

УДК 532.525.6

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-3-311-319

Для цитирования: Козлов В. С., Котельникова С. В. Трехкомпонентные аэродинамические тензосесы // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 3. С. 311–319. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-3-311-319.

For citation: Kozlov V. S., Kotelnikova S. V. [Three-component aerodynamic load cells]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 3, P. 311–319. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-3-311-319.

Трехкомпонентные аэродинамические тензосесы

В. С. Козлов^{*}, С. В. Котельникова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: kozlov@sibsau.ru

В статье рассматривается воздействие потока на модели, исследуемые в аэродинамических трубах. Для определения силового воздействия потока на исследуемую модель предложен более точный и надёжный метод непосредственного измерения сил и моментов с помощью аэродинамических тензометрических весов. При решении плоской задачи для симметричной модели при нулевом угле скольжения предлагается конструкция трёхкомпонентных весов, измеряющих подъёмную силу, силу лобового сопротивления и момент тангажа. Для исключения взаимодействия между поддерживающими устройствами и моделью, которое вызывает возмущения в потоке вблизи модели, весы располагаются вне модели и рабочей части аэродинамической трубы. Компоненты аэродинамической силы и момента, действующие на модель, измеряются при помощи тензодатчиков сопротивления, преобразующих деформации упругого элемента в изменение электрического сопротивления, которое измеряется прибором, соединённым с соответствующей измерительной схемой. Выбор тензодатчиков в качестве весовых элементов обусловлен их весьма малыми размерами и весом, возможностью измерения очень незначительных относительных деформаций упругих элементов, малой инертностью, что позволяет измерять не только статические, но и динамические нагрузки, а также возможностью дистанционных измерений. Для компенсации влияния различных источников погрешностей, повышения чувствительности и обеспечения большей точности измерений тензодатчики соединены по мостовой схеме и включены во все четыре плеча моста. Деформация горизонтальной измерительной балки вызывает изменение сопротивления не только в тензодатчиках, измеряющих момент тангажа, но и в тензодатчиках, предназначенных для измерения подъёмной силы. Так как конструкция весов не позволяет электрически разделить эти компоненты, то влияние момента тангажа на величину подъёмной силы определяется в процессе тарировки и оценивается с помощью специального графика влияния, построенного по результатам тарировочных данных. При тензометрических измерениях выходные величины сил и момента, действующих на испытываемую модель, получаются в виде соответствующих показаний прибора, измеряющего электрические сигналы, пропорциональные приложенным силам. Для перевода приборных данных в величины сил и моментов производится совместная тарировка весов и приборов с целью получения тарировочных коэффициентов. Дополнительные составляющие аэродинамических сил и моментов, создаваемые державкой, определяются путем её продувки в присутствии модели. Приведены расчетные зависимости для определения составляющих аэродинамического воздействия. Величины коэффициентов аэродинамических сил и моментов даются в поточной системе координат. Дано заключение о том, что использование тензометрических весов позволяет значительно сократить время проведения эксперимента и повысить точность определения исследуемых параметров по сравнению с весами механического типа.

Ключевые слова: тензометрические весы, сила лобового сопротивления, подъёмная сила, момент тангажа.

Three-component aerodynamic load cells

V. S. Kozlov*, S. V. Kotelnikova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: kozlov@sibsau.ru

The article examines the effect of flow on models studied in wind tunnels. To determine the force effect of the flow on the model under study, a more accurate and reliable method of directly measuring forces and moments using aerodynamic strain gauge balances is proposed. When solving a plane problem for a symmetrical model at zero slip angle, a design of three-component scales is proposed that measures the lift force, the drag force and the pitching moment. To eliminate the interaction between the supporting devices and the model, which causes disturbances in the flow near the model, the scales are located outside the model and the working part of the wind tunnel. The components of the aerodynamic force and moment acting on the model are measured using resistance strain gauges, which convert the deformation of the elastic element into a change in electrical resistance, which is measured by an instrument connected to an appropriate measuring circuit. The choice of strain gauges as weight elements is due to their very small size and weight, the ability to measure very small relative deformations of elastic elements, low inertia, which makes it possible to measure not only static but also dynamic loads, and the possibility of remote measurements. To compensate for the influence of various sources of errors, increase sensitivity and ensure greater measurement accuracy, the strain gauges are connected via a bridge circuit and included in all four arms of the bridge. Deformation of the horizontal measuring beam causes a change in resistance not only in the strain gauges that measure the pitching moment, but also in the strain gauges designed to measure the lift force. Since the design of the scales does not allow for electrical separation of these components, the influence of the pitching moment on the magnitude of the lift force is determined during the calibration process and is assessed using a special influence graph constructed from the results of calibration data. In strain gauge measurements, the output values of forces and moments acting on the model under test are obtained in the form of corresponding readings from a device that measures electrical signals proportional to the applied forces. To convert instrument data into values of forces and moments, a joint calibration of scales and instruments is carried out in order to obtain calibration coefficients. Additional components of aerodynamic forces and moments created by the holder are determined by purging it in the presence of the model. Calculated dependencies for determining the components of the aerodynamic impact are given. The values of the coefficients of aerodynamic forces and moments are given in the flow coordinate system. The pledge has been given.

Keywords: strain gauge scales, drag force, lift force, pitching moment.

Введение

Воздействие потока на модели, исследуемые в аэродинамических трубах, сводится к силам, непрерывно распределенным по обтекаемой поверхности модели. Эти силы характеризуются в каждой точке поверхности давлением и касательным напряжением. Интегрируя эти нагрузки по поверхности, можно найти суммарные аэродинамические характеристики. Более точным и надежным методом определения суммарных аэродинамических сил и моментов является непосредственный метод измерения сил и моментов при помощи аэродинамических весов. Задачи комплексной автоматизации многофакторного эксперимента не могут быть решены традиционными измерительными системами с преобразователями механического типа. Для решения задач измерений при аэродинамических испытаниях и повышения уровня их автоматизации необходимо использовать тензометрические измерительные системы [1–4].

Одним из основных признаков аэродинамических весов является число измеряемых компонент. В зависимости от этого числа весы могут быть трех-, четырех- и шестикомпонентными.

Шестикомпонентные весы измеряют величины (компоненты) проекций полной аэродинамической силы на выбранные три взаимно перпендикулярные оси координат и три компоненты полного момента относительно этих осей [5–8].

Трехкомпонентные аэродинамические весы измеряют две компоненты полной аэродинамической силы (подъемную силу Y и силу лобового сопротивления X) и продольный момент относительно поперечной оси (момент тангажа M_z) [9].

В зависимости от расположения аэродинамических весов относительно модели и аэродинамической трубы они разделяются на два типа: весы, располагаемые вне модели и рабочей части трубы, и весы, располагаемые внутри модели или державки.

Конструкция и принцип работы устройства

В аэродинамической лаборатории кафедры летательных аппаратов разработаны трехкомпонентные весы первого типа.

Работа весов основана на тензометрическом методе измерения сил и моментов. Силовые упругие элементы (балки) конструктивно выполняются так, что они имеют наименьшую жесткость относительно одной из осей. При приложении нагрузки вдоль этой оси возникает наибольшая деформация этого элемента. В других направлениях жесткость упругого элемента значительно больше, и если действуют усилия в направлении других осей, то деформация упругого элемента практически отсутствует. Балки имеют настолько малые деформации, что вызванными ими перемещениями модели можно пренебречь. Измерение малых деформаций упругих элементов производится с помощью тензодатчиков, преобразующих величину деформации в изменение электрического сопротивления, которое затем измеряется прибором, соединенным с соответствующей измерительной схемой.

Выбор тензодатчиков в качестве весовых элементов обусловлен их весьма малыми размерами и весом, возможностью измерения очень незначительных относительных деформаций упругих элементов, малой инертностью, что позволяет измерять не только статические, но и динамические нагрузки, а также возможностью дистанционных измерений [10–12].

Напряженное состояние на поверхности упругого элемента, к которой приклеен датчик, может изменяться от точки к точке, поэтому изменение сопротивления датчика пропорционально некоторому среднему напряжению на участке с длиной, равной базе датчика. Для того чтобы датчики фиксировали напряжение в точке, в аэродинамических весах использованы датчики с малой базой (7 мм) сопротивлением 200 Ом. Тензодатчики соединены по мостовой схеме и включены во все четыре плеча моста, что позволяет существенно повысить чувствительность и обеспечить большую точность измерений.

В аэродинамических весах, располагаемых вне модели, разложение полной аэродинамической силы и момента на компоненты осуществляется при помощи упругих звеньев, которые одновременно выполняют роль и измерительных элементов. Конструктивная схема весов представлена на рис. 1.

Модель устанавливается в потоке при помощи хвостовой Г-образной державки, чтобы исключить влияние на поток в том месте рабочей части, где установлена модель. При продувке в аэродинамической трубе измеряется сумма двух аэродинамических сил, одна из которых действует на модель, а другая – на поддерживающие эту модель устройства, размещенные в потоке. Для нахождения силы, действующей только на модель, из суммарного усилия вычитается составляющая, приходящаяся на поддерживающие устройства. Эта составляющая определяется в результате продувки поддерживающих устройств без модели.

Сила лобового сопротивления X , подъемная сила Y и момент тангажа M_z даются в поточной системе координат, когда ось OX направлена по потоку, ось OY – перпендикулярно ей вверх. За начало координат принят центр давления модели.

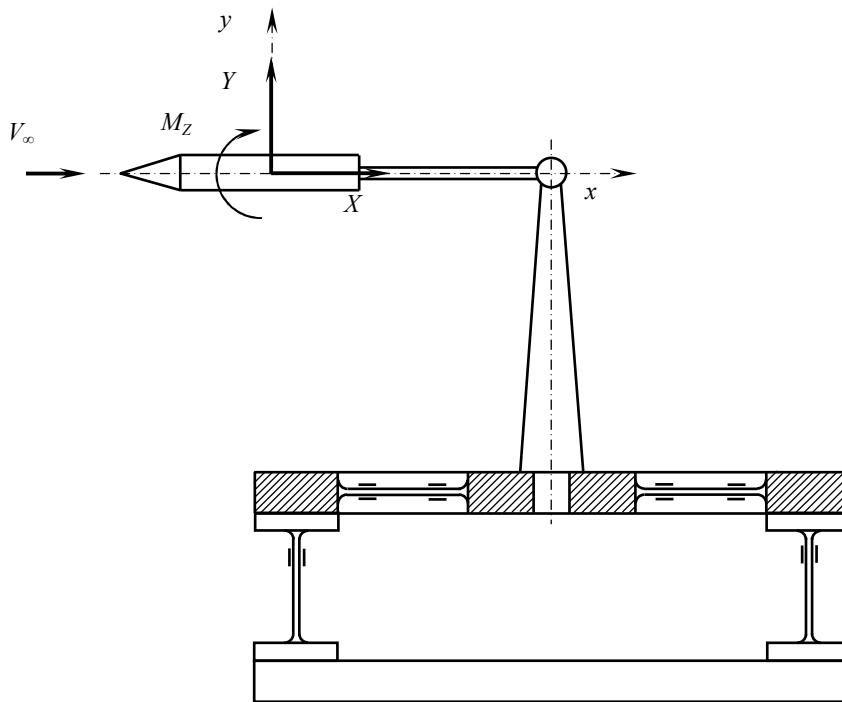


Рис. 1. Конструктивная схема аэродинамических тензовесов

Fig. 1. Design diagram of aerodynamic strain gauges

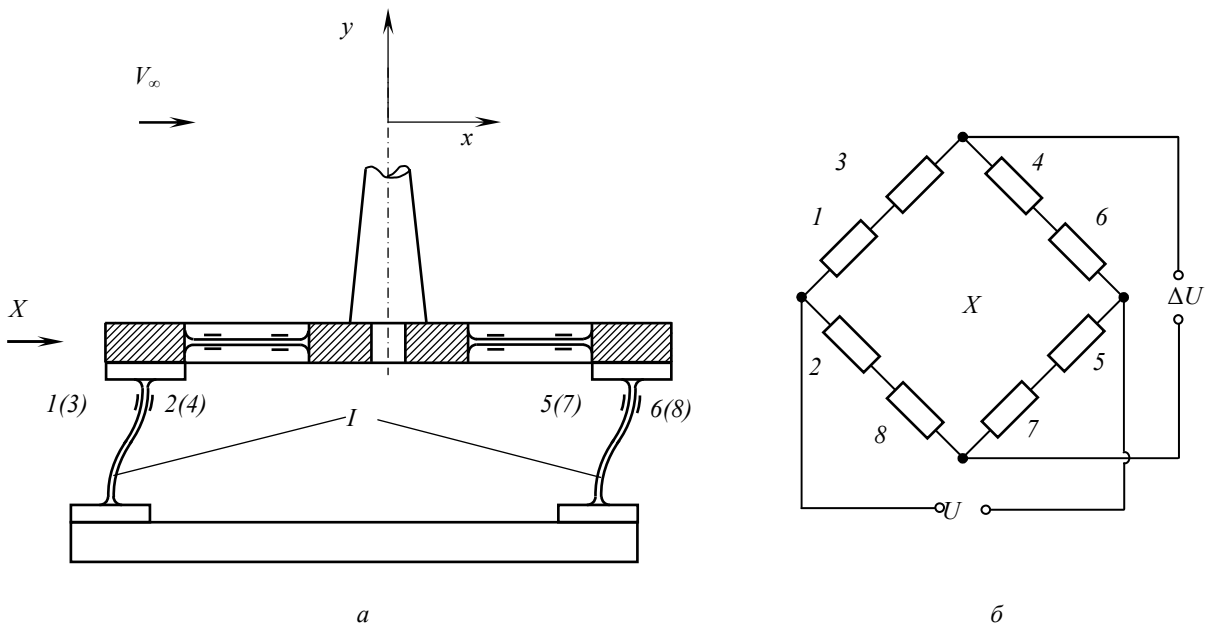


Рис. 2. Измерение силы лобового сопротивления:
а – схема деформации измерительных элементов; б – электрическая схема соединения тензодатчиков

Fig. 2. Measurement of drag force:
а – deformation diagram of measuring elements; б – electrical connection diagram of load cells

Сила лобового сопротивления X , действующая на модель, передается через стойку весов на четыре вертикальные балки I (на рис. 2, *a* показаны только две из них). Упругие элементы имеют очень малое сопротивление изгибу в плоскости действия силы X и значительную жесткость в перпендикулярной плоскости. Эта составляющая (X) вызывает S-образный изгиб балок (рис. 2, *a*). Датчики, наклеенные на противоположные стороны балок, включаются в смежные плечи моста (рис. 2, *б*), и мост реагирует лишь на силу сопротивления X . Другие компоненты (Y , M_z) являются источниками растяжения или сжатия и не вызывают разбаланса моста.

Для измерения подъемной силы Y и момента тангажа M_z служит горизонтальная балка II с закрепленной на ней державкой.

Под действием подъемной силы Y происходит S-образный изгиб упругих элементов этой балки (рис. 3). Для того чтобы получить выходные сигналы, пропорциональные только этой составляющей, в измерительный мост включены тензодатчики 9–12, установленные на нижней и верхней поверхностях чувствительных пластин в центральной части балки II . Схема включения датчиков в мост представлена на рис. 3, *б*. Датчики 9, 11 и 10, 12 включены в разные плечи моста. Если на упругие элементы балки II действует подъемная сила, то эти датчики регистрируют деформации разных знаков и на выходе моста появляется сигнал.

Момент тангажа M_z воспринимается упругими элементами, расположенными вдоль оси OX (рис. 4, *a*, *б*). На периферийной части чувствительных пластин балки II установлены тензодатчики 13–16, включенные в измерительный мост, реагирующий на деформацию изгиба упругих элементов только под действием момента тангажа. Деформация горизонтальной балки II вызывает изменение сопротивления не только в тензодатчиках, измеряющих этот момент, но и в тензодатчиках 9, 11 и 10, 12, предназначенных для измерения подъемной силы. Таким образом, имеется определенное влияние момента тангажа на величину измеряемой подъемной силы.

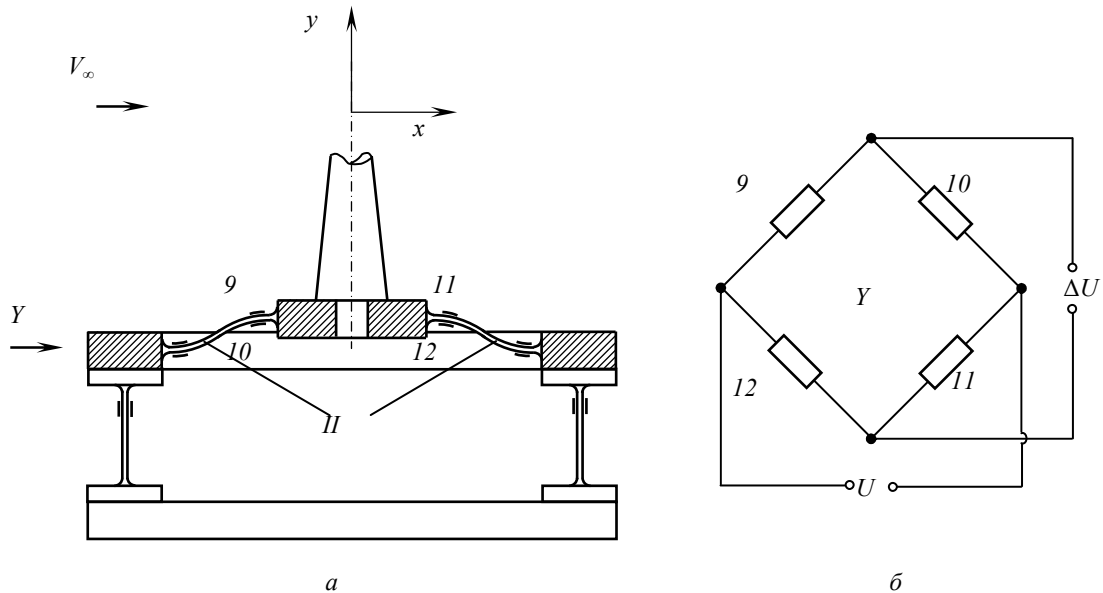


Рис. 3. Измерение подъемной силы:
a – схема деформации измерительных элементов; *б* – электрическая схема соединения тензодатчиков

Fig. 3. Measurement of lifting force:
a – diagram of deformation of measuring elements; *b* – electrical diagram of connection of load cells

При деформации балки II под действием только подъемной силы изменения сопротивления в тензодатчиках 13–16, предназначенных для измерения момента тангажа, не наблюдается. Поэтому влияние подъемной силы на момент тангажа отсутствует.

Так как конструкция весов не позволяет электрически разделить компоненты Y и M_z , то влияние момента тангажа на величину подъемной силы определяется в процессе тарировки и оценивается с помощью специального графика влияния, построенного по результатам тарировочных данных.

При тензометрических измерениях выходные величины сил и момента, действующие на испытываемую модель, получаются в виде соответствующих показаний прибора, измеряющего электрические сигналы, пропорциональные приложенным силам. Для перевода приборных данных в величины сил и моментов необходимо производить совместно тарировку весов и приборов с целью получения так называемых тарировочных коэффициентов k_x , k_y , k_{mz} .

Тарировочные коэффициенты представляют собой цену одного деления шкалы прибора в ньютонах при измерении сил или в ньютонметрах при измерении момента. Умножая полученные в эксперименте данные на соответствующий тарировочный коэффициент с учетом влияния поддерживающих устройств, получают величины сил в ньютонах и моментов в ньютонметрах. При этом дополнительные составляющие аэродинамических сил и моментов, создаваемые державкой и определяемые путем её продувки в присутствии модели, вычитаются со своими знаками из приборных данных [13–15].

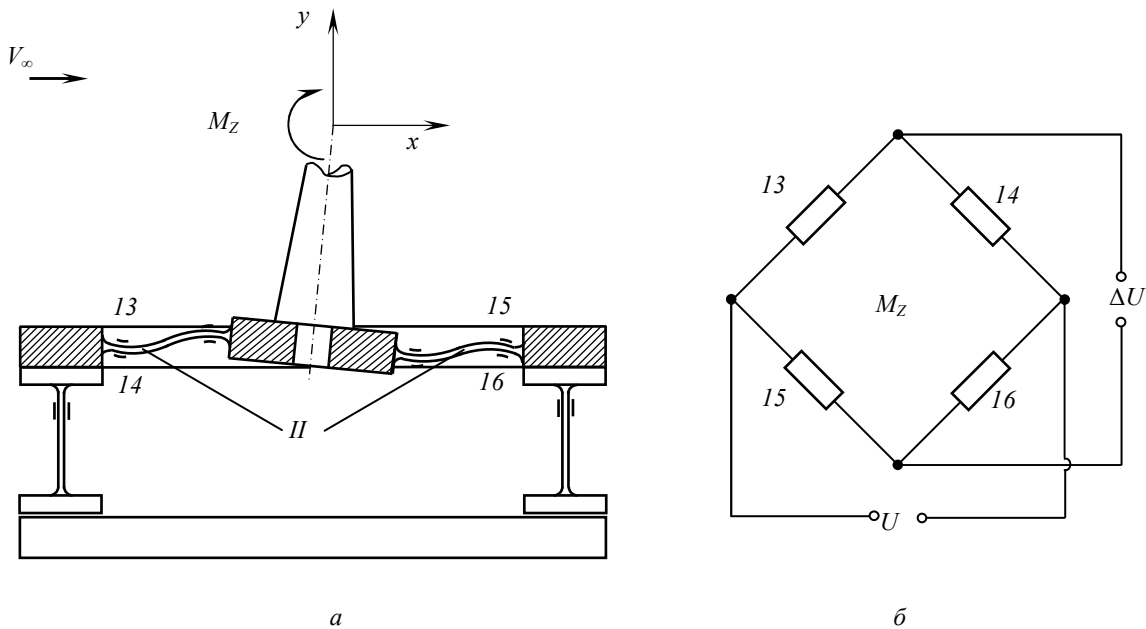


Рис. 4. Измерение момента тангажа:

a – схема деформации измерительных элементов; b – электрическая схема соединения тензодатчиков

Fig. 4. Pitch moment measurement:

a – diagram of the deformation of the measuring elements; b – electrical diagram for connecting strain gauges

Величины сил, действующих на модель, могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} X_{\text{мод}} &= X_{\text{приб}} - X_{\text{держ}}, \\ Y_{\text{мод}} &= Y_{\text{приб}} - Y_{\text{держ}} - \Delta Y_{M_z}, \end{aligned}$$

где $X_{\text{приб}}$, $Y_{\text{приб}}$ – показания приборов при продувке системы модель – державка в целом; $X_{\text{держ}}$, $Y_{\text{держ}}$ – показания приборов при продувке одной державки; ΔY_{M_z} – величина влияния момента тангажа на подъемную силу, определяемая по графику влияния.

Величина момента тангажа, действующего на модель, может быть определена по формуле

$$M_{z\text{мод}} = M_{z\text{приб}} - M_{z\text{держ}}.$$

Зная тарировочные коэффициенты k_x , k_y , k_{mz} , компоненты действующих на модель аэродинамических сил и момента можно вычислить по формулам

$$\begin{aligned}X_{[H]} &= k_x \cdot X_{\text{мод}}, \\Y_{[H]} &= k_y \cdot Y_{\text{мод}}, \\M_{[HM]} &= k_m \cdot M_{z\text{мод}}.\end{aligned}$$

Для определения аэродинамических коэффициентов сил необходимо размерные величины $X_{[H]}$, $Y_{[H]}$ отнести к скоростному напору q_∞ и характерной площади модели S_m .

Коэффициент сопротивления определится следующим образом:

$$\begin{aligned}C_x &= \frac{X_{[H]}}{q_\infty \cdot S_m} = \frac{X_{[H]}}{\frac{\rho v_\infty^2}{2} \cdot S_m} = \frac{X_{[H]}}{\frac{\rho}{2} \frac{2\phi\gamma h}{\rho} \cdot S_m} = X_{[H]} \frac{1}{\phi\gamma h S_m} = C_1 X_{[H]}, \\C_1 &= \frac{1}{\phi\gamma h S_m},\end{aligned}$$

где ϕ – коэффициент приемника воздушного давления; γ – объемный вес жидкости, залитой в микроманометр, Н/м³; h – высота столба жидкости в микроманометре, м; S_m – площадь миделевого сечения модели.

Аналогично для коэффициента подъемной силы

$$C_y = C_1 Y_{[H]}.$$

Аэродинамические коэффициенты C_x , C_y даются в поточной системе координат, когда ось OX направлена по потоку, ось OY – перпендикулярно ей вверх.

Коэффициент момента тангажа относительно центра тяжести, расположенного на продольной оси модели можно определить по формуле

$$m_{zt} = C_y (\bar{x}_t - C_d),$$

где C_d – коэффициент центра давления, определяемый по формуле

$$C_d = \frac{m_{zt}}{C_y}.$$

Здесь \bar{x}_t – относительная координата положения центра тяжести модели, считая от носовой точки, в долях длины модели:

$$\bar{x}_t = \frac{x_t}{b},$$

где b – хорда крыла или длина модели.

Заключение

Использование тензометрических весов позволяет значительно сократить время проведения эксперимента и повысить точность определения исследуемых величин. Отсутствие в тензометрических весах сложных поддерживающих устройств, характерных для весов механического типа, позволяет уменьшить влияние державок на обтекание исследуемой модели и тем самым повысить надежность результатов измерений.

Библиографические ссылки

1. Горлин С. М., Слезингер И. Н. Аэромеханические измерения. Методы и приборы. М. : Наука, 1964. 720 с.
2. Ведржицкий Е. Л., Дубов Б. С., Радциг А. Н. Теория и практика аэродинамического эксперимента. М. : МАИ, 1990. 216 с.
3. Радциг А. Н. Экспериментальная гидроаэромеханика. М. : Изд-во МАИ, 2004. 294 с.
4. Тензометрические системы для экспериментальных исследований / А. И. Беклемишев, Б. С. Дубов, Н. П. Клокова, В. В. Кедров // ФГУП ЦАГИ. Измерительная техника. № 11, 1979. С. 116–122.
5. Горшенин Д. С., Мартынов А. К. Методы и задачи практической аэродинамики. М. : Машиностроение, 1977. 240 с.
6. Ротэрмель А. Р., Дема И. А., Яшков С. А. Программно-аппаратный комплекс для проведения весовых экспериментов в сверхзвуковой аэродинамической трубе СТ-3 с помощью трехкомпонентных тензометрических весов // Актуальные проблемы защиты и безопасности : тр. XXIV Всеросс. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 01–04 апреля 2021). СПб. : Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2021. С. 345–351.
7. Ротэрмель А. Р., Шевченко В. И., Лизан В. М. Модернизация рабочей части аэродинамической трубы для проведения тензометрических измерений аэродинамических сил в сверхзвуковом потоке // Тр. Военно-космич. академия им. А. Ф. Можайского. 2022. № 127.
8. Богданов В. В., Волобуев В. С. Многокомпонентные тензометрические весы // Датчики и системы. 2004. № 3. С. 3–S.
9. Измерение аэродинамических сил и моментов при помощи тензометрических весов / Н. П. Левицкий, М. А. Храмова, А. И. Постнов, В. И. Зименков // Измерительная техника. 1979. № 11. С. 27–32.
10. Назаров Д. В., Никитин А. Н., Тарасова Е. В. Экспериментальная аэродинамика. Самара : Изд-во Самарского ун-та, 2020. 176 с.
11. Мехеда В. А. Тензометрический метод измерения деформаций. Самара, 2011. 56 с.
12. Андреев В. Н., Козловский В. А., Лагутин В. И. Тензовесы для аэродинамических испытаний моделей со струями двигательных установок // Материалы I отраслевой конф. по измерит. технике и метрологии для исследования летат. Аппаратов. КИМИЛА 2014 Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского. 2014.
13. Внутримодельные шестикомпонентные весы на ленточной подвеске / А. А. Куликов, И. Н. Панченко, В. В. Богданов, В. С. Манвелян // Материалы I отраслевой конф. по измерит. технике и метрологии для исследования летат. Аппаратов. КИМИЛА 2014 Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского. 2014.
14. Богданов В. В., Волобуев В. С., Горбушин А. Р. Исследование тепловой динамики тензометрических весов и разработка методов снижения их температурных погрешностей // Ученые записки ЦАГИ. 2009. Т. XL, № 5. С. 11–14.
15. Клеев И. В. Температурные динамические погрешности в тензометрических аэродинамических шестикомпонентных весах // Датчики и системы. 2007. № 2. С. 49–58.

References

1. Gorlin S. M., Slezinger I. N. *Aeromekhanicheskie izmereniya. Metody i pribory* [Aeromechanical measurements. Methods and instruments]. Moscow, Nauka Pub., 1964, 720 p.
2. Vedralzhitsky E. L., Dubov B. S., Radzig A. N. *Teoriya i praktika aerodnamicheskogo eksperimenta* [Theory and practice of aerodynamic experiment]. Moscow, 1990, 49–58 p.
3. Radzig A. N. *Eksperimental'naya gidroaeromekhanika* [Experimental hydroaeromechanics]. Moscow, 2004, 294 p.
4. Beklemishev A. I., Dubov B. S., Klokova N. P., Kedrov V. V. [Strain gauge systems for experimental research]. *FGUP TsAGI. Measuring technology*. 1979, No. 11, P. 116–122 (In Russ.).

5. Gorshenin D. S., Martynov A. K. *Methods and problems of practical aerodynamics* [Methods and problems of practical aerodynamics]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1977, 240 p.
6. Rotermel A. R., Dema I. A., Yashkov S. A. [Software and hardware complex for conducting weight experiments in a supersonic wind tunnel ST-3 using three-component strain gage scales]. *Proceedings of the XXIV All-Russian Scientific and Practical Conference "Current Problems of Protection and Safety"* [Proceedings of the XXIV All-Russian Scientific and Practical Conference "Actual Problems of Protection and Safety"], St. Petersburg, April 01-04, 2021, P. 345–351 (In Russ.).
7. Rotermel A. R., Shevchenko V. I., Lizan V. M. [Modernization of the working part of the wind tunnel for tensometric measurements of aerodynamic forces in supersonic flow]. *Tudy MAI*. 2022, No. 127, P. 368–376 (In Russ.).
8. Bogdanov V. V., Volobuev V. S. [Multicomponent tensometric scales]. *Scientific notes TsAGI*. 2004, No. 3, P. 3–8 (In Russ.).
9. Levitsky N. P., Khramova M. A., Postnov A. I., Zimenkov V. I. [Measurement of aerodynamic forces and moments using strain gauges]. *Scientific notes of TsAGI Measuring technology*. 1979, No. 11, P 27–32 (In Russ.).
10. Nazarov D. V., Nikitin A. N., Tarasova E. V. *Eksperimental'naya aerodinamika* [Experimental aerodynamics]. Samara, 2020, 176 p.
11. Meheda V. A. *Tenzometricheskiiy metod izmereniya deformatsiy* [Strain gauge method for measuring deformations]. Samara, 2011, 56 p.
12. Andreev V. N., Kozlovskij V. A., Lagutin V. I. [Tension scales for aerodynamic testing of models with jets of propulsion systems]. *Materialy I otraslevoy konf. po izmerit. tekhnike i metrologii dlya issledovaniya letat. Apparatov. KIMILA 2014 Tsentral'nyy aerogidrodinamicheskiiy institut im. professora N. E. Zhukovskogo* [Materials of the I Industry Conf. according to measurement technology and metrology for flight research. Devices. KIMILA 2014 Central Aerohydrodynamic Institute named after. Professor N. E. Zhukovsky]. 2014. (In Russ.).
13. Kulikov A. A., Panchenko I. N., Bogdanov V. V., Manvelyan V. S. [In-model six-component scales on a belt suspension]. *Materialy I otraslevoy konf. po izmerit. tekhnike i metrologii dlya issledovaniya letat. Apparatov. KIMILA 2014 Tsentral'nyy aerogidrodinamicheskiiy institut im. professora N. E. Zhukovskogo* [Materials of the I Industry Conf. according to measurement technology and metrology for flight research. Devices. KIMILA 2014 Central Aerohydrodynamic Institute named after. Professor N. E. Zhukovsky]. 2014 (In Russ.).
14. Bogdanov V. V., Volobuev V. S., Gorbushin A. R. [Study of the thermal dynamics of strain gauge balances and the development of methods for reducing their temperature errors]. *Scientific notes of TsAGI*. 2009, Vol. XL, No. 5, P. 11–14 (In Russ.).
15. Kleev I. V. [Temperature dynamic errors in tensometric aerodynamic six-component scales]. *Scientific notes of TsAGI*. 2007, No. 2, P. 6–10 (In Russ.).

© Козлов В. С., Котельникова С. В., 2024

Козлов Виктор Савельевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kozlov@sibsau.ru.

Котельникова Светлана Владимировна – старший преподаватель кафедры информационных управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sv_kot@mail.sibsau.ru.

Kozlov Viktor Savelievich – Cand. Sc., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aircraft; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kozlov@sibsau.ru.

Kotelnikova Svetlana Vladimirovna – senior lecturer at the Department of Information Control Systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sv_kot@mail.sibsau.ru.
