

УДК 533.6.071

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-57-61

**РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПРОВЕРКИ И ТАРИРОВКИ
ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕСОВ****канд. техн. наук В.В. МАЛЕРОНОК, канд. техн. наук В.А. ПОТАПОВ,
С.Н. РОМАНЁНОК****(Белорусская государственная академия авиации, Минск)**

Предложен расчетно-графический способ проверки показаний тензометрических датчиков, используемых для измерения аэродинамических сил и моментов. В основу способа лег расчет статической составной конструкции весового механизма лабораторного стенда НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба». Определены основные силы и моменты, действующие на конструкцию, значения которых сравнивались с показаниями тензометрических датчиков. В случае несоответствия значений, полученных путем измерения и расчета, производились построение тарировочного графика и определение по нему линейного тарировочного уравнения с последующей корректировкой несоответствующих значений.

Ключевые слова: аэродинамическая труба, аэродинамические весы, тензометрический датчик, подъемная сила, сила лобового сопротивления, расчетно-графический способ, статическая конструкция.

Введение. При исследовании аэродинамических характеристик летательных аппаратов или других объектов, при проведении аэродинамических экспериментов используют промышленные исследовательские лабораторные комплексы (стенды) по типу аэродинамической трубы, соответствующие всем техническим требованиям, которые необходимо соблюдать для выполнения условия аэродинамического подобия между обдуваемой моделью и натурным полноразмерным объектом. Однако ряд узлов (например, аэродинамические весы) требуют проверки и тарировки измеряемых значений с целью их верификации и приведения в соответствие со значениями реальных физических величин (подъемной силы и силы лобового сопротивления).

Отличительной особенностью данного исследования является следующее: на точечный тензометрический датчик сила действует не по нормали, а через плечо, на которое устанавливается обдуваемый объект. Следовательно, для выполнения проверки необходимо применить расчетно-графический способ, учитывающий совокупность сил и моментов, возникающих в статически уравновешенной системе.

Основная часть. Исследования проводились на учебном лабораторном стенде НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба» (рисунок 1)¹.



а – компоновка стенда; б – тензометрические аэродинамические весы

Рисунок 1. – Лабораторный стенд НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба»

Для интерпретации показаний тензометрических датчиков использовалось программное обеспечение (далее – ПО) лабораторного стенда НТЦ-19.02. В рабочем окне данного ПО величины сил, воздействующих на сам датчик (подъемная сила и сила лобового сопротивления), отображаются в размерности килограмм-сила (кгс) или ньютон (Н) без индикации их промежуточных преобразований в код или уровень напряжения (рисунок 2).

¹ URL: <https://ntpcentr.com/ru/catalog/aerodinamika/ntc-19-02-aerodinamicheskaya-truba>

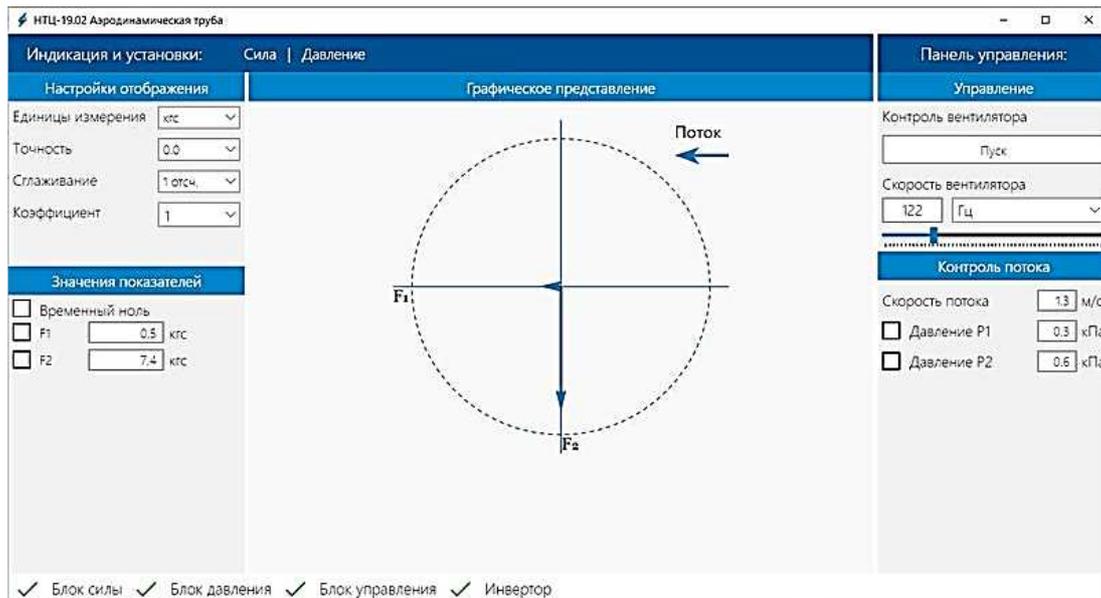


Рисунок 2. – Рабочее окно ПО лабораторного стенда НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба»

В лабораторном стенде НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба» аэродинамические весы представляют собой весовой механизм в виде духконсольной горизонтальной балки (прутка), шарнирно закрепленной в точке А, которая опирается на два катка, расположенных под 90° относительно друг друга, в точке D (катки установлены на тензометрические датчики для измерения подъемной силы F_Y и силы лобового сопротивления F_X) (рисунок 3).

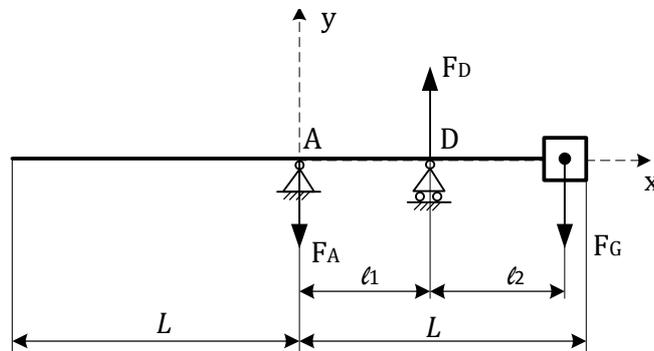


Рисунок 3. – Схема составной конструкции весового механизма лабораторного стенда НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба»²

До начала измерений балка (пруток) уравновешена своими равными плечами L относительно точки А, и, следовательно, на датчике в точке D показания отсутствуют. При установке обдуваемой модели в аэродинамическую трубу на одну консоль весов ее вес уравновешивается дополнительным грузом на второй консоли, и показания датчика остаются нулевыми (рисунок 4).

Измерения начинаются после появления подъемной силы F_Y и силы лобового сопротивления F_X , нарушающих равновесие системы.

Для выполнения проверки показаний тензометрических датчиков на одну из консолей балки (прутка) подвешивались грузы заведомо известной массы (поверенные гири), имитирующие появление подъемной силы F_Y , а при повороте механизма на 90° с вращением по оси балки (прутка) – силы лобового сопротивления F_X . Далее производились построения расчетной схемы конструкции и расчет сил, действующих на датчик, с последующим сравнением полученных значений со значениями, отображаемыми программным обеспечением.

² ГОСТ 2.770-68 Обозначения условные графические в схемах. Элементы кинематики. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1967. – 44 с.



Рисунок 4. – Обдуваемая модель, установленная на консоль аэродинамических весов лабораторного стенда НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба»

Подвешиваемый груз представляет собой распределенную нагрузку с приложением силы тяжести в его центре масс (геометрическом центре). Следовательно, по мере увеличения массы и геометрических размеров груза будет изменяться и плечо l_2 (см. рисунок 3).

Составлены система уравнений моментов относительно точек А, D и уравнение проекций сил на ось Y. При этом, если сила относительно точки стремится повернуть балку (пруток) против часовой стрелки, знак момента положительный, по часовой стрелке – знак момента отрицательный [1].

$$\begin{cases} \Sigma M_A = -F_G(l_1 + l_2) + F_D l_1 = 0; \\ \Sigma M_D = -F_G l_2 + F_A l_1 = 0; \\ \Sigma F_y = -F_A + F_D - F_G = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $F_G = mg$ – сила тяжести груза массой m (Н);

g – ускорение свободного падения (m/c^2);

F_A – сила реакции опоры в точке А (Н);

F_D – сила реакции опоры в точке D, действующая на датчик (Н);

l_1, l_2 – расстояния между точками приложения сил (м).

Из первого и второго уравнений выразим силы, действующие в опорах А, D, а третье используем для выполнения проверки проведенного расчета:

$$\begin{aligned} F_D &= \frac{F_G(l_1 + l_2)}{l_1} = \frac{mg(l_1 + l_2)}{l_1}, \\ F_A &= \frac{F_G l_2}{l_1} = \frac{mgl_2}{l_1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Произведем расчет сил реакций опор по (2), подставив известные значения m, g, l_1, l_2 , пренебрегая весом балки (прутка), и выполним проверку полученных результатов (сумма сил должна быть равна нулю) (таблица 1).

Таблица 1. – Результаты расчета сил реакций опор

m , кг	g , m/c^2	l_1 , м	l_2 , м	F_G , Н	F_A , Н	F_D , Н	ΣF_y
0	9,8	0,06	0	0	0	0	0
0,33	9,8	0,06	0,15	3,234	8,085	11,319	0
0,49	9,8	0,06	0,15	4,802	12,005	16,807	0
0,82	9,8	0,06	0,13	8,036	17,41133	25,44733	0
0,986	9,8	0,06	0,14	9,6628	22,54653	32,20933	0

Проверка полученных результатов показала, что расчет выполнен верно – сумма найденных сил F_G, F_A, F_D равна нулю. Следовательно, полученное значение силы F_D можно использовать для проверки показаний тензометрических датчиков, также установленных в точке D.

Выполнено измерение веса грузов массами m (см. таблицу 1) с помощью тензометрических аэродинамических весов лабораторного стенда НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба». Получены значения с тензометра, измеряющего подъемную силу F_y , и с тензометра, измеряющего силу лобового сопротивления F_x путем поворота механизма на 90° с вращением по оси балки (прутка) (таблица 2).

Таблица 2. – Результаты измерения сил, созданных грузами различной массы

F_D , Н (расчетное)	F_Y , Н (измеренное)	F_X , Н (измеренное)	$\varepsilon(Y)$, %	$\varepsilon(X)$, %
0	0	0	0	0
11,319	10,78	9,8	4,761905	13,41991
16,807	14,7	12,74	12,53644	24,19825
25,44733	25,48	21,56	0,12837	15,27599
32,20933	31,36	29,4	2,636917	8,72211
		среднее	5,015909	15,40407

Для оценки полученных значений сил найдены относительные погрешности по формулам [2]:

$$\varepsilon(Y) = \frac{|F_Y - F_D|}{F_D} \cdot 100\% ,$$

$$\varepsilon(X) = \frac{|F_X - F_D|}{F_D} \cdot 100\% , \quad (3)$$

где F_Y – сила, измеренная датчиком по оси Y (Н);

F_X – сила, измеренная датчиком по оси X (Н);

F_D – сила реакции опоры в точке D , значения которой рассчитаны и приняты за достоверные (Н).

Как видно из результата расчета относительной погрешности по (3) (см. таблицу 2), тензометрический датчик, измеряющий величину подъемной силы F_Y , имеет среднюю погрешность в 5%, что близко к средней максимальной погрешности тензометрических датчиков такого класса точности³. Следовательно, получаемые с этого датчика значения можно использовать без тарировочного графика (уравнения) и подгонных коэффициентов.

Однако относительная погрешность тензометрического датчика, измеряющего величину силы лобового сопротивления F_X , имеет погрешность в 15% (см. таблицу 2), что ведет к искажению реальных значений измеряемой силы. ПО лабораторного стенда НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба» не представлено в открытом исходном коде и нет возможности для внесения калибровок в само ПО, поэтому для измеряемых значений тензометрического датчика, установленного по оси X , необходимо построить тарировочный график и получить уравнение зависимости для пересчета измеряемых значений [3].

На основании построенного тарировочного графика (рисунок 5) получена линейная зависимость для пересчета измеряемых значений:

$$F_{X(\text{тар})} = 1,1036F_x + 0,9332 , \quad (4)$$

где $F_{X(\text{тар})}$ – сила по оси X , значения которой скорректированы тарировочным уравнением (Н).

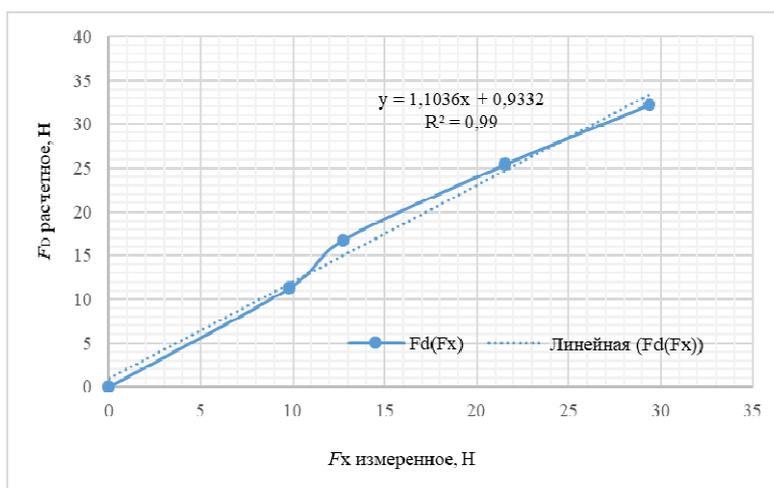


Рисунок 5. – Тарировочный график и линейное уравнение

³ ГОСТ 8.631-2013 (OIML R 60:2000) Датчики весовые. Общие технические требования. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2014. – 82 с.

Измеренные ранее датчиком по оси X значения силы F_X подставили в уравнение (4) и произвели их тарировку (таблица 3).

Таблица 3. – Результаты тарировки показаний датчика по оси X

F_D , Н (расчетное)	F_X , Н (измеренное)	$F_{X(\text{тар})}$, Н	$\varepsilon(F_{X(\text{тар})})$, %
0	0	0	0
11,319	9,8	11,74848	3,794328
16,807	12,74	14,99306	10,79274
25,44733	21,56	24,72682	2,831393
32,20933	29,4	33,37904	3,631587
		среднее	5,262513

При этом расчет погрешности относительно силы F_D , значения которой рассчитаны и приняты за достоверные, показал, что скорректированные значения имеют среднюю относительную погрешность в 5%, что допустимо для тензометрических датчиков такого класса точности.

Заключение. Проведена проверка и тарировка показаний тензометрических датчиков аэродинамических весов. Построен тарировочный график и по нему определено линейное уравнение зависимости (тарировочное уравнение), которое удобно использовать для корректировки значений, снимаемых с датчика.

Таким образом, подобную методику проверки и тарировки датчиков можно применять для любого вида измерений и получать тарировочные графики, таблицы и уравнения, которые можно использовать как для корректировки однородных физических величин (например, сил), так и для перехода между разнородными (например, сила–код, сила–напряжение и т.п.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов Ю.В., Клиньских Н.А. Теоретическая механика: учеб. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 474 с.
2. Метрология и электрические измерения: учеб. пособие / Е.Д. Шабалдин, Г.К. Смолин, В.И. Уткин и др.; под ред. Е.Д. Шабалдина. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф. пед. ун-т», 2006. – 282 с.
3. Бирюля И.И. Экспериментальные методы определения линейных деформаций: учеб. пособие по лаб. работе. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1980. – 22 с.

REFERENCES

1. Denisov, Yu.V. & Klinskikh, N.A. (2013). *Teoreticheskaya mekhanika*. Ekaterinburg: UrFU. (In Russ.)
2. Shabaldin, E.D., Smolin, G.K., Utkin, V.I. & Zarubin, A.P. (2006). *Metrologiya i elektricheskie izmereniya*. Ekaterinburg: Izd-vo GOU VPO «Rossiiskii gosudarstvennyi professional'no-pedagogicheskii institut». (In Russ.)
3. Biryulya, I.I. (1980). *Eksperimental'nye metody opredeleniya lineinykh deformatsii*. Khar'kov: Khar'kovskii aviatsionnyi institut. (In Russ.)

Поступила 25.06.2024

CALCULATIONAL GRAPHICAL METHOD FOR CHECKING AND CALIBRATING TENSOMETRIC SENSORS OF AERODYNAMIC SCALES

V. MALERONOK, V. POTAPOV, S. ROMANIONOK
(Belarusian State Aviation Academy, Minsk)

Calculational graphical method for checking the readings of tensometric sensors, which are used to measure aerodynamic forces and moments, is proposed. The method is based on the calculation of the static composite structure of the weight mechanism of the laboratory stand NTC-19.02 "Wind Tunnel". The main forces and moments acting on the structure were determined, the values of which were compared with the readings of strain gauges. In case of discrepancy between the values obtained by measurement and calculation, a calibration graph was constructed and a linear calibration equation was determined from it, followed by correction of the discrepant values.

Keywords: wind tunnel, aerodynamic balance, strain gauge, lift force, drag force, calculation graphical method, static design.