



## 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-,<br>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 трубки, 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.



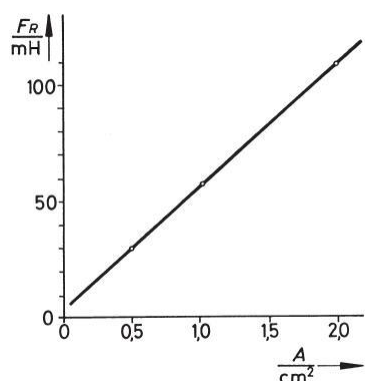
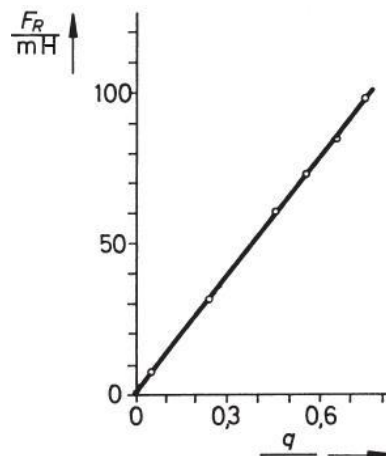
Рис. 2: Зависимость гидродинамического сопротивления от поперечного сечения  $A$  ( $q = 0,85$  гПа).

Рис. 3: Зависимость гидродинамического сопротивления от скоростного напора.



## А) Установка и ход работы

Соберите экспериментальную установку, как показано на рис.

1. Измерьте скоростной напор при помощи трубки 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. Уравновесьте статически все предметы, используемые в эксперименте, для этого в качестве опорной точки используйте стержень. Поскольку силы сопротивления очень незначительны, весы должны быть аккуратно отъюстированы. 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  $F_R$ .

Значение  $F_R$  соответственно выражено через скоростной напор  $q$  случайного потока

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

( $\rho$  – 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 поверхностным интегралом. При использовании объектов с гладкой поверхностью он не зависит от числа Рейнольдса

$$Re = \frac{vd}{\nu},$$

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

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ – кинематическая вязкость (} \mu \text{ – вязкость).}$$

Таблица 1: Коэффициенты лобового сопротивления различных предметов.











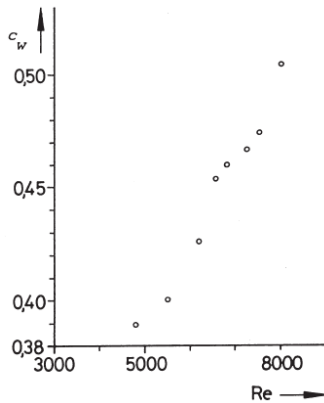
| Предмет |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------|---|---|---|---|---|--|---|---|---|---|
| $c_w$   | 0,45  | 0,37  | 1,17  | 0,92  | 0,24  | 0,21   | 0,71  | 0,14  | 0,07  | 1,12  |

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



Для воздуха при 278 K и 1013 мБар,

$$v = 1.3 \cdot 10^{-5} \frac{M}{c^2}.$$

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 трубки Прандтля.

## Б) Установка и ход работы

Скоростной поток измеряется при помощи трубки 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, отъюстируйте 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  $\alpha$  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:

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

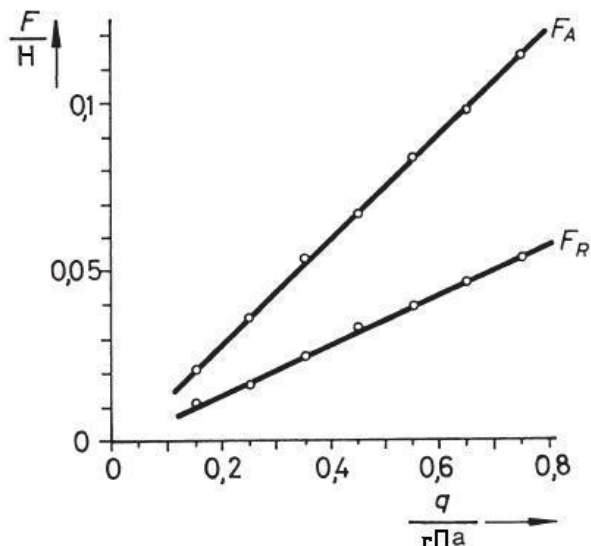
где  $b$  - расстояние между держателями.

Рис. 16: Экспериментальная установка для определения подъемной силы и гидродинамического сопротивления на прямоугольной пластине.





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



Поскольку существует фрикционная стойкость, а также сопротивление вследствие частичного разделения потока, получаем следующее:

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

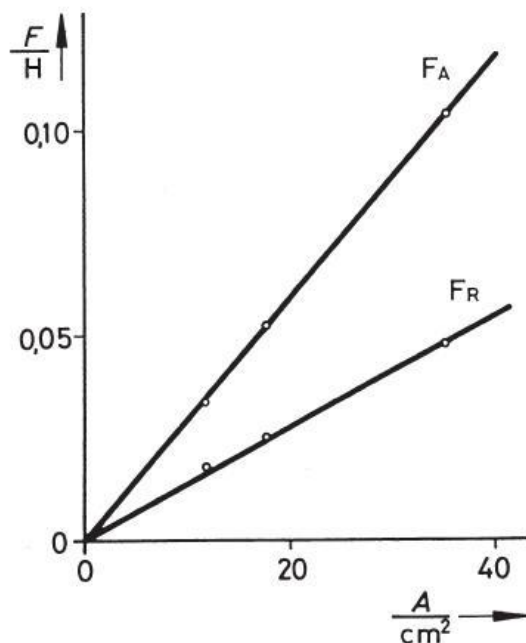
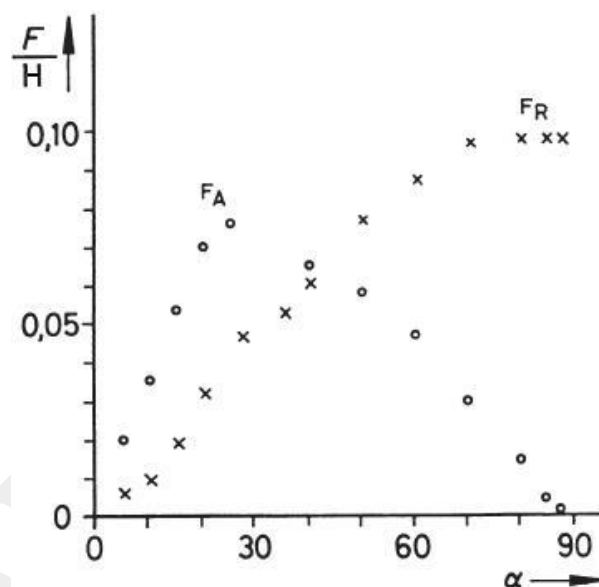


Рис. 6: Зависимость подъемной силы и гидродинамического сопротивления от площади пластины при угле падения  $20^\circ$  и скоростном напоре  $0,35 \text{ гПа}$ .

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.

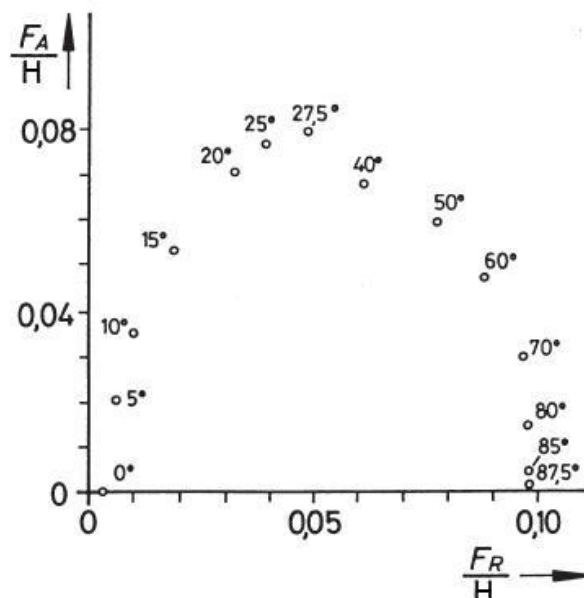


Рис. 8: Зависимость подъемной силы  $F_A$  от гидродинамического сопротивления  $F_R$  пластины при различных углах падения, при скоростном напоре  $0,25 \text{ гПа}$  и площади пластины  $35,1 \text{ см}^2$ .

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

○ – сверху крыла

x – снизу крыла

