

## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

■ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ, КОНЦЕПЦИИ /  
SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL APPROACHES, CONCEPTSDOI: 10.20915/2687-0886-2020-16-4-5-16  
УДК 622.647.2:531.75:53.089.68РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НОВОГО МЕТОДА ДЛЯ  
МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ МАССЫ  
НА КОНВЕЙЕРНЫХ ВЕСАХ© П. М. Аронов<sup>1</sup>, С. В. Медведевских<sup>2</sup>, В. А. Фирсанов<sup>1</sup>, А. Ф. Остривной<sup>2</sup>,  
И. Ю. Шмигельский<sup>2</sup>, Р. Ю. Котляров<sup>2</sup><sup>1</sup> Уральский научно-исследовательский институт метрологии – филиал  
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»  
(УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»), г. Екатеринбург, Россия  
e-mail: AronovPM@uniim.ru<sup>2</sup> ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»  
(ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»), г. Санкт-Петербург, РоссияПоступила в редакцию – 15 августа 2020 г., после доработки – 15 октября 2020 г.  
Принята к публикации – 25 декабря 2020 г.*В статье рассматривается способ калибровки конвейерных весов в лабораторных условиях для использования их в качестве эталонных и последующей передачи от них единицы линейной плотности транспортируемому средству сравнения – мере линейной плотности.**Получены уравнения для описания потока масс в замкнутой системе бункер – конвейер. Разработан алгоритм калибровки эталонных конвейерных весов по результатам измерения массы в бункере в процессе работы замкнутой системы бункер – конвейер, не требующий пропускания через конвейерные весы известной фиксированной массы.**Предложен способ передачи от эталонных конвейерных весов единицы линейной плотности мере линейной плотности с требуемой поверочной схемой точностью.***Ключевые слова:** конвейерные весы, калибровка, поверка, производительность, линейная плотность, статистическая оценка калибровочных коэффициентов, неопределенность**Ссылка при цитировании:**

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. DOI: 10.20915/2687-0886-2020-16-4-5-16

**For citation:**Aronov P. M., Medvedevskikh S. V., Firsanov V. A., Ostrivnoy A. F., Shmigelsky I. Yu., Kotliarov R. Yu. Results of researches for new method for metrological assurance of mass measurements on conveyor weigher. *Measurement standards. Reference materials*. 2020;16(4): 5–16. DOI: 10.20915/2687-0886-2020-16-4-5-16 (In Russ.).

## RESULTS OF RESEARCHES FOR NEW METHOD FOR METROLOGICAL ASSURANCE OF MASS MEASUREMENTS ON CONVEYOR WEIGHER

© Petr M. Aronov<sup>1</sup>, Sergey V. Medvedevskikh<sup>2</sup>, Valeriy A. Firsanov<sup>1</sup>, Aleksandr F. Ostrivnoy<sup>2</sup>,  
Ilya Yu. Shmigelsky<sup>2</sup>, Roman Yu. Kotliarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology, Ekaterinburg, Russia  
e-mail: AronovPM@uniim.ru

<sup>2</sup> D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), Saint Petersburg, Russia

Received – 15 August, 2020. Revised – 15 October, 2020.

Accepted for publication – 25 December, 2020.

*The paper considers the issue related to calibration of conveyor weigher in laboratory environment for its usage as etalon and the subsequent transfer of a unit of linear density from them to the transported means of comparison – the measure of linear density.*

*The equations of the mass flow in instant hopper-conveyor system are got. The algorithm of etalon conveyor weigher calibration is developed on the results of mass measurement in hopper at work process of hopper-conveyor instant system which doesn't require passing a known fixed mass through a conveyor weigher.*

*The transfer way of linear density unit from etalon conveyor weigher to linear density measure with accuracy required by measurement chain is proposed.*

**Key words:** conveyor weigher, verification, productiveness, linear density, statistical estimation of gauge coefficient, uncertainty

### Введение и постановка задачи

Конвейерные весы применяют в различных областях экономики Российской Федерации, в частности, в металлургической промышленности, на угледобывающих предприятиях, в портовых складах. Операции по учету материальных ценностей при торговле, расчет налогов на добычу полезных ископаемых входят в сферу государственного технического регулирования и должны выполняться с применением поверенных конвейерных весов в соответствии с Федеральным законом от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» [1].

В настоящее время Приказом Росстандарта от 29.12.2018 г. № 2818 [2] утверждена новая поверочная схема для средств измерений массы. Поверочная схема предусматривает два способа передачи единицы массы конвейерным весам и дозаторам непрерывного действия. Первый способ основан на применении платформенных весов для статического взвешивания, средств измерения длины, угла и времени. Сравниваются результаты измерения массы груза,

прошедшего через конвейерные весы по ленте транспортера определенной длины за заданный период времени, и результаты измерения массы на платформенных весах. Способ регламентирован в стандарте на методику поверки конвейерных весов ГОСТ 8.005-2002 [3] и требует для своей реализации больших временных затрат, а также является крайне трудоемким. При больших значениях массы возникают практически непреодолимые трудности реализации такого метода. Например, для широко распространенных конвейерных весов с производительностью 8000 т/ч необходимо вручную перевесить 800 т материала при поверке. Второй способ связан с использованием эталона единицы массы пятого разряда в виде эталонных конвейерных весов и транспортируемого средства сравнения.

В качестве транспортируемых средств сравнения можно использовать меры линейной плотности различных конструкций.

Способ применения мер линейной плотности для калибровки конвейерных весов не нов. Однако до сих пор полностью не был решен вопрос об аттестации

таких мер в качестве эталонов. Как правило, оценку линейной плотности меры производители получали расчетным путем на основе моделирования распределения массы меры по ее площади и дальнейшей параметризации модели путем обработки соответствующих результатов измерений характерных геометрических размеров и массы грузов меры. При таком подходе всегда остается не полностью решенным вопрос об адекватности применяемой модели распределения массы меры по ее площади, а также вопрос оценки влияния поведения меры линейной плотности в динамическом режиме на результаты калибровки конвейерных весов в реальных условиях эксплуатации. Одним из возможных подходов к решению этой проблемы является передача единицы линейной плотности мере от эталонных конвейерных весов, откалиброванных в динамическом режиме с помощью рабочих эталонов единицы массы четвертого разряда в виде гирь класса точности M1, что и предусмотрено новой поверочной схемой для средств измерения массы.

Практическая реализация такого способа калибровки конвейерных весов заключается в создании в лабораторных условиях материальной модели реального ленточного конвейера со встроенными эталонными конвейерными весами. В качестве грузов при этом используются сыпучие материалы разной плотности, позволяющие создавать на ленте конвейера поток массы с линейной плотностью в заданном диапазоне. После прохождения конвейерных весов груз взвешивается на откалиброванных весах для статического взвешивания и производится сопоставление результатов измерения массы груза на конвейерных весах и весах для статического взвешивания. Однако этот способ калибровки конвейерных весов связан с теми же трудностями, что и способ поверки конвейерных весов по ГОСТ 8.005-2002.

В настоящей работе рассматриваются новые автоматизированные способы и устройство калибровки конвейерных весов<sup>1</sup> в лабораторных условиях для использования конвейерных весов в качестве эталонных и последующей передачи от них единицы линейной плотности транспортируемому средству сравнения в виде меры линейной плотности.

Устройство представляет собой испытательный стенд и состоит из бункера, наполненного сыпучим грузом, и составного конвейера, предназначенного

для приема материала из бункера и дальнейшей его транспортировки по замкнутому пути обратно в бункер. Бункер оснащен эталонными бункерными весами, а также автоматической бункерной заслонкой, позволяющей регулировать его производительность, то есть величину массы груза, высыпавшегося за единицу времени на конвейер. Конвейер включает в себя основную (измерительную) часть, оборудованную эталонными конвейерными весами, а также вспомогательную загрузочную часть, позволяющую поднять прошедший через конвейерные весы груз обратно в бункер. Стенд оснащен также датчиками для измерения скорости и силы натяжения транспортной ленты основного конвейера, автоматической системой управления и регистрации сигналов датчиков конвейерных и бункерных весов, датчиков скорости и силы натяжения ленты.

Устройство для изменения силы натяжения конвейерной ленты применяется при предварительной регулировке установки направляющих и измерительного роликов в одну плоскость, что исключает влияние силы натяжения ленты на результаты измерений.

Блок-схема и внешний вид стенда представлен на рис. 1, 2.

Данная конструкция стенда позволяет путем выбора ширины открытия заслонки бункера и скоростей движения транспортных лент основного и загрузочных конвейеров получить на основном конвейере непрерывный во времени поток груза со значением линейной плотности в заданном диапазоне (замкнутая система «бункер – конвейер»).

## Теоретическая часть

### Баланс масс в замкнутой системе бункер – конвейер

При открытии бункерной заслонки сыпучий материал из бункера высыпается на движущуюся ленту конвейера и с ее помощью по замкнутому пути через открытый верх вновь попадает в бункер. При этом в сис-

теме возникает поток массы. В бункере это  $\frac{dM}{dt}(t)$ , где

$M(t)$  – масса материала в бункере в момент времени  $t$ . На конвейере поток массы (производительность) характеризуется произведением скорости движения материала на его линейную плотность

$$P(x, t) = v(x, t) \cdot \rho(x, t), \quad (1)$$

где  $x$  – координата точки на конвейере,  $x_1 \leq x \leq x_2$ ,  
 $x_1$  – координата начала конвейера, куда сыплется материал из бункера,

<sup>1</sup> Система, обеспечивающая проведение испытаний и поверку устройства измерения веса, способ проведения испытания и поверки устройства для измерений веса: заявление о выдаче патента РФ на изобретение. РФ; заявл. 23.07.2020 г., № 2020124383.

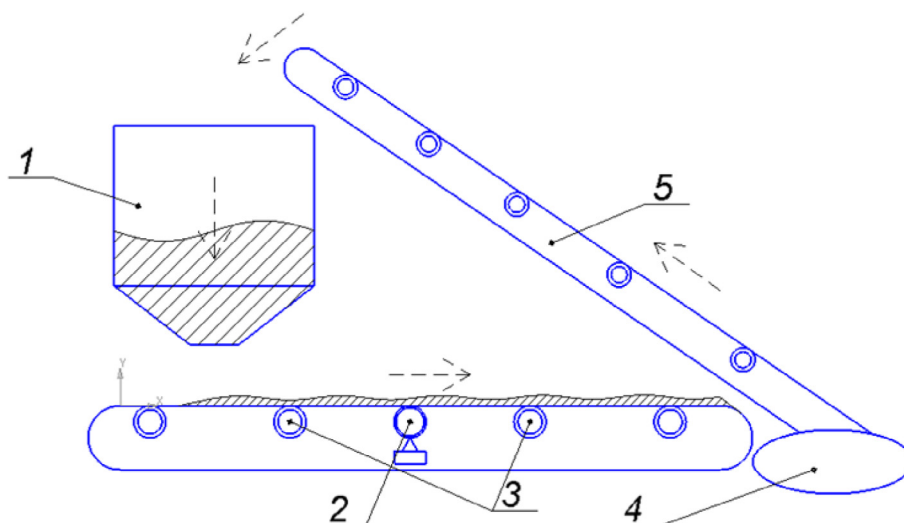


Рис. 1. Блок-схема устройства измерения массы на конвейерных весах  
 1 – бункер,  
 2 – ролик с весоизмерительным датчиком эталонных конвейерных весов,  
 3 – ролики, ограничивающие зону взвешивания материала,  
 4, 5 – транспортные ленты для возвращения материала обратно в бункер.

Fig. 1. Block scheme of mass measurement work system on conveyor weigher  
 1 – bunker,  
 2 – a roller with a weight measuring transducer of a standard conveyor scale,  
 3 – rollers limiting the weighing area of the material,  
 4, 5 – transport belts for returning the material back to the hopper.



Рис. 2. Установка измерения массы на конвейерных весах

Fig. 2. Application of mass measurement on conveyor weigher

$x_2$  – координата конца конвейера, откуда материал высыпается обратно в бункер;

$v(x, t)$  – скорость движения материала,

$\rho(x, t)$  – линейная плотность его массы в точке  $x$  в момент времени  $t$ .

$$\rho(x, t) = \frac{d}{dx} m(x, t), \quad (2)$$

здесь  $m(x, t)$  – масса на конвейере, находящаяся между точками  $x_1$  и  $x$  в момент времени  $t$ .

Потоки массы в начале и в конце конвейера

$$P_1(t) = v(x_1, t) \cdot \rho(x_1, t),$$

$$P_2(t) = v(x_2, t) \cdot \rho(x_2, t), \quad (3)$$

являются потоками на границе бункера.

Закон сохранения массы (по аналогии с законом сохранения электрического заряда) можно сформулировать следующим образом: скорость изменения массы в некотором объеме равна сумме потоков массы на границе этого объема. Поэтому, рассматривая бункер в качестве объема, содержащего массу, получаем

$$\frac{dM}{dt}(t) + P_1(t) - P_2(t) = 0. \quad (4)$$

Пусть первоначально бункерная заслонка закрыта, вся масса  $M_0$  находится в бункере. Если  $T_0$  – момент открытия бункерной заслонки и появления потоков массы, то интегрируя (4), получаем для  $t > T_0$

$$M(t) - M_0 + m_1(t) - m_2(t) = 0 \quad (5)$$

уравнение баланса массы, где

$$m_1(t) = \int_{T_0}^t P_1(t') dt'$$

$$m_2(t) = \int_{T_0}^t P_2(t') dt' \quad (6)$$

массы, прошедшие через начало и конец конвейера соответственно к моменту времени  $t$ .

Отметим, что

$$\Delta m(t) = m_1(t) - m_2(t), \quad (7)$$

есть не что иное, как масса материала, находящегося на конвейере в момент времени  $t$ , поэтому уравнение баланса масс (5) может быть переписано в форме, имеющей прозрачный смысл

$$M(t) + \Delta m(t) = M_0 \quad (8)$$

– суммарная масса в бункере и на конвейере в каждый момент времени равна начальной массе в бункере.

В случае когда скорость движения ленты конвейера не зависит от времени  $v(x, t) = v(x)$ , время движения материала из начала конвейера  $x_1$  до конца  $x_2$  постоянно и равно  $\theta$ , тогда

$$P_2(t) = P_1(t - \theta) \quad (9)$$

и уравнение баланса потоков массы (4) можно записать в виде

$$\frac{dM}{dt}(t) + P(t) - P(t - \theta) = 0, \quad (10)$$

где  $P(t) = P_1(t)$  – поток массы (производительность) в начале конвейера. Соответственно, уравнение баланса масс (5) принимает вид

$$M(t) - M_0 + m(t) - m(t - \theta) = 0. \quad (11)$$

### Уравнение измерений для калибровки конвейерных весов при помощи бункерных весов в замкнутой системе бункер – конвейер

Схематично зависимость показаний бункерных весов  $y(t)$  в кг, а также суммы сигналов АЦП двух датчиков конвейерных весов  $I(t)$  от времени  $t$  представлены на рис. 3.

$T_0$  – момент открытия бункерной заслонки;

$T_0 + \tau$  – момент появления нагрузки на датчиках конвейерных весов;

$T_1 = T_0 + \theta$  – момент появления потока массы через верх бункера;

$T_2$  – момент закрытия бункерной заслонки;

$T_3 = T_2 + \theta$  – момент заполнения бункера до первоначальной массы.

Результаты измерений линейной плотности и потока массы в начале конвейера могут быть представлены в виде

$$\tilde{\rho}(t) = k_p(I(t + \tau) - I_0),$$

$$\tilde{P}(t) = k_p(I(t + \tau) - I_0), \quad (12)$$

где  $I_0$  – сумма кодов АЦП, соответствующая нулевой нагрузке на датчики конвейерных весов;

$$\tau = \frac{l}{v}, \quad (13)$$

– задержка сигналов датчиков конвейерных весов, обусловленная тем, что они находятся на некотором расстоянии  $l$  от начала конвейера;



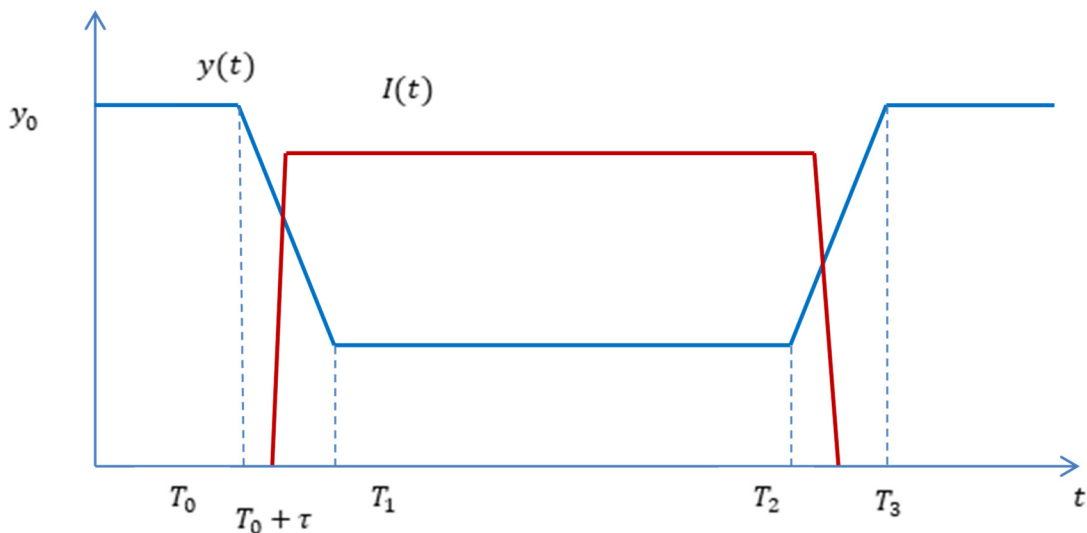


Рис. 3. Зависимость показаний бункерных весов  $y(t)$  в кг, а также суммы сигналов АЦП двух датчиков конвейерных весов  $I(t)$  от времени  $t$

Fig. 3. Relation of hopper weigher results  $y(t)$  in kg and summary of ACD signals of two conveyor weigher detector heads  $I(t)$  from time  $t$

$v$  – скорость ленты основного конвейера, считающаяся постоянной;

$k_p$  – калибровочный коэффициент по линейной плотности, переводящий коды АЦП в кг/м;

$$k_p = v \cdot k_p, \quad (14)$$

– калибровочный коэффициент по производительности, переводящий коды АЦП в кг/с.

Из уравнения баланса масс (11), с учетом (6) и (12), следует уравнение измерений для замкнутой системы бункер – конвейер

$$y(t) - y_0 + k_p[Z(t + \tau) - Z(t + \tau - \theta)] = \Delta(t), \quad (15)$$

Здесь  $y(t)$  – показания бункерных весов в момент времени  $t$ ,

$y_0$  – результат измерений начальной массы в бункере;

$$Z(t) = \int_{T_0}^t I(t') dt', \quad (16)$$

– интегральные показания в кодах АЦП датчиков конвейерных весов в момент времени  $t$ .

$-\Delta(t)$  – суммарная погрешность измерения массы бункерными и конвейерными весами в момент времени  $t$ .

Уравнение измерений (15) может быть использовано для построения статистической оценки  $\hat{k}_p$  калибровочного коэффициента  $k_p$ .

#### Метод наименьших квадратов для оценивания калибровочного коэффициента

Введем для сокращения формул обозначения

$$\Delta y(t) = y(t) - y_0, \\ \Delta Z_{\tau, \theta}(t) = Z(t + \tau) - Z(t + \tau - \theta), \quad (17)$$

тогда уравнение измерений (15) принимает вид

$$\Delta y(t) + k_p \Delta Z_{\tau, \theta}(t) = \Delta(t) \quad (18)$$

Пусть для моментов времени

$$T_0 \leq t_1 < t < \dots < t_{n-1} < t_n \leq T_3$$

погрешности измерений  $\Delta(t_i)$ ,  $i=1, \dots, n$  имеют одинаковую неизвестную дисперсию  $\sigma^2$ . Тогда оценку коэффициента  $k_p$ , а также параметров  $\tau$  и  $\theta$  можно найти из условий минимума квадратичной формы

$$Q(\tau, \theta, k_p) = \frac{1}{n-3} \sum_{i=1}^n [\Delta y(t_i) + k_p \Delta Z_{\tau, \theta}(t_i)]^2 \quad (19)$$

Если  $\hat{\tau}, \hat{\theta}, \hat{k}_p$  – оценки, полученные минимизацией формы (20), то

$$\hat{\sigma}^2 = Q(\hat{\tau}, \hat{\theta}, \hat{k}_p) \quad (20)$$

является оценкой дисперсии погрешностей измерений  $\Delta(t)$ .

Минимизацию формулы (19) можно произвести численно [4]. При этом вычисляется также матрица ковариаций всех трех оценок, что позволяет, в частности, найти стандартную неопределенность  $u(\hat{k}_p)$  оценки калибровочного коэффициента.

На рис. 4 показана одна из реализаций совместных синхронизированных показаний бункерных и конвейерных весов.

Обработка этой реализации сигналов в соответствии с приведенным выше алгоритмом позволила получить численные значения оценок  $\hat{\tau}, \hat{\theta}, \hat{k}_p$  и построить функцию

$$\hat{y}(t) = y_0 - \hat{k}_p \Delta Z_{\hat{\tau}, \hat{\theta}}(t), \quad (21)$$

которая представляет собой оценку показаний бункерных весов, полученную на основе показаний конвейерных весов. Совместное изображение показаний бункерных весов  $y(t)$  и их оценки (22) приведено на рис. 5.

Как видно, качество восстановления показаний бункерных весов по показаниям конвейерных весов, полученных при помощи оценки калибровочного коэффициента  $\hat{k}_p$ , достаточно высоко. Значение оценки СКО  $\hat{\sigma}$  (формула (21)) погрешностей  $\Delta(t)$  из уравнения измерений (15) составило менее двух килограммов или в относительном виде менее 0,25 % от показаний бункерных весов.

#### Передача единицы мере линейной плотности при помощи конвейерных весов

В качестве средства передачи единицы линейной плотности рабочим средствам измерений в эталонном

комплексе используется комплект мер линейной плотности МЛП-10. Внешний вид меры линейной плотности МЛП-10 приведен на рис. 6.

В рамках исследования эталонных конвейерных весов и меры линейной плотности (МЛП) был проведен статистический анализ сигналов  $I_0(t)$  и  $I_1(t)$  датчиков конвейерных весов в динамических режимах ненагруженного основного конвейера (пустая лента) и нагруженного мерой линейной плотности соответственно.

Вид сигналов изображен на рис. 7.

Установлено, что эти сигналы представляют собой стационарные случайные процессы, характеризующиеся постоянными во времени математическим ожиданием и дисперсией. Под сигналом от МЛП понимается среднее по времени значение сигнала датчиков, нагруженных МЛП за вычетом среднего сигнала ненагруженных датчиков  $\bar{I} = \bar{I}_1 - \bar{I}_0$ .

Передача единицы мере линейной плотности включает два типа измерений, а именно:

- оценивание калибровочного коэффициента  $\hat{k}_p$  по результатам измерений, полученных в процессе работы замкнутой системы бункер – конвейер;
- измерение сигнала от МЛП.

Оба типа измерений должны выполняться сразу одно за другим с минимальным разрывом по времени.

В соответствии с (14) оценка калибровочного коэффициента по линейной плотности имеет вид

$$\hat{k}_p = \frac{\hat{k}_p}{V}, \quad (22)$$

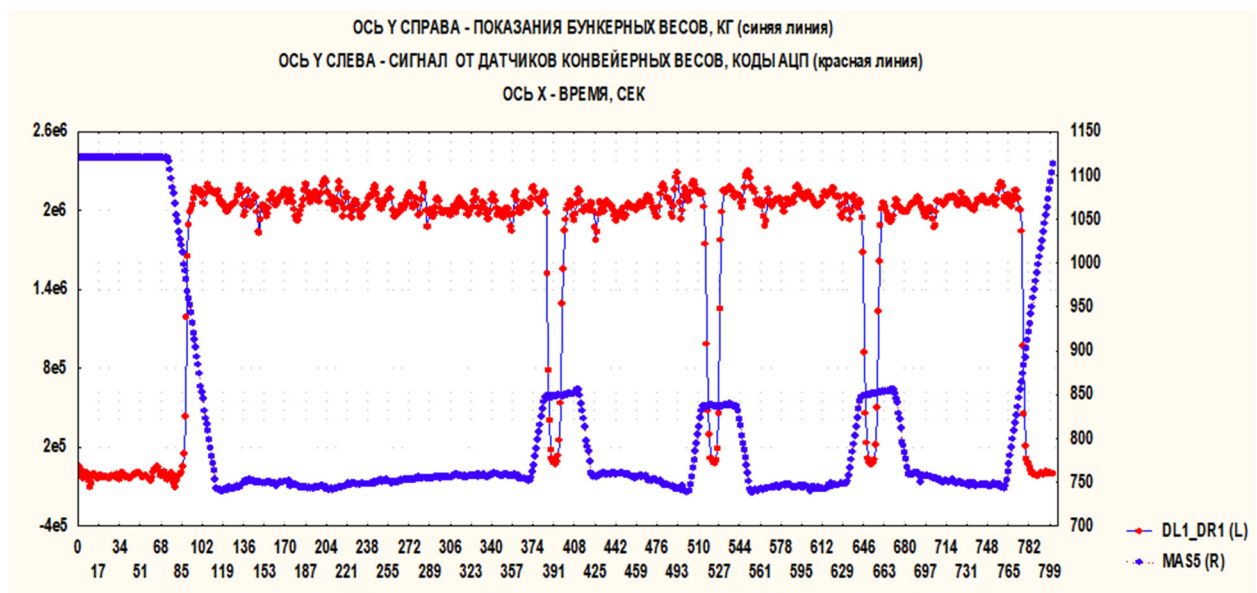


Рис. 4. Синхронизированные показатели бункерных и конвейерных весов

Fig. 4. Synchronized hopper and conveyor weighers data

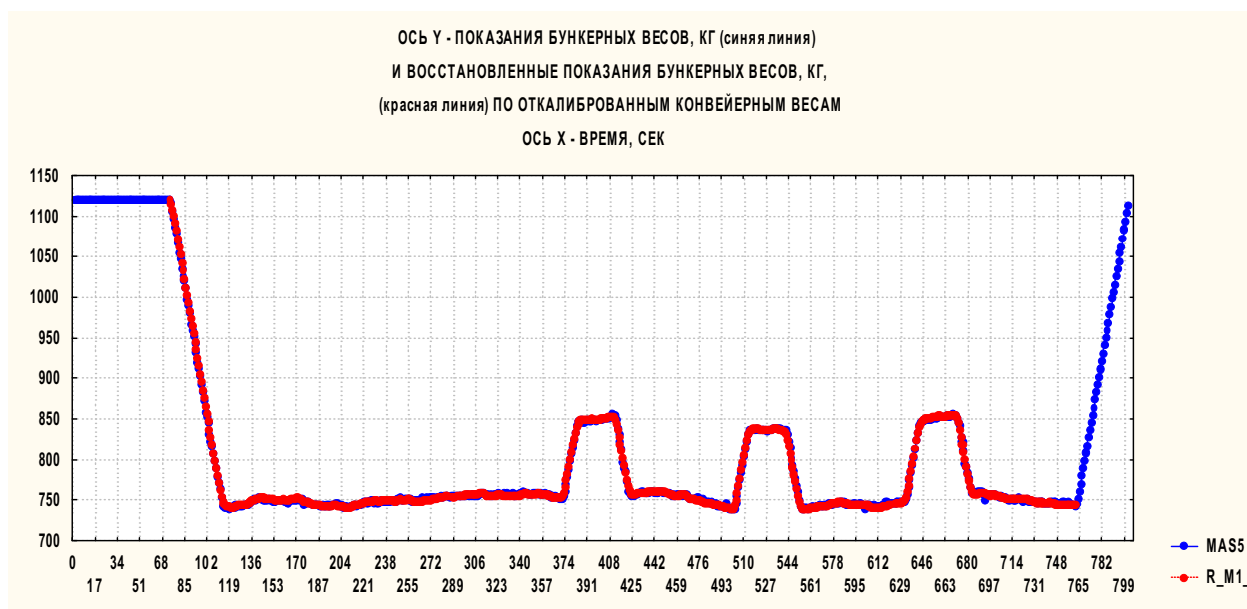
Рис. 5. Совместное изображение показаний бункерных весов  $y(t)$  и их оценки по формуле (22)Fig. 5. Joint scheme of hopper weigher data  $y(t)$  and its estimation based on formulae (22)

Рис. 6. Внешний вид меры линейной плотности МЛП-10

Fig. 6. Linear density measure (MLP-10) complexity

где  $\hat{k}_p$  – МНК-оценка калибровочного коэффициента по производительности,

$\bar{V}$  – среднее значение измерений скорости конвейерной ленты во время работы замкнутой системы бункер – конвейер.

Относительная дисперсия оценки (23):

$$\frac{u^2(\hat{k}_p)}{\hat{k}_p^2} = \frac{u^2(\hat{k}_p)}{\hat{k}_p^2} + \frac{u^2(\bar{V})}{\bar{V}^2}, \quad (23)$$

где  $u^2(\hat{k}_p)$  – дисперсия МНК-оценки  $\hat{k}_p$ , найденная в процессе численной минимизации формы (20),  $u^2(\bar{V})$  – выборочная дисперсия  $\bar{V}$ .

Единица передается мере линейной плотности приписыванием ей значения

$$\hat{\rho} = \bar{I} \cdot \hat{k}_p, \quad (24)$$

Относительная стандартная неопределенность этого значения

$$\frac{u(\hat{\rho})}{\hat{\rho}} = \sqrt{\frac{u^2(\bar{I})}{(\bar{I})^2} + \frac{u^2(\hat{k}_p)}{\hat{k}_p^2}}, \quad (25)$$

где  $u^2(\bar{I})$  – выборочная дисперсия среднего сигнала от МЛП, определенная по реализациям случайных процессов типа, приведенных на рис. 6.

## Результаты

Оценка метрологических характеристик эталонных конвейерных весов и меры линейной плотности

Для повышения точности калибровки конвейерных весов и МЛП были произведены многократные измерения пар калибровочный коэффициент  $\hat{k}_p$  и сигнал от МЛП  $\bar{I}$ . В результате получены выборки для



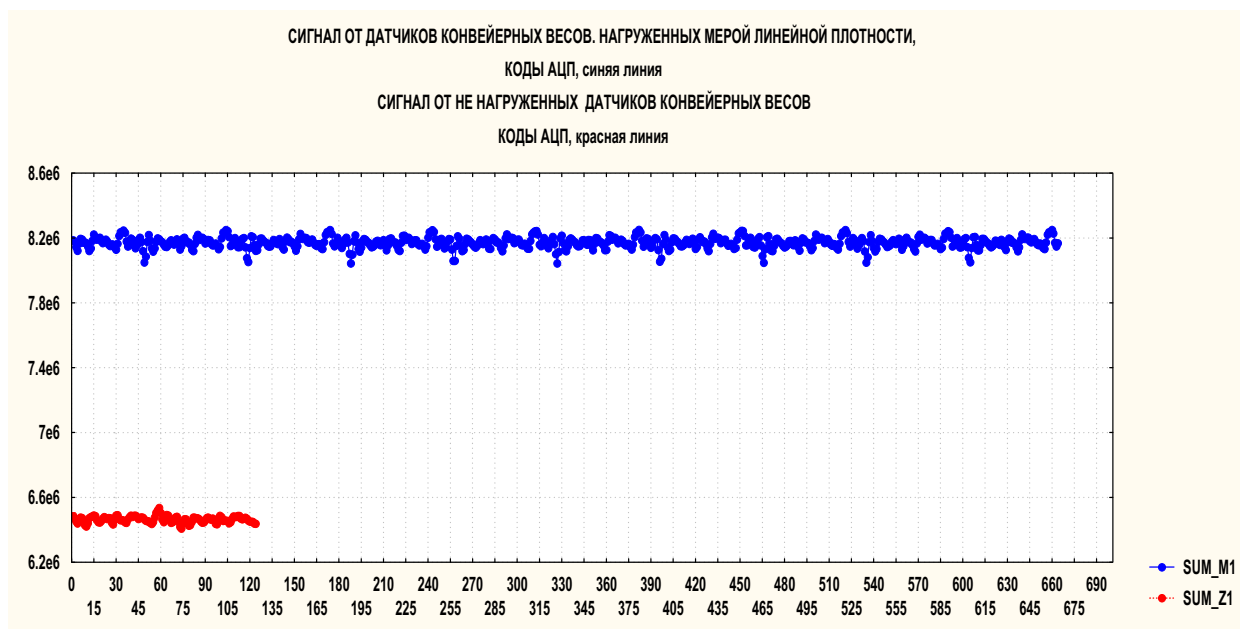


Рис. 7. Сигналы датчиков конвейерных весов, нагруженных мерой линейной плотности (синяя линия) и не нагруженных (красная линия)

Fig. 7. Signals of conveyor weigher detectors loaded (blue line) and don't (red) with linear density measure

значений калибровочного коэффициента  $\hat{k}_\rho$  и меры линейной плотности  $\hat{\rho}$  (25). В качестве результатов измерений выбирались выборочные средние, а в качестве стандартных неопределенностей результатов – СКО выборочных средних. Результаты приведены в табл. 1.

При поверке или калибровке рабочих конвейерных весов масса  $m(t)$ , прошедшая через них за промежуток времени  $t$ , может быть имитирована с помощью лежащей на весо-измерительной площадке меры линейной плотности следующим образом

$$m(t) = \rho \cdot v \cdot t, \quad (26)$$

где  $\rho$  – значение линейной плотности меры,  
 $v$  – скорость конвейерной ленты.

Относительная стандартная или расширенная неопределенность этой массы вычисляется по формуле

$$\frac{u(m)}{m} = \sqrt{\frac{u^2(\rho)}{\rho^2} + \frac{u^2(v)}{v^2} + \frac{u^2(t)}{t^2}} \quad (27)$$

Значения расширенных неопределенностей меры линейной плотности и средства измерения скорости движения конвейерной ленты приведены в табл. 1. Относительная расширенная неопределенность результата измерения промежутка времени  $t$ , например секундомером, может быть сделана достаточно малой за счет увеличения этого промежутка. Как видно, относительная расширенная неопределенность результата измерения массы может быть сделана меньшей 0,3% и, следовательно, могут быть выполнены требования, предъявляемые к эталонной установке поверочной схемой (предельная допустимая относительная погрешность измерения массы – 0,3%).

Таблица 1. Метрологические характеристики конвейерных весов и МЛП

Table 1. Metrological characteristics of conveyer weigher and linear density measure

Наименование величины	Относительная стандартная неопределенность, %	Расширенная относительная неопределенность %
Калибровочный коэффициент по линейной плотности	0,12	0,24
Скорость конвейера	0,015	0,03
Линейная плотность меры	0.13	0,26

Полученные оценки метрологических характеристик эталонных конвейерных весов и транспортируемого средства сравнения в виде меры линейной плотности свидетельствует о том, что разработанный эталон удовлетворяет требованиям, предъявляемым в поверочной схеме для средств измерений массы к рабочим эталонам единиц и массой пятого разряда, применяемым для поверки конвейерных весов и дозаторов непрерывного действия.

### **Опробование калибровки конвейерных весов с помощью меры линейной плотности в реальных условиях эксплуатации**

Проведено опробование разработанного метода на щебеночном комбинате г. Дегтярска Свердловской области (рис. 8). В результате установлено, что по сравнению с калибровкой по ГОСТ 8.005-2002 калибровка новым методом значительно упрощает эту процедуру и в разы сокращает трудоемкость с нескольких суток до нескольких часов, что крайне важно в условиях непрерывно работающих конвейеров.



Рис. 8. Опыт внедрения поверки МЛП на производстве (щебеночный комбинат г. Дегтярска Свердловской области)

Fig. 8. Experience of linear density measure implementation into the work of rock stone plant, Degtyarsk, Sverdlovsk region, Russia

### **Заключение**

В результате исследований нового метода для метрологического обеспечения измерений массы на конвейерных весах:

1) создан эталонный комплекс для метрологического обеспечения калибровки и поверки конвейерных весов и дозаторов непрерывного действия;

2) разработаны методики для выполнения калибровки и поверки конвейерных весов и дозаторов непрерывного действия;

3) предложен проект для дополнения стандарта ГОСТ 8.005-2002 в части методики поверки конвейерных весов.

Экспериментально и теоретически подтверждена практическая реализуемость метода при передаче единицы массы от рабочего эталона единицы массы пятого разряда конвейерным весам согласно поверочной схеме для средств измерений массы.

Новый метод вносит значительный вклад в развитие метрологии в области измерения массы. Значительное сокращение трудозатрат на реализацию этого метода позволит сделать более доступным метрологическое обеспечение на горно-обогатительных комбинатах, портах, в металлургической промышленности и во многих других областях народного хозяйства, где применяются конвейерные весы и дозаторы непрерывного действия.

Эффективность данного метода позволяет обосновать необходимость его стандартизации путем введения соответствующего дополнения в ГОСТ 8.005-2002.

### **Благодарности**

Авторы выражают искреннюю благодарность М. А. Малыгину и сотрудникам лаборатории метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» за проведение экспериментальных работ на испытательном стенде, а также сотрудникам ООО «Грубберский щебеночный завод» (г. Дегтярск) за помощь в апробировании разработанного метода для метрологического обеспечения измерений массы на конвейерных весах. Авторы глубоко признательны анонимному рецензенту за внимательное отношение к статье, профессиональное мнение и дельные замечания.

### **Вклад соавторов**

Аронов П. М.: разработка физических, математических моделей и алгоритмов обработки измерительной информации, критический анализ текста, компьютерная работа с текстом, написание текста.

Медведевских С. В.: концепция и инициирование исследования, формирование концепции работы, определение замысла и методологии статьи, критический анализ материалов статьи, работа над текстом.

Фирсанов В. А.: программирование и компьютерная обработка измерительной информации.

Остривной А. Ф.: идея использования для калибровки конвейерных весов замкнутой системы и стационарных процессов в ней.

Шмигельский И. Ю.: разработка и описание алгоритма для экспериментальных исследований измерений массы на конвейерных весах при замкнутом цикле, работа над текстом.

Котляров Р. Ю.: участие в экспериментальных работах, участие в обработке результатов измерений.

### Конфликт интересов

Автор Медведевских С. В. является главным редактором журнала «Эталоны. Стандартные образцы».

### ЛИТЕРАТУРА

1. Об обеспечении единства измерений: Федер. закон Рос. Федерации от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собрания Рос. Федерации 11 июня 2008 г.: одобрен Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 18 июня 2008 г. (в редакции от 27 декабря 2019 г. № 496-ФЗ) // Рос. газета. 2019. 31 декабря.
2. Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений массы: Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) от 29 декабря 2018 г. № 2818 // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации.
3. ГОСТ 8.005-2002 «Государственная система обеспечения единства измерений. Весы непрерывного действия конвейерные. Методика поверки». М.: Стандартинформ, 2008.
4. Демиденко Е. З. Линейная и нелинейная регрессии. М.: Финансы и статистика, 1981. 302 с.

### REFERENCE

1. Federal law «On ensuring the uniformity of measurements» No. FZ-102 of 26.06.2008. (In Russ.).
2. On approval of the State verification scheme for mass measuring instruments: Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart) dated December 29, 2018 No. 2818. In: Electronic fund of legal and normative technical documentation. (In Russ.).
3. GOST 8.005-2002 State system for ensuring the uniformity of measurements. Continuous conveyer balance. Methods and means of verification. Moscow, Standartinform, 2008. (In Russ.).
4. Demidenko E. Z. Linear and non-linear regression. Moscow, Finansy i statistika, 1981, 302 p. (In Russ.).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Аронов Петр Михайлович** – канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математического моделирования измерительных процессов и систем УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Российская Федерация, 620000, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4. e-mail: AronovPM@uniim.ru

**Медведевских Сергей Викторович** – канд. техн. наук, руководитель отделения механических измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19. e-mail: msv140562@gmail.com  
ORCID iD: 0000-0003-3084-1612

**Фирсанов Валерий Александрович** – ведущий инженер лаборатории математического моделирования измерительных процессов и систем УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Российская Федерация, 620000, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4. e-mail: valeryaleks1939@gmail.com

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Petr M. Aronov** – PhD (Phys.-Mat.), leading researcher, laboratory for mathematical modeling of measuring processes and systems UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology. 4 Krasnoarmeyskaya str., Ekaterinburg, 620075, Russian Federation e-mail: AronovPM@uniim.ru

**Sergey V. Medvedevskikh** – PhD (Eng.), head of mechanical measurements department D. I. Mendeleev Institute for Metrology. 19 Moskovskiy ave., St. Petersburg 190005, Russian Federation e-mail: msv140562@gmail.com  
ORCID iD: 0000-0003-3084-1612

**Valeriy A. Firsanov** – leading engineer of the laboratory for mathematical modeling of measuring processes and systems UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology. 4 Krasnoarmeyskaya str., Ekaterinburg, 620075, Russian Federation e-mail: valeryaleks1939@gmail.com

**Остривной Александр Федорович** – руководитель Научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений массы и силы ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19.  
e-mail: 2301@vniim.ru

**Шмигельский Илья Юрьевич** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений массы и силы ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19.  
e-mail: vniim2301@gmail.com

**Котляров Роман Юрьевич** – научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений массы и силы ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19.  
e-mail: 2301@vniim.ru

**Aleksandr F. Ostrivnoy** – Head of laboratory, Mass and Force Laboratory  
D. I. Mendeleev institute for metrology.  
19 Moskovskiy ave., St. Petersburg  
190005, Russian Federation  
e-mail: 2301@vniim.ru

**Ilya Yu. Shmigelsky** – PhD (Eng.), Senior Researcher, Mass and Force Laboratory D. I. Mendeleev institute for metrology.  
19 Moskovskiy ave., St. Petersburg  
190005, Russian Federation  
e-mail: vniim2301@gmail.com

**Roman Yu. Kotliarov** – Researcher, Mass and Force Laboratory D. I. Mendeleev institute for metrology.  
19 Moskovskiy ave., St. Petersburg  
190005, Russian Federation  
e-mail: 2301@vniim.ru