



Подъемная сила и гидродинамическое сопротивление (сопротивление потоку)

ЛЭФ
1.4.08
-00

Темы для изучения

Сопротивление напору, фрикционная стойкость, коэффициент лобового сопротивления, турбулентный поток, ламинарный поток, число Рейнольдса, скоростной напор, уравнение Бернулли, крыло, вносимое сопротивление, циркуляция, угол приложения, полярная диаграмма.

Принцип и цель

А) Предметы с различным поперечным сечением и формой помещают в ламинарный поток воздуха. Исследуется зависимость гидродинамического сопротивления от скорости потока и геометрии предметов. В) На прямоугольную пластину или крыло в потоке действует выталкивающая сила (подъемная сила) и сила сопротивления (гидродинамическое сопротивление). Определяются эти силы в зависимости от площади, скорости потока и угла приложения.

Оборудование

Аэродинамические модели, набор из 14 шт.	02787.00	1
Модель профиля обтекаемого тела	02788.00	1
Трубка Пито-Прандтля	03094.00	1
Прецизионный манометр	03091.00	1
Державка с несущими концами	02411.00	1
Двухосный держатель	02780.00	1
Прецизионный шкив	11201.02	1
Пружинные весы, прозрачные, 0,2 Н	03065.01	1
Штангенциркуль с нониусом	03010.00	1

Воздуходувка, напряжение сети 220 В	02742.93	1
Регулятор мощности	32247.93	1
Трубочный зонд	02705.00	1
Универсальный зажим	37716.00	1
Штативная основа -PASS-	02005.55	1
Штативный стержень -PASS-, прямоуг., l = 1000 мм	02028.55	1
Цилиндрическая опора -PASS-	02040.55	4
Стержень с крюком	02051.00	2
Зажимная стойка	02060.00	2
Стержень с заостренным концом	02302.00	1
Шелковая нить, l = 200 м	02412.00	1
Линейка, пластмассовая, l = 200 мм	09937.01	1
Резиновые трубы, внутренний d=7 мм	39282.00	1

Цель

А) Определить зависимость гидродинамического сопротивления от:

1. поперечного сечения различных тел;
2. скорости потока.

Определить коэффициент лобового сопротивления c_w для предметов различной формы.

Б) Определить зависимость подъемной силы и гидродинамического сопротивления плоских пластин от:

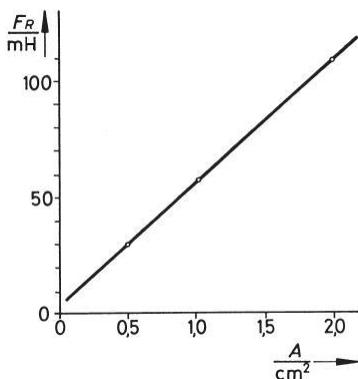
1. площади пластины;
2. скоростного напора;
3. угла приложения (полярная диаграмма).

Установить распределение давления по крылу при различных углах приложения.

Рис. 1: Экспериментальная установка для определения сопротивления потоку.



Рис. 2: Зависимость гидродинамического сопротивления от поперечного сечения A ($q = 0,85 \text{ гПа}$).



A) Установка и ход работы

Соберите экспериментальную установку, как показано на рис. 1. Измерьте скоростной напор при помощи трубы Прандтля и рассчитайте скорость потока воздуха при помощи уравнения (2). Повторите данное измерение несколько раз на протяжении эксперимента. Двухосный держатель должен быть закреплен свободно между несущими концами и выровнен по вертикали и горизонтали. Установите статически все предметы, используемые в эксперименте, для этого в качестве опорной точки используйте стержень. Поскольку силы сопротивления очень незначительны, весы должны быть аккуратно отюстрированы. Если в компенсирующем положении объекты после касания рукой не возвращаются в состояние равновесия, это значит, что двухосный держатель свободно закреплен между несущими концами (поверхностное трение) или слишком плотно (эффект сжатия). Отрегулируйте держатель.

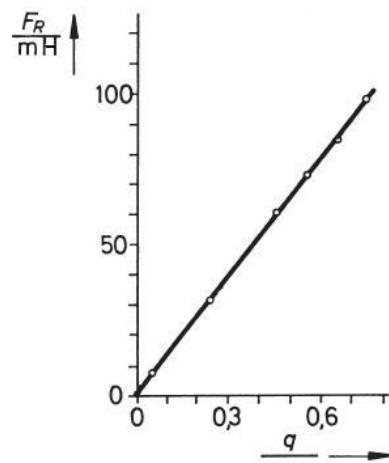
Теория и расчет

Сила \vec{F} , действующая на тело при воздействии на него воздушного потока, равна

$$\vec{F} = \int_A \vec{p} da, \quad (1)$$

где A – периферийная область тела. Поверхностными усилиями \vec{p} являются нормальное и касательное напряжения, которые состоят из давления p и сил трения. Если направление скорости потока v применить в направлении x , то F_x является гидродинамическим сопротивлением F_R .

Рис. 3: Зависимость гидродинамического сопротивления от скоростного напора.



Значение F_R соответственно выражено через скоростной напор q случайного потока

$$q = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (2)$$

(ρ – плотность среды)

и через площадь f_p (например, площадь поперечного сечения тела, расположенного перпендикулярно потоку). Таким образом, выражение (1) можно записать как:

$$F_R = c_w f_p \cdot \rho \frac{v^2}{2}.$$

Коэффициент лобового сопротивления c_w можно выразить поверхностью интегралом. При использовании объектов с гладкой поверхностью он не зависит от числа Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho d}{\mu},$$

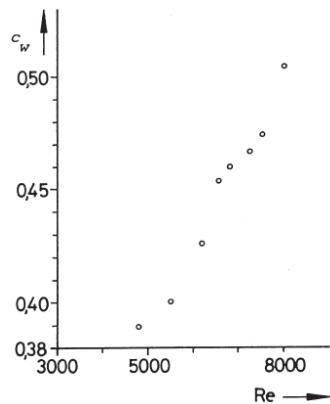
где d – стандартный параметр, например, ширина объекта в потоке воздуха, а

$$v = \frac{\mu}{\rho} - \text{кинематическая вязкость} (\mu - \text{вязкость}).$$

Таблица 1: Коэффициенты лобового сопротивления различных предметов.

Предмет										
c_w	0,45	0,37	1,17	0,92	0,24	0,21	0,71	0,14	0,07	1,12

Рис. 4: Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса.



Для воздуха при 278 К и 1013 мБар ,

$$v = 1.3 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s^2}.$$

При стационарном потоке в несжимаемой среде закон сохранения энергии выглядит как

$$p_0 + \frac{\rho}{2}v^2 = \text{const} = p$$

(уравнение Бернулли).

Скоростной напор

$$q = \frac{\rho}{2}v^2$$

равен

$$q = p - p_0$$

и может быть определен как разница напоров, при помощи трубы Прандтля.

Б) Установка и ход работы

Скоростной поток измеряется при помощи трубы Прандтля, а скорость воздуха рассчитывается из выражения (2). Скорость воздуха следует проверять неоднократно.

Рис. 1а: Экспериментальная установка для определения распределения напора по крылу.



Свободно закрепите двухосный держатель между несущими концами и отрегулируйте его по вертикали и горизонтали. Статически уравновесьте прямоугольные пластины; в качестве опорной точки можно использовать стержень. Поскольку подъемная сила и гидродинамическое сопротивление потоку незначительны, отьюстируйте весы с предельной аккуратностью. При помощи пружинного динамометра уравновесьте и измерьте подъемную силу (используя прецизионный шкив) и гидродинамическое сопротивление. Если после коррекции пластины не возвращаются в состояние покоя, это значит, что двухосный держатель слишком свободно закреплен между несущими концами (поверхностное трение) или слишком плотно (эффект сжатия). Отрегулируйте держатель.

В диапазоне примерно 27-35° возникает турбулентность, поэтому не следует выбирать углы с таким значением при проведении данного эксперимента.

Для измерения распределения напора по крылу (рис. 1а) наденьте резиновый шланг на трубочный зонд. Для обеспечения лучшего соприкосновения с зондом проверните шланг и смочите его.

Теория и расчет

Если направление скорости потока v совпадает с направлением x , тогда F_x является гидродинамическим

сопротивлением F_R , а F_y - подъемной силой F_A (см. выражение (1) и (2)):

$$F_R = c_w \cdot f_p \frac{\rho}{2} v^2$$

$$F_A = c_a \cdot f_p \frac{\rho}{2} v^2$$

При малых углах α и вихревом потоке для крыла бесконечной длины

$$c_w = 0,$$

а c_a равно

$$c_a = 2\pi \cdot \left(\alpha + \frac{2f}{t} \right),$$

где t – хорда, f – изгиб.

При использовании крыла конечной длины формируется площадь участка, при малом значении угла падения. Возникающая турбулентность вызывает сопротивление (коэффициент сопротивления c_{re}), которое зависит от подъемной силы:

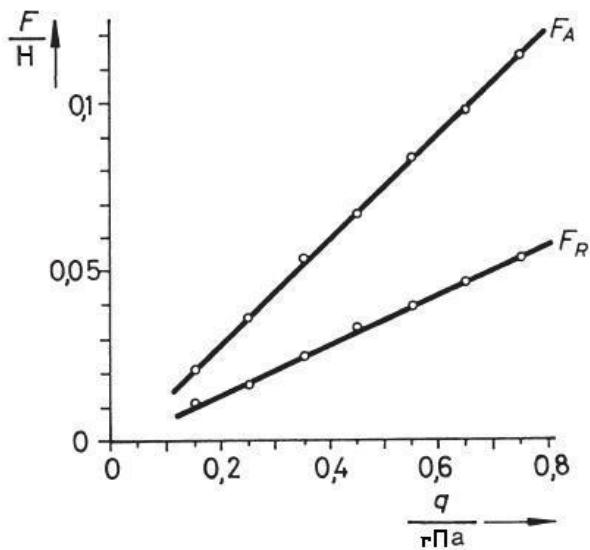
$$c_{re} = \frac{c_a^2 \cdot f_p}{\pi \cdot b^2},$$

где b - расстояние между держателями.

Рис. 1б: Экспериментальная установка для определения подъемной силы и гидродинамического сопротивления на прямоугольной пластине.



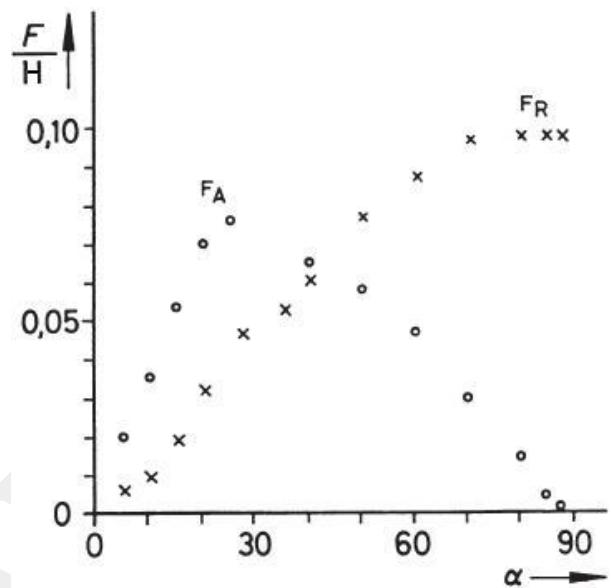
Рис. 5: Зависимость подъемной силы и гидродинамического сопротивления при угле падения 20° и площади пластины $17,5 \text{ см}^2$.



Поскольку существует трение о поверхность, а также сопротивление вследствие частичного разделения потока, получаем следующее:

$$c_w = c_{wo} + \frac{c_a^2 \cdot f_p}{\pi \cdot b^2}$$

Рис. 7: Зависимость подъемной силы F_A и гидродинамического сопротивления F_R от угла падения.



При больших углах падения ламинарный поток переходит в турбулентный, что приводит к увеличению гидродинамического сопротивления и уменьшению подъемной силы.

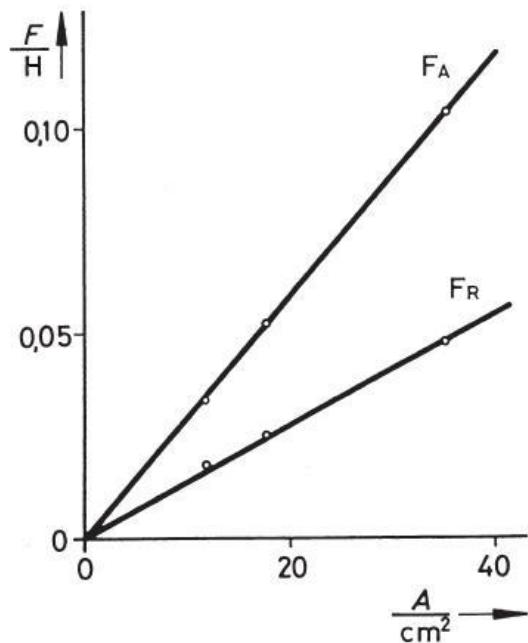


Рис. 6: Зависимость подъемной силы и гидродинамического сопротивления от площади пластины при угле падения 20° и скоростном напоре $0,35 \text{ гPa}$.

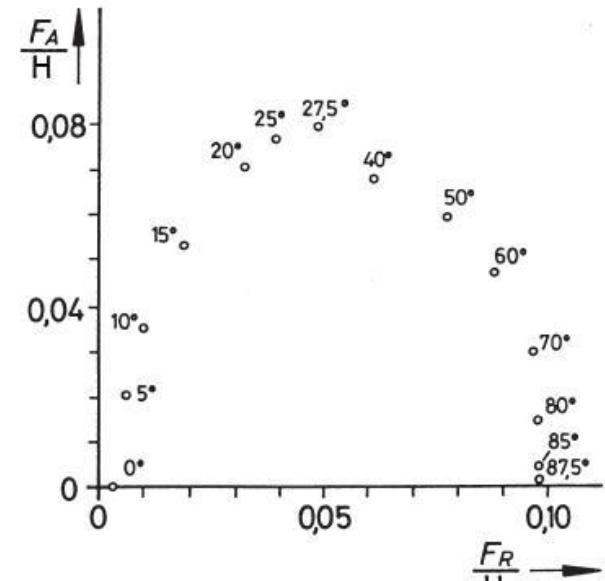


Рис. 8: Зависимость подъемной силы F_A от гидродинамического сопротивления F_R пластины при различных углах падения, при скоростном напоре $0,25 \text{ гPa}$ и площади пластины $35,1 \text{ см}^2$.

ЛЭФ
1.4.08
-00

Подъемная сила и гидродинамическое сопротивление
(сопротивление потоку)



Рис. 9: Распределение давления по крылу при различных углах падения со скоростным напором 0,8 гПа

○ – сверху крыла
Х – снизу крыла

