передачи единицы массы тренд по смещению сигналов имел более ярко выраженную форму и был обусловлен смещением ленты:

- под нагрузкой лента смещалась и значительно заходила на правый ограничитель положения ленты;

- на холостом ходу лента смещалась в левый край и заходила на левый ограничитель.

Фотография (рис. 8) фиксирует, как ролики конвейера слева находятся выше роликов справа.

Для решения данной проблемы в течение двух недель проводились:

- регулировка высоты опор роликов в единый уровень на всем основном конвейере;
- настройка положения всех роликов конвейера (кроме первого, формирующего поток

груза из бункера на конвейерной ленте, и последнего, пересыпающего на другой конвейер) в один уровень как слева и справа, так и между каждой парой роликов;

- регулировка винтового натяжения в начале и в конце конвейера;

- установка дополнительных ограничителей конвейерной ленты (одна пара установлена ближе в бункерной части конвейера, другая — около пересыпающего конвейера).

Данные мероприятия позволили стабилизировать положение ленты и исключить соответствующий дрейф сигнала.

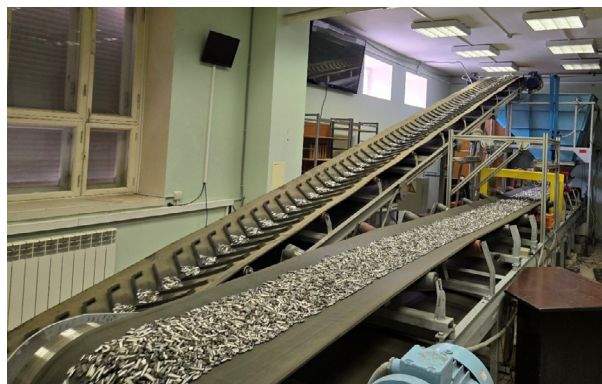
Измеритель скорости и длины

Когда описанные выше факторы были устранены, удалось получить результаты измерения линейной плотности с расширенной неопределенностью ($k=2$), равной 0,2 %. Бюджет неопределенности приведен в табл. 1.

В составе оборудования для передачи единицы массы эталону 5-го разряда использован датчик скорости ИСД-5, расширенная неопределенность которого составляла 0,15 %.

В ходе создания эталонного стенда измерения скорости и длины КСД-2 [10] достигнуты показатели передачи единицы скорости практически в 3 раза точнее (расширенная неопределенность стенда при $k=2$ была снижена с 0,06 до 0,02 %). Это позволило производительно наладить выпуск более точных измерителей скорости и длины ИСД-М (рис. 9).

В результате погрешность (неопределенность) измерения скорости была значительно



Фотография выполнена авторами / The photograph is taken by the authors

Рис. 8. Различное положение роликов

Fig. 8. Different positions of the rollers

Таблица 1. Полученный бюджет неопределенности

Table 1. Obtained uncertainty budget

Параметры	Значения
Линейная плотность, кг/м	52,098
СКО линейной плотности, %	0,05
Неопределенность нахождения k_p , %	0,04
Неопределенность измерения скорости, %	0,075
Неопределенность, связанная с бункерными датчиками ВБК, %	0,017
Стандартная суммарная неопределенность, u_c , %	0,10
Расширенная неопределенность ($k=2$), U , %	0,20

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data



Рисунок заимствован авторами из источника* /
The figure is reproduced from

Рис. 9. Датчик измерения скорости ИСД-М

Fig. 9. ISD-M speed measurement sensor

* ООО «ПТП „СЕНСОРИКА-М”». URL: <https://www.sensorika.com/ru/support/doc/sensorika-m/13-isd-5-rukovodstvo-polzovatelya/file/> (дата обращения: 14.04.2026).

снижена и составила 0,06 %. Это позволило существенно уменьшить вклад скорости в итоговую неопределенность эталона. Данные по бюджету неопределенности по аналогичному эксперименту приведены в табл. 2.

Так было достигнуто целевое значение расширенной неопределенности ($k=2$) менее 0,16 %.

Результаты и обсуждение

В результате реализации описанных мер по минимизации влияющих факторов стало возможным достичь точности передачи единицы массы эталонам 5-го разряда менее 0,16 %. Для апробации результатов была проведена первичная аттестация эталона единицы массы 5-го разряда, состоящего из имитатора линейной плотности МЛПВ (рис. 10).

Таблица 2. Полученный бюджет неопределенности по эксперименту

Table 2. Obtained uncertainty budget from the experiment

Параметры	Значения
Линейная плотность, кг/м	52,089
СКО линейной плотности, %	0,05
Неопределенность нахождения k_p , %	0,03
Неопределенность измерения скорости, %	0,03
Неопределенность, связанная с бункерными датчиками ВБК, %	0,017
Стандартная суммарная неопределенность, u_c , %	0,07
Расширенная неопределенность ($k=2$), U , %	0,14

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data



Фотография выполнена авторами / The photograph is taken by the authors

Рис. 10. Внешний вид МЛПВ

Fig. 10. Appearance of the MLPV

Наибольшее значение относительной погрешности эталона при аттестации составило 0,16%, что позволяет применять эталон для поверки конвейерных весов и дозаторов весовых непрерывного действия, имеющих погрешность 0,5% и более.

Заключение

В ходе исследования проанализированы факторы, которые оказывали влияние на точность передачи единицы массы от эталона 4-го разряда эталону 5-го разряда: погрешности программного обеспечения, неоднородность конвейерной ленты, положение конвейерной ленты, измеритель скорости и длины. Реализован комплекс мероприятий по минимизации установленных влияющих факторов. Проведена первичная аттестация эталона единицы массы 5-го разряда с откорректированными характеристиками.

Обратим внимание, что новое программное обеспечение значительно ускорило проведение работ и позволило обнаружить новую

закономерность в сигнале, возникающем от пустой конвейерной ленты. Благодаря новым данным удалось доработать исходную математическую модель, лежащую в основе передачи единицы массы.

Достигнута цель усовершенствовать метод передачи единицы массы с его апробацией посредством аттестации нового эталона единицы массы 5-го разряда с пределами относительной погрешности в 0,16%, чтобы согласно ГПС массы при стандартном соотношении 1:3 передавать единицу массы рабочим средствам измерений, имеющим погрешность в 0,5%.

Аттестация нового эталона единицы массы 5-го разряда, имеющего наибольшую относительную погрешность 0,16%, дает возможность для эффективного и точного метрологического обеспечения высокотехнологичного весового оборудования непосредственно на местах его эксплуатации в промышленности.

Благодарности: Автор сердечно благодарит за предоставленные конструктивные замечания, способствовавшие улучшению содержания статьи, руководителя научно-исследовательской лаборатории государственных эталонов в области измерений массы и силы ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» И. Ю. Шмигельского, а также уважаемых рецензентов. Автор глубоко признателен сотрудникам лаборатории метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» за помощь в проведении работ. Автор глубоко чтит наследие М. А. Малыгина, основоположника данного направления деятельности. Автор признает фундаментальную значимость математической модели, положенной в основу описанного в статье метода использования эталона единицы массы 5-го разряда, разработанной уважаемыми коллегами С. В. Медведевских, П. М. Ароновым, В. А. Фирсановым.

Все измерения проведены с использованием оборудования УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Acknowledgments: The author sincerely thanks I. Yu. Shmigelsky, Head of the Research Laboratory of State Standards in the Field of Mass and Force Measurements of the

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, as well as the esteemed reviewers, for their constructive comments, which helped improve the content of the article. The author is deeply grateful to the workers of the Laboratory of Metrology of Magnetic Measurements and Non-Destructive Testing of UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology for their assistance in carrying out the work. The author deeply honors the legacy of [M. A. Malygin], the founder of this area of activity. The author acknowledges the fundamental significance of the mathematical model underlying the method described in the article for using the 5th class mass unit standard, developed by respected colleagues S. V. Medvedevskikh, P. M. Aronov, and [V. A. Firsanov].

All measurements were performed using equipment of UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology.

Вклад авторов: Замятин Д. С. – разработка методологии исследования; проведение экспериментов, обработка данных; применение

математических методов для анализа и обобщения данных; написание текста рукописи; подготовка иллюстраций. Подшивалов А. В. – разработка программного обеспечения.

Contribution of the authors: Zamyatin D. S. – development of research methodology; conducting experiments, data processing; application of mathematical methods for data analysis and generalization; writing the manuscript; preparation of illustrations. Podshivalov A. V. – software development.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Conflict of interest: The authors declare no conflicts of interest.

Финансирование: Авторы не получали финансовую поддержку для проведения исследования, авторства и публикации этой статьи.

Funding: The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алмасбаев С. С., Галин И. А. Конвейерные весы как элемент системы управления технологического процесса предприятия // Форум молодых ученых. 2022. № 4 (68). С. 20–25.
2. Результаты исследований нового метода для метрологического обеспечения измерений массы на конвейерных весах / П. М. Аронов [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2020. Т. 16, № 4. С. 5–16. <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-4-5-16>
3. Скрипка В. Л. Корреляционная обработка сигналов – резерв повышения точности работы конвейерных весов // Приборы. 2016. № 11 (197). С. 26–29.
4. Термодинамические условия оптимального взвешивания на конвейерных весах / В. А. Колесников [и др.] // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 1. С. 90–91.
5. Пронин А. Н. Классификация дозирующих устройств и их ключевая роль в производстве // Вестник НГИЭИ. 2023. № 9 (148). С. 43–50. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-9-43-50>
6. Комбинированная система управления дозатора непрерывного действия / А. В. Илюхин [и др.] // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2014. № 2 (37). С. 102–105.
7. Фролов Н. В., Мосина Н. Н., Чилингарян Н. О. Анализ параметров дозатора-смесителя непрерывного действия // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2013. № 2 (26). С. 112–115.
8. Замятин Д. С. Методы калибровки и поверки дозаторов весовых непрерывного действия и конвейерных весов // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 3. С. 107–123. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-3-107-123>
9. Требования к эталонам единицы силы, применяемым для поверки большегрузных весов / И. Ю. Шмигельский [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2022. Т. 18, № 3. С. 5–16. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-3-5-16>
10. Алексеев И. В., Замятин Д. С. Стенд КСД-2 для метрологического обеспечения лазерных и оптических измерителей скорости и длины // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 5. С. 435–444. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2024-67-5-435-444>

REFERENCES

1. Almasbayev SS, Galin IA. Conveyor scales as an element of the control system of the technological process of the enterprise. *Forum molody'x ucheny'x*. 2022;4(68):20–25. (In Russ.).
2. Aronov PM, Medvedevskikh SV, Firsanov VA, Ostrivnoy AF, Shmigelsky IYu, Kotliarov RYu. Results of researches for new method for metrological assurance of mass measurements on conveyor weigher. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2020;16(4):5–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-4-5-16>
3. Skripka VL. Correlation signal processing as a reserve for improving the accuracy of conveyor scales. *Instruments*. 2016;11(197):26–29. (In Russ.).
4. Kolesnikov VA, Yurov VM, Ismailov ZhT, Baysagov Ya Z. Thermodynamic conditions of optimal weighing on conveyor scales. *Modern High Technologies*. 2014;1:90–91. (In Russ.).
5. Pronin AN. Classification of dosing devices and their key role in production. *Bulletin NGIEI*. 2023;9(148):43–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-9-43-50>
6. Iluhin AV, Marsov VI, Kolbasin AM, Dinh AN. Combined control dispenser is continuously action. *Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) Bulletin*. 2014;2(37):102–105. (In Russ.).
7. Frolov N, Mosina N, Chilingaryan N. Analysis of parameters of the batcher mixer of continuous action. *Bulletin of Bashkir State Agrarian University*. 2013;2(26):112–115. (In Russ.).
8. Zamyatin DS. Calibration and verification methods for continuous weighing batchers and conveyor scales. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(3):107–123. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-3-107-123>
9. Shmigelsky IYu, Andreev DV, Ostrivnoi AF, Sychev VV. Requirements for force standards used for verification of heavy scales. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2022;18(3):5–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-3-5-16>
10. Alekseev IV, Zamyatin DS. Stand KSD-2 for metrological support of laser and optical speed and length meters. *Journal of Instrument Engineering*. 2024;67(5):435–444. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2024-67-5-435-444>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Замятин Денис Сергеевич – заместитель заведующего лабораторией метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля, УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ имени Д. И. Менделеева»
620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4
e-mail: lab261@uniim.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0597-9169>

Подшивалов Алексей Павлович – старший инженер лаборатории метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля, УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ имени Д. И. Менделеева»
620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4
e-mail: podshivalovap@uniim.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis S. Zamyatin – Deputy Head of the Laboratory of Metrology of Magnetic Measurements and Non-Destructive Testing, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology
4 Krasnoarmeyskaya st., Yekaterinburg, 620075, Russia
e-mail: lab261@uniim.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0597-9169>

Aleksey P. Podshivalov – Senior Engineer of the Laboratory of Metrology of Magnetic Measurements and Non-Destructive Testing, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology
4 Krasnoarmeyskaya st., Yekaterinburg, 620075, Russia
e-mail: podshivalovap@uniim.ru