

Научная статья

УДК 533.088.22

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-44-50>

Верификация метода оценки систематических погрешностей стенда для калибровки шестикомпонентных тензометрических весов

Валерий Семёнович Волобуев¹, Антон Роальдович Горбушин²✉, Владимир Алексеевич Завьялов³

^{1, 2, 3} Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского, Жуковский, Московская обл., Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия

¹vs170439@gmail.com

²gorbushin@tsagi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4186-588X>

³vladimir.zavyalov@tsagi.ru

Аннотация. Исследованы систематические погрешности калибровочного стенда 6ГС-40М. Стенд разработан в Центральном аэрогидродинамическом институте и предназначен для калибровки шестикомпонентных внутри- и внемоделных тензометрических весов с максимальной нормальной силой 40 кН. С учётом требований к погрешности определения аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов при испытаниях в аэродинамических трубах установлено, что погрешность калибровочных стендов, отнесённая к половине диапазона каждой из шести компонент весов на стенде, не должна превышать 0,05 %. Разработан метод экспериментальной оценки систематических погрешностей калибровочного стенда и определены систематические погрешности стенда 6ГС-40М. С использованием полученных значений погрешностей верифицированы выведенные ранее аналитические выражения для систематических погрешностей. Оценены поправки к задаваемым стендом 6ГС-40М нагрузкам внутри- и внемоделных тензометрических весов, для различных компонент весов поправки составили 0,09–0,90 %. Разработанный метод экспериментального определения систематических погрешностей может быть использован и для других калибровочных стендов.

Ключевые слова: тензометрические весы, калибровочный стенд, систематическая погрешность, верификация

Для цитирования: Волобуев В. С., Горбушин А. Р., Завьялов В. А. Верификация метода оценки систематических погрешностей стенда для калибровки шестикомпонентных тензометрических весов // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 44–50. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-44-50>

Verification of the method for assessing systematic errors of the balance calibration machine

Valery S. Volobuev¹, Anton R. Gorbushin²✉, Vladimir A. Zavyalov³

^{1, 2, 3} Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Moscow region, Russia

¹vs170439@gmail.com

²gorbushin@tsagi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4186-588X>

³vladimir.zavyalov@tsagi.ru

Abstract. The systematic errors of the 6GS-40M calibration machine of the Central Aerohydrodynamic Institute are investigated. The machine is designed for calibration of external and internal six-component strain-gauge balances with a maximum normal force of 40 kN. Proceeding from requirements to the aerodynamic characteristic errors of aircraft models during their tests in wind tunnels, the requirements to the calibration errors of strain-gauge balances were obtained: the calibration error related to half of range of the calibration machine components must not exceed 0.05 %. A method is developed for experimental evaluation of systematic errors of calibration machine. Experimental studies were carried out with the help of the developed method to determine the systematic errors of the 6GS-40M calibration machine. Previously obtained analytical expressions for the systematic errors were verified by the results of the experiment. We estimated the corrections to the loads set by the 6GS-40M calibration machine to external and internal six-component strain-gauge balances. The range of corrections was from 0.09 to 0.90 % for the different components of the balances. The developed method of experimental determination of systematic errors may be used for other calibration machines.

Keywords: strain-gauge balance, calibration machine, systematic error, verification

Введение. Производители коммерческих самолётов в последние годы существенно повысили требования к точности результатов экспериментальных исследований в аэродинамических трубах. Например, необходимая погрешность

коэффициента сопротивления $\Delta C_{xa} \leq 5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$ [1, 2]. Таким требованиям удовлетворяют тензометрические весы с приведённой погрешностью 0,1–0,2 % при условии, что их предел измерения соответствует диапазону измеряемых

аэродинамических нагрузок [1]. Тензометрические весы используются в России с конца 1940-х гг. Калибровка тензометрических весов осуществляется на калибровочных стендах. В настоящее время в мире существует множество калибровочных стендов различных конструкций [3–14]. В России первый автоматизированный стенд для калибровки тензометрических весов создан в Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ) в 1959–1960 гг. [10]. Деформация тензометрических весов в процессе калибровки приводит к изменению величины и направления прилагаемой к весам нагрузки, т. е. к возникновению систематических погрешностей [3–14]. Калибровочные стенды обладают уникальной конструкцией и, соответственно, только им присущими систематическими погрешностями. Погрешность тензометрических весов обусловлена, в основном, погрешностью калибровочных стендов, на которых к весам прикладывают известные нагрузки по всем компонентам в заданном диапазоне. В работе [15] получена случайная погрешность коэффициента сопротивления $\Delta C_{xa} \leq 5 \cdot 10^{-5}$ при испытаниях модели гражданского самолета [16] на внутримодельных тензометрических весах. Диапазон весов по продольной компоненте силы ± 1 кН, скоростной напор 32 кПа, площадь модели 0,3282 м². Для этих параметров приведённая случайная погрешность тензометрических весов составила 0,05 %. Для достижения такой погрешности весов при калибровке на стенде необходимо, чтобы погрешность калибровочного стенда также не превышала 0,05 %. Обеспечить погрешность стенда не более 0,05 % можно двумя путями: проектированием специальной конструкции стенда; выявлением систематических погрешностей стенда и введением соответствующих поправок к приложенным на стенде нагрузкам.

Большой проблемой при оценке систематических погрешностей стендов является отсутствие эталона для задания трёх компонент вектора силы и трёх компонент вектора момента одновременно. Поэтому приходится искать иные способы для оценки погрешностей. В настоящее время существуют следующие способы:

вывод аналитических выражений для систематических погрешностей [3, 4, 11] на основе кинематической схемы стенда;

использование откалиброванных на стенде весов в одном угловом положении при их другом угловом положении на том же стенде [10]. При этом уравнения измерения весов, откалиброванных в стандартном положении на стенде, рассматривают как эталонные и применяют при развёрнутом положении весов для оценки систематических погрешностей стенда;

мастер-калибровка [6];

калибровка одних и тех же весов на разных калибровочных стендах [4, 12].

Цель настоящей работы – верификация аналитических выражений для систематических погрешностей калибровочного стенда ЦАГИ 6ГС-40М [11]. Для этого разработан оригинальный метод верификации и проведены специальные экспериментальные исследования системы задания нагрузок стенда, на котором отсутствуют тензометрические весы. В процессе исследований калибровочное приспособление стенда перемещается вдоль трёх взаимно перпендикулярных осей

при различном натяжении лент, с помощью которых задаются нагрузки.

Автоматизированный калибровочный стенд 6ГС-40М.

Автоматизированный шестикомпонентный калибровочный стенд 6ГС-40М, разработанный в ЦАГИ, предназначен для воспроизведения сил и моментов при исследованиях, калибровках и поверках внутри- и внемоделльных тензометрических весов. Данный стенд является развитием первого автоматизированного стенда МСЭ-000 для аэродинамической трубы Т-109, созданного в ЦАГИ в 1959–1960 гг. под руководством профессора Г. М. Мусинянца, ученика и соратника профессора Н. Е. Жуковского.

На стенде 6ГС-40М воспроизводятся следующие диапазоны трёх компонент вектора силы (продольной X , нормальной Y и поперечной Z) и трёх соответствующих компонент вектора момента шестикомпонентных тензометрических весов:

$$X = \pm 5 \text{ кН}; Y = -26 \dots + 40 \text{ кН}; Z = -3 \dots + 6 \text{ кН};$$

$$M_x = \pm 1,5 \text{ кН} \cdot \text{м}; M_y = \pm 2 \text{ кН} \cdot \text{м}; M_z = \pm 8 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Принципиальная схема стенда 6ГС-40М представлена на рис. 1. В основании 1 стенда закреплена хвостовая часть тензометрических весов 2, а в калибровочном приспособлении 3 – передняя часть. Калибровочное приспособление с узлами крепления тяг и системой суммирующих рычагов спроектировано так, что силы задаются относительно начала координат стенда – точки O , которая жёстко связана с калибровочным приспособлением. Приложенные к весам нагрузки задаются в системе координат основания стенда (нормальная система координат), поэтому измерительная система координат весов совпадает с нормальной. При задании нагрузок тензометрические весы деформируются, что приводит к изменению линейного и углового положений калибровочного приспособления в пространстве и, соответственно, к возникновению систематических погрешностей. Силу X задают системой трёх металлических упругих лент и электромеханизмов H_x , HM_{y1} , HM_{y2} , а момент рыскания M_y – электромеханизмами HM_{y1} , HM_{y2} . По показаниям датчиков перемещений находят перемещение калибровочного приспособления вдоль оси OX и его перемещение по углу рыскания. Силу Y задают с помощью одной ленты и электромеханизма H_y , по показаниям датчика перемещений которого определяют перемещение калибровочного приспособления вдоль оси OY . Силу Z задают системой двух металлических лент и электромеханизмов H_{z1} и H_{z2} . По показаниям датчиков перемещений электромеханизмов находят перемещение калибровочного приспособления вдоль оси OZ . Моменты крена M_x и тангажа M_z задают электромеханизмами HM_x и HM_z соответственно. Ленты, посредством которых к калибровочному приспособлению прикладываются нагрузки, предварительно натягиваются. Средние квадратические отклонения (СКО) результатов измерений (по показаниям установленных в электромеханизмах датчиков) перемещений калибровочного приспособления составляют 0,8 мм для датчика H_y и 0,2 мм – для остальных датчиков.

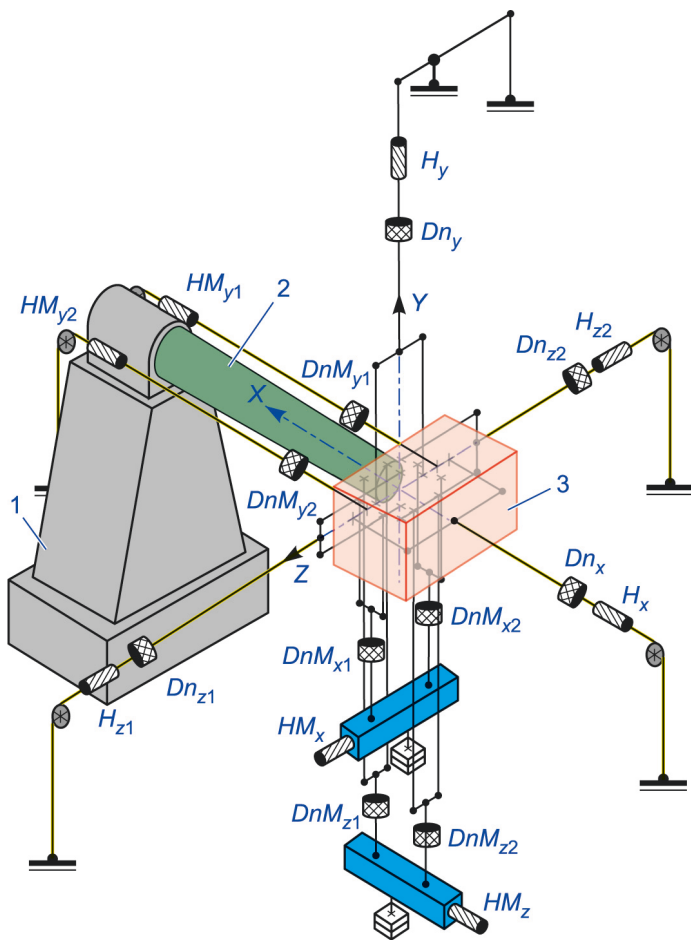


Рис. 1. Принципиальная схема стенда 6ГС-40М:

1 – основание стенда; 2 – тензометрические весы; 3 – калибровочное приспособление; Dn – датчики измерения сил и моментов; H – электромеханизмы задания сил и моментов и измерения перемещений по осям

Fig. 1. Principal scheme of the 6GS-40M calibration machine:

1 – base of the calibration machine; 2 – strain gauge balance; 3 – calibration body; Dn – dynamometers; H – force generators and displacement measurement units

Силы и моменты, приложенные к калибровочному приспособлению, измеряются динамометрами. Для измерений силы и момента X и M_x используются динамометры Dn_x , DnM_{y1} , DnM_{y2} и DnM_{x1} , DnM_{x2} соответственно; Y и M_y – Dn_y и DnM_{y1} , DnM_{y2} соответственно; Z и M_z – Dn_{z1} , Dn_{z2} и DnM_{z1} , DnM_{z2} соответственно. Диапазоны измерений динамометров DnM_{y1} , DnM_{y2} , Dn_{z1} , Dn_{z2} , DnM_{x1} , DnM_{x2} составляют ± 5 кН, динамометров Dn_x , Dn_{z1} – ± 10 кН, динамометров DnM_{z1} , DnM_{z2} – ± 20 кН, динамометра Dn_y – ± 70 кН.

Погрешность динамометров, отнесённая к половине их диапазона измерений, составляет 0,02 %. Она является одной из составляющих погрешности измерения сил и моментов, задаваемых калибровочным стендом. Инструментальная погрешность измерения продольной силы X определяется погрешностями динамометров Dn_x , DnM_{y1} , DnM_{y2} и составляет $\Delta X_i = \pm 2,45$ Н или 0,049 % диапазона продольной

силы. Инструментальная погрешность $\Delta Y_i = \pm 14$ Н измерения нормальной силы Y (или 0,04 % диапазона) обусловлена погрешностью динамометра Dn_y . Инструментальная погрешность $\Delta Z_i = \pm 1,7$ Н измерения поперечной силы Z зависит от погрешностей динамометров Dn_{z1} , Dn_{z2} и составляет 0,028 % диапазона поперечной силы. Инструментальная погрешность $(\Delta M_y)_i = \pm 1,41$ Н·м измерения момента рыскания M_y , определяемая погрешностями динамометров DnM_{y1} , DnM_{y2} , составляет 0,07 % диапазона момента.

Углы тангажа и крена калибровочного приспособления измеряются с помощью маятниковых акселерометров [17–19], метод измерения приведён в [18]. Погрешность акселерометров А-17, которые используются на стенде, составляет 0,001° при малых значениях измеряемых углов [18].

Систематические погрешности калибровочного стенда 6ГС-40М. В статье [11] получены аналитические выражения для поправок (систематических погрешностей, взятых с обратным знаком) к задаваемым компонентам векторов силы и момента на калибровочном стенде 6ГС-40М. Обобщим систематические погрешности, обусловленные приложением различных компонент векторов силы и момента [11] и запишем выражения для поправок к продольной X , нормальной Y и поперечной Z силам:

$$\Delta X = -R_y \frac{H_x}{L_y} - (R_{z1} + R_{z2}) \frac{H_x}{L_z}; \quad (1)$$

$$\Delta Y = -(R_{M_{y1}} + R_{M_{y2}}) \frac{H_y}{L_{M_y}} - R_x \frac{H_y}{L_x} - (R_{z1} + R_{z2}) \frac{H_y}{L_z} + (R_{M_{y1}} - R_{M_{y2}}) \frac{L_{M_y}^z \sin \gamma}{2L_{M_y}}; \quad (2)$$

$$\Delta Z = -M_y (R_{M_{y1}} + R_{M_{y2}}) \frac{H_z}{L_{M_y}} - R_x \frac{H_z}{L_x} - R_y \frac{H_z}{L_z}, \quad (3)$$

где R – показания датчиков силы динамометров; L_y , L_z – расстояния от оси OX соответственно до точки закрепления подвеса двигателя H_y и до оси блоков, расположенных за двигателями H_{z1} , H_{z2} ; L_{M_y} , L_x – расстояния от оси OY соответственно до оси блоков, расположенных за двигателями HM_{y1} , HM_{y2} , и до оси блока, находящегося за двигателем H_x ; γ – угол крена калибровочного приспособления; $L_{M_y}^z$ – расстояние между лентами, к которым прикладываются силы M_{y1} и M_{y2} , т. е. плечо для задания момента M_y .

Максимальное значение последнего члена в выражении (2) не превышает 1,254 Н, что составляет 0,006 % диапазона компоненты Y .

Выражения для поправок ΔM_x , ΔM_y , ΔM_z к моментам соответственно крена M_x , рыскания M_y и тангажа M_z запишем в следующем виде:

$$\Delta M_x = M_x (\cos \gamma - 1) - (R_{M_{y1}} + R_{M_{y2}}) \frac{(L_{M_y}^z)^2 \sin \gamma}{4L_{M_y}} + (R_{M_{y2}} - R_{M_{y1}}) \frac{H_y L_{M_y}^z}{2L_{M_y}}; \quad (4)$$

$$\Delta M_y = M_y(\cos \gamma \cos \psi - 1); \quad (5)$$

$$\Delta M_z = M_z(\cos \theta - 1); \quad (6)$$

где ψ , θ – углы соответственно рыскания и тангажа калибровочного приспособления.

Поправки к моментам рыскания (5) и тангажа (6) не превышают 0,03 % измеряемой величины, поскольку при калибровке весов на стенде 6ГС-40М ψ , $\theta \leq 1,5^\circ$ [11].

Приведём значения геометрических параметров для калибровочного стенда 6ГС-40М: $L_x = 3,8$ м; $L_y = 3,83$ м; $L_z = 4,1$ м; $L_{My} = 9$ м; $L_{Mz}^z = 1$ м.

В соответствии с [11] линейные перемещения калибровочного приспособления H_x , H_y , H_z и угловое перемещение в горизонтальной плоскости ψ вычислим как

$$\left. \begin{aligned} H_x &= -(\Delta r_{My1} + \Delta r_{My2} - 2\Delta r_x) / 4; \\ H_y &= -\Delta r_y; \\ H_z &= (\Delta r_{z2} - \Delta r_{z1}) / 2; \\ \psi &= (\Delta r_{My2} - \Delta r_{My1}) / L_{My}^z, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где Δr_{My1} , Δr_{My2} , Δr_x , Δr_y , Δr_{z1} , Δr_{z2} – изменения длины лент, соединяющих калибровочное приспособление и динамометры Dn_{My1} , Dn_{My2} , Dn_x , Dn_y , Dn_{z1} , Dn_{z2} соответственно.

Согласно [11] изменения длины лент в выражениях (7) найдём по формуле

$$\Delta r_i = rH_{Ni} - rH_{N0} + K_N(rDn_{Ni} - rDn_{N0}), \quad (8)$$

где rH_{Ni} , rH_{N0} показания датчика перемещения, прикреплённого к динамометру Dn_{Ni} , и начальное показание датчика соответственно; K_N – коэффициент жёсткости ленты, соединяющей калибровочное приспособление и динамометр Dn_{Ni} ; rDn_{Ni} , rDn_{N0} – сила натяжения ленты, измеренная динамометром Dn_{Ni} , и начальная сила натяжения ленты соответственно.

Из формулы (8) следует, что для корректной работы стенда необходимо задать первоначальное натяжение лент. Последний член выражения (8) представляет собой растяжение ленты под воздействием силы натяжения. Значения коэффициентов жёсткости лент калибровочного стенда 6ГС-40М получены в [11]: $K_y = 7,41 \cdot 10^{-7}$ м/Н; $K_x = 6,40 \cdot 10^{-6}$ м/Н; $K_{z1} = 7,86 \cdot 10^{-6}$ м/Н; $K_{z2} = 9,94 \cdot 10^{-6}$ м/Н; $K_{My1} = 1,95 \cdot 10^{-5}$ м/Н; $K_{My2} = 1,70 \cdot 10^{-5}$ м/Н.

Метод экспериментального определения систематических погрешностей. С целью верификации аналитических выражений (1)–(3) для систематических погрешностей калибровочного стенда 6ГС-40М разработан оригинальный метод и проведены специальные экспериментальные исследования без использования тензометрических весов. Из уравнения (1) следует, что при изменении натяжения лент R_y , R_{z1} , R_{z2} и положения калибровочного приспособления H_x вдоль оси ОХ возникает продольная сила ΔX , которая является искомым поправкой к продольной силе X , и которую следует сравнивать с аналитическим выражением (1) для его

верификации. Этим же методом исследуем систематические погрешности, описанные выражениями (2), (3).

Экспериментальные исследования для верификации систематических погрешностей. В отсутствие тензометрических весов на калибровочном стенде 6ГС-40М задавали несколько значений натяжения лент, соединяющих калибровочное приспособление с электромеханизмами. Натяжения лент измеряли динамометрами (см. рис. 1). Калибровочное приспособление перемещалось вдоль осей ОХ, ОУ, ОZ посредством электромеханизмов, перемещения измеряли с помощью датчиков в электромеханизмах. Диапазон перемещения калибровочного приспособления будет максимальным при калибровке внемоделных тензометрических весов, линейные и угловые деформации которых значительно больше, чем деформации внутримодельных весов. В [11] приведены следующие максимальные перемещения калибровочного приспособления при калибровке внемоделных весов: $H_x = 1,8$ мм; $H_y = 70,7$ мм; $H_z = 11,7$ мм; $\gamma = 2,6^\circ$; $\psi = 1,4^\circ$; $\theta = 0,5^\circ$. Диапазон перемещения калибровочного приспособления вдоль осей по возможности выбирали соответствующим диапазону, получаемому при калибровке внемоделных весов. Программа экспериментальных исследований приведена в табл. 1.

В опыте 1 изменяли натяжение лент вдоль оси ОZ, а калибровочное приспособление перемещалось вдоль оси ОХ в диапазоне ± 10 мм с шагом 2,5 мм. Результаты этого опыта позволили верифицировать поправку к продольной силе, описанную формулой (1). В опыте 2 изменяли натяжение лент вдоль осей ОХ, ОZ, калибровочное приспособление перемещалось вдоль оси ОУ в диапазоне ± 10 мм с шагом 5 мм. Угол крена калибровочного приспособления $\gamma = 0$. Результаты этого опыта позволили верифицировать поправку к нормальной силе, описанную формулой (2). В опыте 3 изменяли натяжение лент вдоль оси ОZ, калибровочное приспособление перемещалось вдоль оси ОZ в диапазоне ± 5 мм с шагом 2,5 мм. Результаты этого опыта позволили верифицировать поправку к поперечной силе, описанную формулой (3).

Результаты опыта 1 представлены на рис. 2 в сравнении с аналитическим выражением (1) в виде зависимости поправки к продольной силе X от перемещения калибровочного приспособления вдоль оси ОХ. Экспериментальные данные указаны с погрешностью измерения продольной

Таблица 1

Программа экспериментальных исследований по верификации стенда 6ГС-40М

Номер опыта	Перемещение вдоль оси	Натяжение ленты, кН					
		X	M_{y1}	M_{y2}	z1	z2	Y
1	ОХ	4,40	2,20	2,20	3,54	3,57	26,0
		4,40	2,20	2,20	4,43	4,46	26,1
2	ОУ	3,92	1,95	1,93	3,87	3,90	26,0
		1,96	0,96	0,95	1,92	1,95	26,6
3	ОZ	1,97	0,97	0,96	3,70	3,80	26,0
		3,95	1,96	1,95	3,80	3,90	26,1

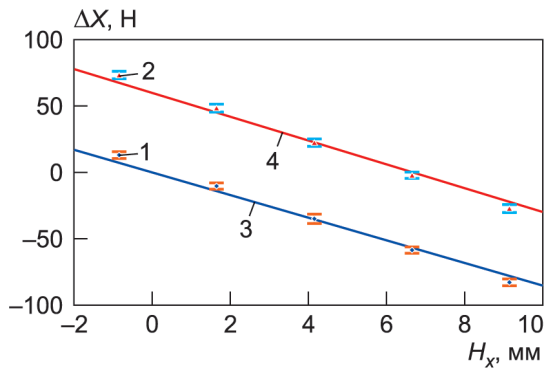


Рис. 2. Поправки к продольной силе в зависимости от перемещения, полученные при различных показаниях динамометров $R_{z1}=3,54$ кН, $R_{z2}=3,57$ кН (кривые 1, 3); $R_{z1}=4,43$ кН, $R_{z2}=4,46$ кН (кривые 2, 4): 1, 2 – экспериментальные значения; 3, 4 – значения, рассчитанные по уравнению (1)

Fig. 2. Correction to the axial force as a function of displacement: 1, 3 – $R_{z1}=3.54$ kN, $R_{z2}=3.57$ kN; 2, 4 – $R_{z1}=4.43$ kN, $R_{z2}=4.46$ kN; 1, 2 – experimental data; 3, 4 – equation (1)

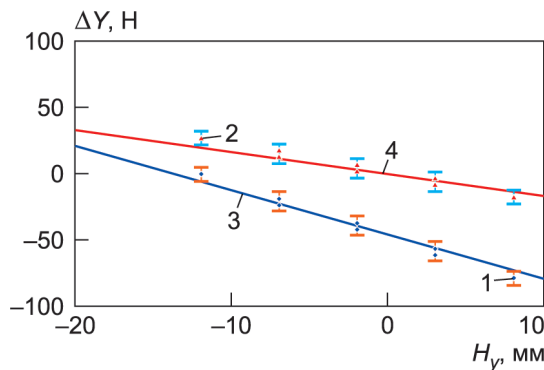


Рис. 3. Экспериментальные (1, 2) и рассчитанные по уравнению (2) (3, 4) значения поправки к нормальной силе в зависимости от перемещения при различных показаниях динамометров: 1, 3 – $R_x=3,92$ кН, $R_{My1}=1,95$ кН, $R_{My2}=1,93$ кН, $R_{z1}=3,87$ кН, $R_{z2}=3,90$ кН; 2, 4 – $R_x=1,96$ кН, $R_{My1}=0,96$ кН, $R_{My2}=0,95$ кН, $R_{z1}=1,92$ кН, $R_{z2}=1,95$ кН

Fig. 3. Correction to the normal force as a function of displacement: 1, 3 – $R_x=3.92$ kN, $R_{My1}=1.95$ kN, $R_{My2}=1.93$ kN, $R_{z1}=3.87$ kN, $R_{z2}=3.90$ kN; 2, 4 – $R_x=1.96$ kN, $R_{My1}=0.96$ kN, $R_{My2}=0.95$ kN, $R_{z1}=1.92$ kN, $R_{z2}=1.95$ kN; 1, 2 – experimental data; 3, 4 – equation (2)

силы, приведенной в разделе «Автоматизированный калибровочный стенд 6ГС-40М». Экспериментальные данные 2 и соответствующая им аналитическая поправка 4 сдвинуты вдоль оси ординат на 60 Н для лучшего различия точек и кривых.

Расчётная поправка к компоненте X, описанная выражением (1), согласуется с результатами опыта. При увеличении силы натяжения лент вдоль оси OZ поправка к продольной силе увеличивается. Максимальная разность экспериментальных и расчётных поправок в диапазоне перемещения калибровочного приспособления $H_x=-2...+10$ мм не превышает 5,53 Н, что составляет 0,11 % диапазона измерения компоненты X и лишь незначительно превышает её инструментальную погрешность. Максимальная поправка

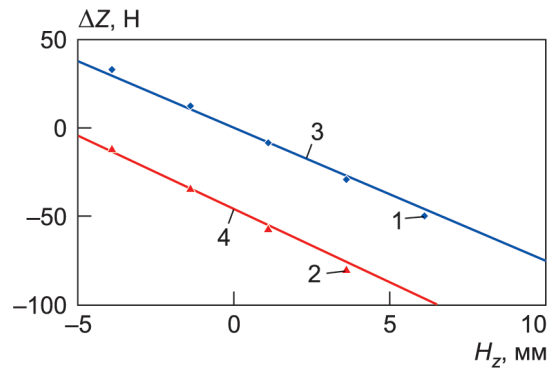


Рис. 4. Экспериментальные (1, 2) и рассчитанные по уравнению (3) (3, 4) значения поправки к нормальной силе в зависимости от перемещения при различных показаниях динамометров: 1, 3 – $R_x=1,97$ кН, $R_{My1}=0,97$ кН, $R_{My2}=0,96$ кН; 2, 4 – $R_x=3,96$ кН, $R_{My1}=1,96$ кН, $R_{My2}=1,95$ кН

Fig. 4. Correction to the side force as a function of displacement: 1, 3 – $R_x=1.97$ kN, $R_{My1}=0.97$ kN, $R_{My2}=0.96$ kN; 2, 4 – $R_x=3.96$ kN, $R_{My1}=1.96$ kN, $R_{My2}=1.95$ kN; 1, 2 – experimental data; 3, 4 – equation (3)

в исследуемом диапазоне перемещения калибровочного приспособления составляет 90 Н или 1,8 % половины диапазона компоненты X, что существенно превышает инструментальную погрешность компоненты. Таким образом, расчётная поправка (1) верифицирована результатами эксперимента с погрешностью 0,11 %, отнесённой к половине диапазона компоненты X стенда. Наклон экспериментальных кривых больше наклона расчётных кривых приблизительно на 4,3 %.

Результаты опыта 2 представлены на рис. 3 в сравнении с аналитической зависимостью (2) в виде зависимости поправки к нормальной силе Y от перемещения калибровочного приспособления вдоль оси OY. Экспериментальные данные приведены с указанной выше погрешностью измерения нормальной силы динамометром Dn_y . Экспериментальные данные 1 и соответствующая им аналитическая поправка 3 сдвинуты на 46 Н по оси ординат.

Расчётная поправка к компоненте Y, описанная выражением (2), согласуется с результатами опыта. При увеличении силы натяжения лент вдоль осей OX, OZ поправка к нормальной силе увеличивается. Максимальная разность экспериментальных и расчётных поправок в диапазоне перемещения калибровочного приспособления $H_y=-11,9...+8,1$ мм не превышает 5,71 Н, что составляет 0,009 % диапазона компоненты Y и почти в три раза меньше инструментальной погрешности динамометра Dn_y . Максимальная поправка в исследуемом диапазоне перемещения калибровочного приспособления составляет 50 Н или 0,07 % половины диапазона компоненты Y, что более чем в три раза превышает инструментальную погрешность компоненты. Таким образом, расчётная поправка (1) верифицирована результатами эксперимента с погрешностью 0,01 %, отнесённой к половине диапазона компоненты Y. Наклон экспериментальных кривых больше наклона расчётных кривых приблизительно на 11 %.

Результаты опыта 3 с погрешностью измерения поперечной силы, рассчитанной по инструментальным погрешностям динамометров Dn_{z1} , Dn_{z2} , а также аналитическая

зависимость (3) – зависимость поправки к поперечной силе Z от перемещения калибровочного приспособления вдоль оси OZ , представлены на рис. 4. Экспериментальные данные 1 и соответствующая им аналитическая поправка 3 сдвинуты на 46 Н по оси ординат.

Расчётная поправка к компоненте Z , описанная выражением (3), согласуется с результатами опыта. При увеличении силы натяжения лент вдоль оси OX поправка к поперечной силе увеличивается. Максимальная разность экспериментальных и расчётных поправок в диапазоне перемещения калибровочного приспособления $H_z = 3,9...+6,1$ мм не превышает 3,7 Н, что составляет 0,04 % от половины диапазона компоненты Z и примерно в два раза превышает её инструментальную погрешность. Максимальная поправка в исследуемом диапазоне перемещения калибровочного приспособления составляет 50 Н или 0,8 % половины диапазона компоненты Z , что существенно превышает инструментальную погрешность компоненты. Расчётная поправка (3) верифицирована результатами эксперимента с погрешностью 0,04 %, отнесённой к половине диапазона компоненты Z . Наклон экспериментальных кривых больше наклона расчётных кривых приблизительно на 7 %.

Оценим поправки, которые получаются при калибровке на калибровочном стенде 6ГС-40М тензометрических весов двух типов: внемодельных 6ЭВ128-3(1) и внутримодельных В6-710(1) с одинаковыми диапазонами нормальной силы. Диапазоны d компонент обоих весов, максимальные угловые и линейные деформации весов, а также поправки к заданным на стенде нагрузкам Δ и поправки $\Delta/(2d)$, отнесённые к половине диапазона компоненты, приведены в табл. 2.

Значения поправок ко всем компонентам векторов сил и моментов вне- и внутримодельных тензометрических весов превышают погрешности определения поправок. Значения поправок больше погрешностей (0,05 %) калибровочного стенда. Следовательно, эти поправки значимы и их следует добавлять к нагрузкам, задаваемым калибровочным стендом 6ГС-40М.

Заключение. Разработанный экспериментальный метод определения систематических погрешностей стенда 6ГС-40М позволил верифицировать ранее предложенные аналитические поправки. Проведённые исследования показали, что систематические погрешности калибровочного стенда 6ГС-40М обусловлены линейными и угловыми деформациями тензометрических весов и линейными деформациями металлических лент. Производные экспериментальных поправок к компонентам силы по перемещению калибровочного приспособления получились на 4,3–11,0 % больше, чем для расчётных поправок. Одной из возможных причин является то, что датчики электромеханизмов задания силы и измерения перемещения не измеряют растяжение части ленты между электромеханизмом и точкой закрепления ленты. Это приводит к заниженной оценке перемещения калибровочного приспособления и, соответственно, к занижению расчётной поправки. Для подтверждения этой гипотезы можно измерить перемещения калибровочного приспособления другим методом, например методом видеограмметрии.

Таблица 2

Деформации тензометрических весов и поправки к нагрузкам, задаваемым стендом 6ГС-40М

Компонента	d, кН	Максимальная деформация		Δ, Н	Δ/(2d), %
		линейная, мм	угловая, °		
Тензометрические весы 6ЭВ128-3(1)					
X	±5	0,5	0	23	0,46
Y	±20	71,5	2,69	180,5	0,90
Z	±3	10,9	0,40	83,8	2,80
Тензометрические весы В6-710(1)					
X	±2	0,5	0	3,5	0,18
Y	±20	7,3	0,94	18,5	0,09
Z	±4	2,2	0,23	17,3	0,43

Полученные систематические погрешности сил, задаваемых при калибровке тензометрических весов на стенде 6ГС-40М, превышают значения, указанные в качестве требований к точности стендов. Следовательно, учёт определённых в данной работе систематических погрешностей повышает точность стенда.

Разработанную методику верификации систематических погрешностей можно применять для калибровочных стендов аналогичных конструкций.

Список источников

1. Frank L., Experience relative to the interaction between balance engineer and the project engineer with regard to measurement uncertainty, *Proceedings of a First International Symposium on Strain Gauge Balances First International Symposium on Strain Gauge Balances*, USA, October 22–25, 1996, pp. 243–277. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990072764/downloads/19990072764.pdf> (дата обращения: 07.02.2022).
2. Бухаров К. Д., Горбушин А. Р., Карташев Ю. В., Петровев В. В., Судакова И. А., Чернышев С. Л. Апробация весового непрерывного эксперимента в трансзвуковой аэродинамической трубе Т-128 на дозвуковых режимах // Учёные записки ЦАГИ. 2017. Т. XLVIII. № 7. С. 27–45.
3. Гусев В. П., Тухомиров В. И. Основные систематические погрешности калибровочного стенда МСЭ-000 // Труды ЦАГИ. 1983. Вып. 2207. С. 107–114.
4. *First International Symposium on Strain Gauge Balances*, USA, October 22–25, 1996. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990072764/downloads/19990072764.pdf> (дата обращения: 07.02.2022).
5. Ewald B. F. R., *Measurement Science and Technology*, 2000, vol. 11, no. 6, pp. 81–94. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/6/201>
6. Hufnagel K., Quade M., *Proceedings 45th AIAA Aerospace Sci. Meeting and Exhibit.*, 08–11 January 2007, Reno, Nevada, AIAA, 2007. <https://doi.org/10.2514/6.2007-148>
7. Zhu Ben-hua, Liang Lei, Crucial technology analysis on restoration measurement of automatic balance calibration system, *Ordnance industry automation*, 2009, vol. 28 (12), pp. 79–88.

8. Xiong Lin, Wang Jinyin, Liu Jiahua, Wen Shuai, Liu Chunfeng, Jiang Ping, *J. Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, vol. 29 (6), pp. 84–88. <https://doi.org/10.11729/syltlx20140144>
9. Landman D., Toro K. G., Commo S. A., Lynn K. C., *Journal of Aircraft*, 2015, vol. 52, no. 3. <https://doi.org/10.2514/1.C032930>
10. Волобуев В. С., Горбушин А. Р., Судакова И. А., Тихомиров В. И. Два способа калибровки тензометрических весов на калибровочных стендах ЦАГИ // Учёные записки ЦАГИ. 2017. Т. XLVIII. № 2. С. 62–70.
11. Большакова А. А., Волобуев В. С., Горбушин А. Р., Петровневич В. В. Исследование систематических погрешностей калибровочного стенда 6ГС-40М // Измерительная техника. 2017. № 8. С. 10–14.
12. Toro K., Burns D., Parker P. A., *Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, June 25–29, 2018, Atlanta, Georgia, AIAA, 2018, 4108. <https://doi.org/10.2514/6.2018-4108>
13. Danilov M. N., Bardaev P. P., *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2125, 030091. <https://doi.org/10.1063/1.5117473>
14. Simpson J., Landman D., Giroux R., Zeisset M., Hall B., Rhew R., *U.S. Air Force T&E Days*, 06–08 December 2005, Nashville, Tennessee, AIAA, 2005, 7601. <https://doi.org/10.2514/6.2005-7601>
15. Буров В. В., Волобуев В. С., Глазков С. А., Горбушин А. Р., Чумаченко Е. К. Измерительно-вычислительный комплекс трансзвуковой аэродинамической трубы Т-128 // Датчики и системы. 2010. № 5 (132). С. 20–24.
16. Glazkov S. A., Gorbushin A. R., Ivanov A. I., Semenov A. V., *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, vol. 37, no. 3, pp. 263–298. [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(01\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(01)00007-0)
17. Quest J., Schimanski D., *Proceedings 41th AIAA: Aerospace Sci. Meeting and Exhibit.*, 06–09 January 2003, Reno, Nevada, AIAA, 2003, 755. <https://doi.org/10.2514/6.2003-755>
18. Горбушин А. Р., Колесников А. И. Трёхкомпонентная математическая модель одноосевого акселерометра для измерения углов тангажа и крена // Измерительная техника. 2019. № 2. С. 23–28. <https://doi.org/10.32446/0368-1052it.2019-2-23-28>
19. Toro K. G., Parker P. A., *AIAA Aviation 2019 Forum*, 17–21 June 2019, Dallas, Texas, AIAA, 2019, 2807. <https://doi.org/10.2514/6.2019-2807>
3. Gusev V. P., Tikhomirov V. I., *Osnovnye sistematicheskie pogreshnosti kalibrovochnogo stenda MSEH-000, Trudy TSAGI*, 1983, vol. 2207, pp. 107–114. (In Russ.)
4. *First International Symposium on Strain Gauge Balances*, USA, October 22–25, 1996, available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990072764/downloads/19990072764.pdf> (accessed: 07.02.2022).
5. Ewald B. F. R., *Measurement Science and Technology*, 2000, vol. 11, no. 6, pp. 81–94. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/6/201>
6. Hufnagel K., Quade M., *Proceedings 45th AIAA Aerospace Sci. Meeting and Exhibit.*, 08–11 January 2007, Reno, Nevada, AIAA, 2007. <https://doi.org/10.2514/6.2007-148>
7. Zhu Ben-hua, Liang Lei, *Crucial technology analysis on restoration measurement of automatic balance calibration system, Ordnance industry automation*, 2009, vol. 28 (12), pp. 79–88.
8. Xiong Lin, Wang Jinyin, Liu Jiahua, Wen Shuai, Liu Chunfeng, Jiang Ping, *J. Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, vol. 29 (6), pp. 84–88. <https://doi.org/10.11729/syltlx20140144>
9. Landman D., Toro K. G., Commo S. A., Lynn K. C., *Journal of Aircraft*, 2015, vol. 52, no. 3. <https://doi.org/10.2514/1.C032930>
10. Volobuyev V. S., Gorbushin A. R., Sudakova I. A., Tikhomirov V. I., *TsAGI Science Journal*, 2017, vol. 48, no. 2, pp. 187–197. <https://doi.org/10.1615/TsAGISciJ.2017021104>
11. Bol'shakova A. A., Volobuev V. S., Gorbushin A. R., Petrovnevich V. V., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 8, pp. 763–770. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1268-2>
12. Toro K., Burns D., Parker P. A., *Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, June 25–29, 2018, Atlanta, Georgia, AIAA, 2018, 4108. <https://doi.org/10.2514/6.2018-4108>
13. Danilov M. N., Bardaev P. P., *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2125, 030091. <https://doi.org/10.1063/1.5117473>
14. Simpson J., Landman D., Giroux R., Zeisset M., Hall B., Rhew R., *U.S. Air Force T&E Days*, 06–08 December 2005, Nashville, Tennessee, AIAA, 2005, 7601. <https://doi.org/10.2514/6.2005-7601>
15. Burov V. V., Volobuev V. S., Glazkov S. A., Gorbushin A. R., Chumachenko E. K., *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, pp. 634–641. <https://doi.org/10.1134/S0005117911030143>
16. Glazkov S. A., Gorbushin A. R., Ivanov A. I., Semenov A. V., *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, vol. 37, no. 3, pp. 263–298. [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(01\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(01)00007-0)
17. Quest J., Schimanski D., *Proceedings 41th AIAA Aerospace Sci. Meeting and Exhibit.*, 06–09 January 2003, Reno, Nevada, AIAA, 2003, 755. <https://doi.org/10.2514/6.2003-755>
18. Gorbushin, A.R., Kolesnikov, A.I., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 2, 118–125. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01595-0>
19. Toro K. G., Parker P. A., *AIAA Aviation 2019 Forum*, 17–21 June 2019, Dallas, Texas, AIAA, 2019, 2807. <https://doi.org/10.2514/6.2019-2807>

References

1. Frank L., Experience relative to the interaction between balance engineer and the project engineer with regard to measurement uncertainty, *First International Symposium on Strain Gauge Balances*, USA, October 22–25, 1996, pp. 243–277, available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990072764/downloads/19990072764.pdf> (accessed: 07.02.2022).
2. Bukharov K. D., Gorbushin A. R., Kartashev Yu. V., Petrovnevich V. V., Sudakova I. A., Chernyshev S. L., *TsAGI Science Journal*, 2017, vol. 48, no. 7, pp. 627–647. <https://doi.org/10.1615/TsAGISciJ.2018026242>

Статья поступила в редакцию 29.11.2021; одобрена после рецензирования 18.01.2022; принята к публикации 20.01.2022.
The article was submitted 29.11.2021; approved after reviewing 18.01.2022; accepted for publication 20.01.2022.