

Исследование систематических погрешностей стенда для калибровки тензометрических весов

А. А. БОЛЬШАКОВА¹, В. С. ВОЛОБУЕВ¹, А. Р. ГОРБУШИН^{1,2}, В. В. ПЕТРОВИЧ^{1,2}

¹Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский, Россия, e-mail: anastasiya.bolshakova@tsagi.ru

²Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, Россия

Приведена принципиальная схема автоматизированного калибровочного стенда 6ГС-40М, предназначенного для калибровки внутри- и внешнетрубных шестикомпонентных тензометрических весов. Изложены основные особенности конструкции стенда и построена его упругоподобная модель. Рассмотрены основные источники возникновения систематических погрешностей весов. Описана методика расчёта перемещений начала координат стенда в процессе калибровки весов. Представлена методика вычисления нагрузок в земной системе координат при помощи записи уравнения равновесия сил для произвольного положения калибровочного приспособления в пространстве.

Ключевые слова: тензометрические весы, калибровочный стенд, упругоподобная модель, уравнение равновесия.

Paper is devoted to the investigation of the systematic errors of the 6GS-40M automated balance calibration machine for calibrating internal and external six-component strain gauge balances. The layout of the automated balance calibration machine 6GS-40M is presented and the main specific features of its design are described. Elastic model of calibration machine is designed. The main sources of the systematic errors are considered. The design procedure of the deflections of the balance reference center during the calibration is given. The determination procedure of the loads at normal coordinate system is given using steady-state equation for the random spatial position of the calibration rig.

Key words: strain gauge balance, calibration rig, elastic model, steady-state equation.

В настоящее время существенно повысились требования к точности результатов экспериментальных исследований различных физических характеристик в аэродинамических трубах, особенно со стороны производителей пассажирских самолетов. Это обусловлено задачей измерения малых приращений нагрузок при оптимизации компоновки летательного аппарата для улучшения его местной аэродинамики и повышения топливной эффективности. Так, погрешность измеряемого с помощью шестикомпонентного тензодинамометра коэффициента сопротивления продуванию потоком воздуха должна быть не более $5 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ [1]. Следовательно, погрешность тензометрических весов, предел измерения которых должен удовлетворять диапазону измеряемых аэродинамических нагрузок, составляет 0,1–0,2 %. Калибровочные характеристики тензометрических весов определяются на специальных калибровочных стендах, позволяющих прикладывать к весам нагрузки в заданном диапазоне по всем компонентам сил и моментов. По известным значениям заданных нагрузок на стенде и измеренным выходным сигналам тензостов составляются уравнения измерения тензометрических весов и оценивается их точность. Погрешность калибровки весов обусловлена метрологическими характеристиками, случайными и систематическими погрешностями стендов. Из требований к погрешностям тензодинамических весов вытекают желаемые значения погрешностей калибровочных стендов, составляющие 0,05–0,10 %. Калибровочные стенды имеют, как правило, уникальную конструкцию. Для каждого стенда разрабатывается индивидуальная методика определения систематических погрешностей [2–6].

Автоматизированный шестикомпонентный калибровочный стенд 6ГС-40М, разработанный в Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ), предназначен для воспроизведения сил и моментов при исследованиях, калибровках и поверках внутри- и внешнетрубных тензометрических весов. Он 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. Позднее была проведена метрологическая экспертиза стенда МСЭ-000 и разработана методика определения его основных систематических погрешностей [2].

Весы жёстко крепятся к основанию стенда. 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 положения калибровочного приспособления в пространстве и, соответственно, к возникновению систематических погрешностей. Данная работа посвящена определению систематических погрешностей стенда 6ГС-40М и разработке методики их учета.

Автоматизированный калибровочный стенд 6ГС-40М.

В табл. 1 приведены диапазоны задаваемых стендом сил и моментов.

Принципиальная схема стенда 6ГС-40М представлена на рис. 1. Здесь и далее по тексту $Ox_3Y_3Z_3$ – нормальная (земная) система координат, $O_xC_xY_xZ_x$ – система координат

Таблица 1

Диапазоны воспроизводимых стендом сил и моментов

Параметр	Диапазон измерений
$X, Н$	± 5000
$Y, Н$	$-26000 \dots +40000$
$Z, Н$	$-3000 \dots +6000$
$M_x, Н \cdot м$	± 1500
$M_y, Н \cdot м$	± 2000
$M_z, Н \cdot м$	± 6000

стенда. Тензометрические весы 1 задним посадочным конусом установлены в державку 2, вмонтированную в жёсткий неподвижный корпус 9. Корпус 9 закреплён с помощью болтов на монтажном столе 10. Передний посадочный конус тензометрических весов 1 закреплён в ответном коническом отверстии калибровочного приспособления 5, которое предназначено для передачи нагрузок на весы. Калибровочное приспособление с узлами крепления тяг сконструировано так, чтобы все силы и моменты могли задаваться относительно начала координат стенда – точки O_c , которая жёстко связана с калибровочным приспособлением.

Три силы и момент рыскания M_y задаются на стенде посредством системы 6 металлических упругих лент и силозадающих электромеханизмов 3. Стенд 6ГС-40М снабжён шестью лентами $X, M_{y1}, M_{y2}, Z_1, Z_2, Y$, силы натяжения которых обозначены на рис. 1 как $R_x, R_{My1}, R_{My2}, R_{Z1}, R_{Z2}, R_Y$ соответственно. Моменты крена M_x и тангажа M_z прикладываются к калибровочному приспособлению 5 при помощи кареток 8. Чтобы обеспечить приложение всех сил и моментов в начале координат стенда, используется система суммирующих рычагов 7. Значения сил и моментов определяются по показаниям однокомпонентных динамометров (датчиков силы) 4, вмонтированных в ленты 6. Для предотвращения провисания лент и искривления линии нагружения из-за влияния веса электромеханизмов, суммирующих рычагов и динамометров используются вывешивающие устройства. На боковой поверхности калибровочного приспособления установлен двухплоскостной акселерометр для измерений пространственного положения этого приспособления по углам тангажа θ и крена γ в каждой точке нагружения в процессе калибровки тензометрических весов.

Упругоподобная модель стенда 6ГС-40М. Вследствие деформаций тензометрических весов в процессе калибровки изменяется пространственное положение калибровочного приспособления и смещается начало координат стенда. В результате изменяются направления сил натяжения в лентах и, следовательно, направления нагрузок относительно земной системы координат Ox_3, Y_3, Z_3 . С помощью программного комплекса SolidWorks Simulation изучали перемещения начала координат стенда в процессе калибровки. Чтобы учесть пространственное положение системы координат стенда O_c, X_c, Y_c, Z_c на каждом этапе калибровки, была спроектирована упругоподобная модель (УПМ)

стенда 6ГС-40М. Модель содержит следующие основные элементы: тензометрические весы; жёстко зафиксированный корпус; калибровочное приспособление; ленты; суммирующие рычаги. Для исследования перемещений калибровочного приспособления УПМ стенда 6ГС-40М была сгенерирована расчётная сетка из 31707 элементов, заданы граничные условия и нагрузки, соответствующие каждому типу нагружений, осуществляемых при калибровке весов.

Анализ деформационной схемы УПМ стенда на примере задания силы Y показал, что начало координат стенда – точка O_c , жёстко связанная с калибровочным приспособлением, перемещается на расстояние H_y вдоль оси OY_3 , и система координат стенда разворачивается относительно оси OZ_3 на угол θ . Аналогичные исследования были

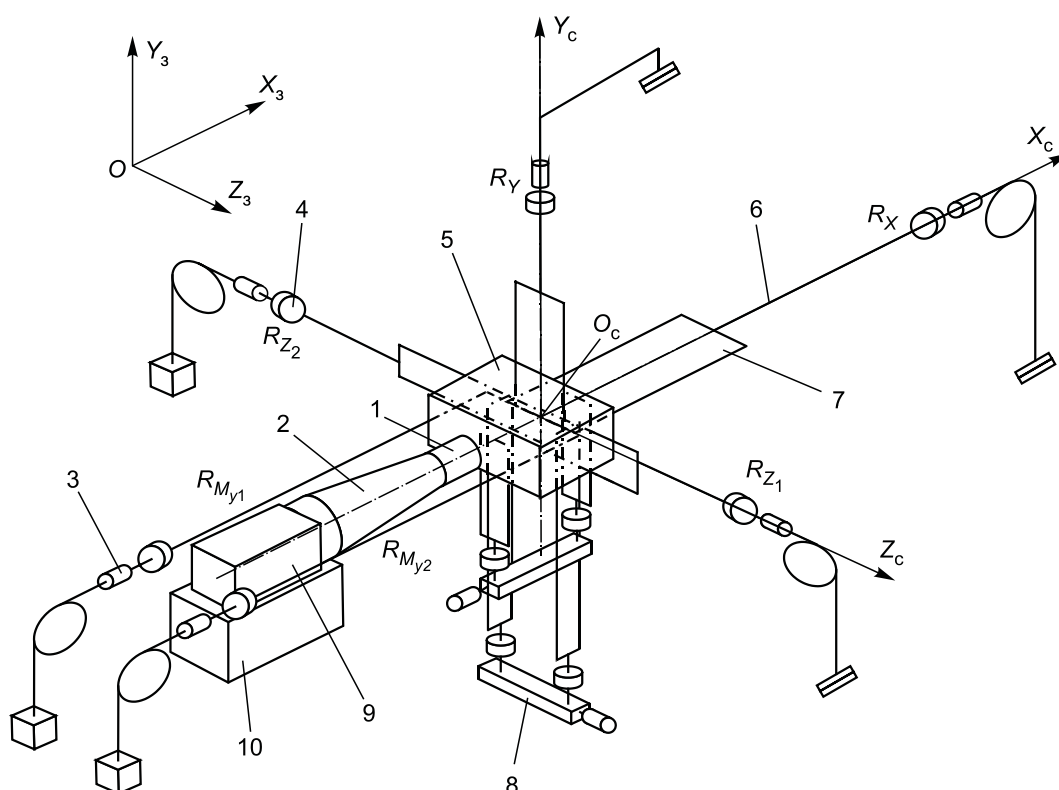


Рис. 1. Принципиальная схема калибровочного стенда 6ГС-40М:

1 – тензометрические весы; 2 – державка; 3 – силозадающие электромеханизмы; 4 – датчики силы; 5 – калибровочное приспособление; 6 – металлические упругие ленты; 7 – суммирующие рычаги; 8 – каретки; 9 – корпус; 10 – монтажный стол

проведены для нагружений всех типов, результаты представлены в табл. 2.

Первые шесть нагружений являются одиночными – нагрузки на тензосенсоры задаются поочередно по одному компоненту, остальные нагружения – парными, т. е. нагрузки за-

Т а б л и ц а 2

Положение системы координат сенда в пространстве в процессе калибровки

Вид нагрузки	Перемещения точки начала координат и повороты системы координат сенда при задании нагрузки
X	Перемещение O_c вдоль оси OX_3 на H_x Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OZ_3 на угол θ
Y	Перемещение O_c вдоль оси OY_3 на H_y Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OY_3 на угол θ
Z	Перемещение O_c вдоль оси OZ_3 на H_z Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OX_3 на угол γ
M_x	Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OX_3 на угол γ
M_y	Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OY_3 на угол ψ
M_z	Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OZ_3 на угол θ
X^*Y	Перемещение O_c вдоль оси OX_3 на H_x Перемещение O_c вдоль оси OY_3 на H_y Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OZ_3 на угол θ
X^*Z	Перемещение O_c вдоль оси OX_3 на H_x Перемещение O_c вдоль оси OZ_3 на H_z Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OY_3 на угол ψ Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OX_3 на угол γ
X^*M_x	Перемещение O_c вдоль оси OX_3 на H_x Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OX_3 на угол γ
X^*M_y	Перемещение O_c вдоль оси OX_3 на H_z Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OY_3 на угол ψ
X^*M_z	Перемещение O_c вдоль оси OX_3 на H_x Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OZ_3 на угол θ
Y^*Z	Перемещение O_c вдоль оси OY_3 на H_y Перемещение O_c вдоль оси OZ_3 на H_z Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OX_3 на угол γ
Y^*M_x	Перемещение O_c вдоль оси OY_3 на H_y Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OX_3 на угол γ
Y^*M_y	Перемещение O_c вдоль оси OY_3 на H_y Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OX_3 на угол γ Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OY_3 на угол ψ
Y^*M_z	Перемещение O_c вдоль оси OY_3 на H_y Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OZ_3 на угол θ
Z^*M_x	Перемещение O_c вдоль оси OZ_3 на H_z Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OX_3 на угол γ
Z^*M_y	Перемещение O_c вдоль оси OZ_3 на H_z Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OY_3 на угол ψ
Z^*M_z	Перемещение O_c вдоль оси OZ_3 на H_z Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OY_3 на угол ψ Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OZ_3 на угол θ
$M_x^*M_y$	Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OX_3 на угол γ Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OY_3 на угол ψ
$M_x^*M_z$	Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OX_3 на угол γ Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OZ_3 на угол θ
$M_y^*M_z$	Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OY_3 на угол ψ Поворот $O_cX_cY_cZ_c$ вокруг оси OZ_3 на угол θ

даются одновременно по двум компонентам (отмечено символом «*»). В табл. 2 показана связь шести основных видов перемещения системы координат сенда (по три линейных H_x, H_y, H_z вдоль осей OX_3, OY_3, OZ_3 и угловых γ, ψ, θ) с приложенными к весам нагрузками. Таким образом, рассматриваются деформации сенда при перемещениях шести различных видов, записывается общая система уравнений (по три уравнения для сил и моментов). С помощью полученной системы рассчитываются нагрузки в земной системе координат для любого типа нагружений, кроме Y^*M_x, Y^*M_y . Для данных видов нагружений необходимо отдельно вычислять деформацию и вводить дополнительные поправки к полученной системе уравнений вследствие дополнительных нагрузок из-за конструктивных особенностей сенда.

Алгоритм определения пространственного положения начала координат сенда в процессе калибровки. Линейные перемещения начала координат сенда вдоль осей и угол рыскания ψ рассчитываются по измеренным значениям изменений длины лент. Металлические ленты не являются абсолютно жёсткими и деформируются в процессе калибровки. Изменения длины лент определяются датчиками перемещения, встроенными в силозадающие электро-механизмы.

Перед установкой тензометрических весов на сенд и началом калибровки исследуются зависимости длины лент от силы их натяжения. Калибровочное приспособление жёстко закрепляется, поочередно задаются нагрузки во всех шести лентах, датчиками перемещения измеряются их длины, записываются показания датчиков силы (см. рис. 1, поз. 4). Расчётные коэффициенты линейной жёсткости лент калибровочного сенда 6ГС-40М следующие:

$$K_y = -5,80 \cdot 10^{-8}; K_x = -6,69 \cdot 10^{-7}; \\ K_{z1} = -1,89 \cdot 10^{-6}; K_{z2} = -1,92 \cdot 10^{-6}; \\ K_{My1} = -8,34 \cdot 10^{-7}; K_{My2} = -1,12 \cdot 10^{-6}.$$

С учётом этих данных изменение Δl длины произвольной ленты при калибровке тензометрических весов рассчитывается по формуле

$$\Delta l = l_i - l_0 - K_N N,$$

где l_i, l_0 – длины ленты при i -м нагружении и в начале калибровки при нулевых нагрузках, соответственно; K_N – коэффициент жёсткости ленты; N – заданная нагрузка.

Исходные линейные перемещения H_x, H_y, H_z начала координат сенда и угол ψ вычисляются как

$$H_x = -[(\Delta r_{My1} + \Delta r_{My2})/2 - \Delta r_{X2}]/2; H_y = -\Delta r_y; \\ H_z = -(\Delta r_{z1} - \Delta r_{z2})/2; \psi = (\Delta r_{My1} - \Delta r_{My2})/L_{My}^z,$$

где $\Delta r_{My1}, \Delta r_{My2}, \Delta r_x, \Delta r_y, \Delta r_{z1}, \Delta r_{z2}$ – изменения длины лент, совпадающих с осями $M_{y1}, M_{y2}, X, Y, Z_1, Z_2$; L_{My}^z – расстояние между лентами M_{y1}, M_{y2} .

Углы тангажа θ и крена γ калибровочного приспособления измеряются двухплоскостным акселерометром, установленным на верхней плоскости приспособления [1].

Методика расчёта нагрузок с учётом положения системы координат сенда в пространстве. Чтобы рассчитать нагрузки в земной системе координат при произ-

вольном положении в пространстве системы координат стенда, использовали общую систему уравнений статики начала координат стенда в проекции на оси OX_3 , OY_3 , OZ_3 . Для этого отдельно рассматривали схемы деформаций стенда для всех трёх перемещений точки O_c вдоль осей $OX_3Y_3Z_3$ на расстояния H_x , H_y , H_z и записывали уравнения равновесия сил. В качестве примера исследуем перемещение вдоль оси OX_3 на расстояние H_x .

Перемещение начала координат стенда вдоль оси OX_3 на расстояние H_x . При этом возникают дополнительные составляющие сил вдоль оси OX_3 от действия сил натяжения в ленте Y и тросе, соединяющем суммирующий рычаг CP_X ленты X с вывешивающим устройством BY_X данного рычага (рис. 2). Уравнения равновесия в проекции сил на оси OX_3 , OY_3 имеют вид

$$\left. \begin{aligned} OX_3: R_X - R_{M_{y1}} - R_{M_{y2}} + R_Y \sin \alpha + N_{BY_X} \sin \alpha_1 + F_{BX} &= 0; \\ OY_3: R_Y \cos \alpha + F_{BY} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где R_X , R_Y – силы натяжения лент X , Y ; $R_{M_{y1}}$, $R_{M_{y2}}$ – силы натяжения лент, задающие момент M_y ; $\sin \alpha \approx H_x/L_Y$; $\sin \alpha_1 \approx H_x/L_{BY_X}$; L_Y – длина ленты Y ; L_{BY_X} , N_{BY_X} – длина и сила натяжения троса, соединяющего вывешивающее устройство с суммирующим рычагом; F_{BX} , F_{BY} – силы упругости весов вдоль осей X , Y .

В первом уравнении системы (1) искомой поправкой задаваемой нагрузки X является сумма

$$R_Y \sin \alpha + N_{BY_X} \sin \alpha_1.$$

Аналогичным образом составляются уравнения для линейных перемещений остальных видов. Далее уравнения объединяются в общую систему, по которой рассчитываются значения сил в земной системе координат.

Поворот системы координат стенда относительно осей OX_3 , OY_3 , OZ_3 земной системы координат на углы θ , ψ , γ . При этом изменяются длины плеч, на которых задаются соответствующие моменты сил. Для получения истинных значений моментов необходимо измеренные на стенде значения умножить на поправочные коэффициенты K . Рассмотрим на примере поворота системы координат стенда на угол γ получение исходного коэффициента K^γ (рис. 3). Момент M_x задаётся с помощью каретки, момент M_x^c – стендом и рассчитывается по формуле

$$M_x^c = (R_{M_{x1}} - R_{M_{x2}}) L_x / 2,$$

где $R_{M_{x1}}$, $R_{M_{x2}}$ – измеренные силы натяжения лент, задающие момент M_x .

При развороте системы координат стенда относительно оси OX_3 на некоторый угол γ действующее плечо для момента M_x , как и для момента M_y , становится равным $BB_1 = AA_1 \cos \gamma$, где AA_1 – исходное плечо для момента M_x . Поправочный коэффициент для моментов M_x и M_y будет одинаковым: $K^\gamma = \cos \gamma$. Таким образом, значения, например, момента M_x в земной системе координат вычисляются как $M_x = M_x^c K^\gamma$. Аналогичным образом рассчитываются поправочные коэффициенты при повороте системы координат стенда на углы θ , ψ и корректируются значения заданных моментов.

Расчёт дополнительных погрешностей стенда с

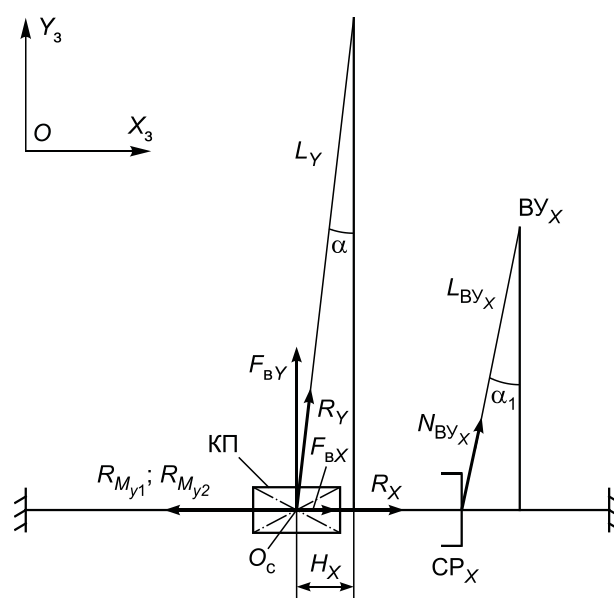


Рис. 2. Схема перемещения начала координат стенда O_c вдоль оси OX_3 земной системы координат на расстояние H_x ; вид в плоскости OX_3Y_3 ; КП – калибровочное приспособление; L_Y – длина ленты Y ; L_{BY_X} – длина троса, соединяющего вывешивающее устройство BY с суммирующим рычагом CP , встроенного в ленту; F_{BX} , F_{BY} – силы упругости весов вдоль осей OX_3 , OY_3

учетом его конструктивных особенностей. Ввиду особенностей конструкции стенда 6ГС-40М при повороте системы координат стенда вокруг оси OX_3 на угол γ появляются дополнительные составляющие погрешностей измерений нагрузок Y , M_x от действия сил натяжения в лентах M_{y1} , M_{y2} . Рассмотрим более подробно схему деформации стенда (рис. 4).

При задании крутящего момента M_x калибровочное приспособление поворачивается относительно оси OX_3 на угол γ . Ленты M_{y1} , M_{y2} изменяют пространственное положение, что приводит к появлению дополнительных компонентов $F_{M_{y1}}^Y$, $F_{M_{y2}}^Y$,

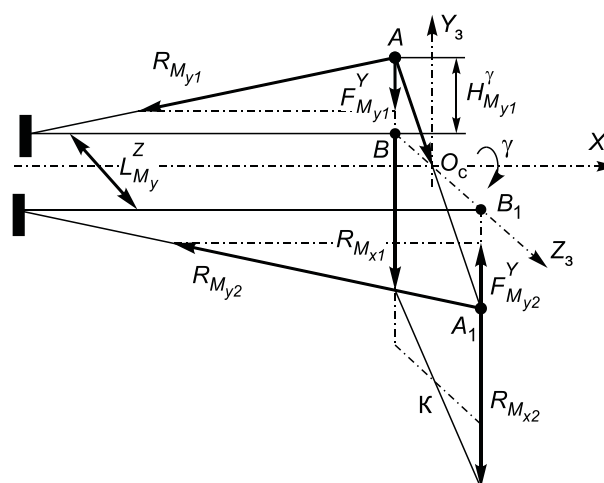


Рис. 3. Схема деформации стенда при повороте системы координат стенда на угол γ ; $L_{M_y}^Z$ – расстояние между лентами M_{y1} , M_{y2}

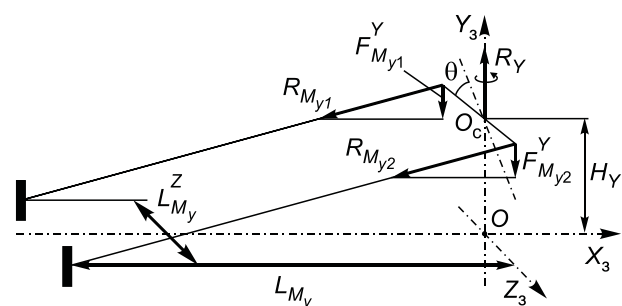


Рис. 4. Схема деформации стэнда при одновременном приложении силы Y и момента M_y

которые являются проекциями сил натяжения R_{My1} , R_{My2} на ось OY_3 и, следовательно, влияют на крутящий момент M_x и силу Y.

Погрешности нормальной силы $\Delta Y(\gamma)$ и крутящего момента $\Delta M_x(\gamma)$ рассчитываются по выражениям

$$\Delta Y(\gamma) = (R_{My1} - R_{My2}) \sin \gamma L_{My}^Z / (2L_{My});$$

$$\Delta M_x(\gamma) = -(R_{My1} + R_{My2}) \sin \gamma (L_{My}^Z)^2 / (4L_{My}).$$

При совместной калибровке стэнда по компонентам Y, M_y силы натяжения лент M_{y1} , M_{y2} оказывают влияние на крутящий момент M_x (см. рис. 4). Под действием нагрузки Y калибровочное приспособление перемещается на расстояние H_y вдоль оси OY_3 , а при задании момента M_y оно разворачивается на угол θ вокруг той же оси. Проекции F_{My1}^Y , F_{My2}^Y сил натяжения R_{My1} , R_{My2} на ось OY_3 создают дополнительную погрешность

$$\Delta M_x(y) = (R_{My2} - R_{My1}) H_y L_{My}^Z / (2L_{My}).$$

Полученные погрешности включаются в общую систему уравнений для расчёта сил и моментов в земной системе координат. В этой системе учитывается деформация стэнда при любых нагружениях весов и положениях начала координат стэнда в пространстве (см. табл. 1).

Апробирование методики для учёта систематических погрешностей. При калибровке тензометрических весов 6ЭВ128-3(2) определили систематические погрешности шестикомпонентного калибровочного стэнда 6ГС-40М. Угловые и линейные деформации тензометрических весов, полученные при их калибровке на стэнде 6ГС-40М, а также погрешности нагрузок, рассчитанные по разработанной методике, приведены в табл. 3.

Заключение. Проведённые исследования показали, что систематические погрешности калибровочного стэнда 6ГС-40М обусловлены линейными и угловыми деформациями тензометрических весов и линейными деформациями металлических лент. Полученные погрешности сил

Т а б л и ц а 3

Деформации тензометрических весов 6ЭВ128-3(2) и погрешности приложенных нагрузок при калибровке весов на стэнде 6ГС-40М

Калибруемый компонент	Максимальная заданная нагрузка	Максимальная деформация		Погрешность	
		линейная, мм	угловая, °	абсолютная	относительная, %
X, Н	2000	1,8	—	46	2,3
Y, Н	20000	70,7	—	217	1,1
Z, Н	4000	11,7	—	187	4,6
M_x , Н·м	1250	—	2,6	9	0,7
M_y , Н·м	750	—	1,4	11	1,4
M_z , Н·м	2000	—	0,5	15	0,8

и моментов, задаваемых при калибровке тензометрических весов 6ЭВ128-3(2) на стэнде 6ГС-40М, превышают значения, указанные в качестве требований к точности стэндов. Следовательно, учёт определённых в данной работе систематических погрешностей повышает точность стэнда. Разработанную методику можно применять для калибровочных стэндов схожих конструкций.

Л и т е р а т у р а

1. Горбачев Н. А., Горбушин А. Р., Крапивина Е. А., Судакова И. А. Применение акселерометров для измерения углов тангажа и крена в аэродинамическом эксперименте // Измерительная техника. 2012. № 8. С. 25–28.
2. Гусев В. П., Тихомиров В. И. Основные систематические погрешности калибровочного стэнда МСЭ-000 // Труды ЦАГИ. 1983. Вып. 2207. С. 107–114.
3. Xiong Lin, Wang Jinyin, Liu Jiahua, Wen Shuai, Liu Chunfeng, Jiang Ping. Research on calibration method for obtaining body coordinate system coefficients matrix using non-repositioning calibration system // J. Experiments in Fluid Mechanics. 2015. V. 29(6). P. 84–88.
4. Wang Jinyin. Problems involved in comparison of calibration of strain gage balance in ground coordinate system and body coordinate system // J. Experiments in Fluid Mechanics. 2005. V. 19(2). P. 103–109.
5. Zhu Ben-hua, Liang Lei. Crucial technology analysis on restoration measurement of automatic balance calibration system // Ordnance industry automation. 2009. V. 28(12). P. 79–88.
6. Hufnagel K., Quade M. The 2nd Generation balance calibration machine of Darmstadt university of technology (TUD) // Proc. 45th AIAA: Aerospace Sci. Meeting and Exhibit, 2007.

Дата принятия: 02.05.2017.