

4. Определение параметров воздуха на срезе сопла

При расчете процессов движения газов очень часто встречаются случаи, когда газ движется по каналу с неподвижными стенками. Примерами такого движения, т.е. течение газа, является движение по трубопроводам, в соплах, в направляющих аппаратах компрессоров.

Если стенки канала неподвижны, то газ при своем движении не совершает технической работы.

Если имеет место адиабатное движение газа без трения, то отсутствует и внешний теплообмен, и внутреннее тепловыделение, следовательно, энтропия газа при таком движении не изменяется. Поэтому такое движение газа называют изоэнтропическим.

Расчет параметров изоэнтропического потока наиболее прост, т.к. при этом в дополнение к уравнениям движения можно пользоваться уравнениями связи между параметрами $P \cdot V \cdot p$ и T

$$= const$$

$$\frac{P_1}{P_2} = (V_{12}/V_{11})^{\gamma}(K-1) ; \frac{V_1}{V_2} = (P_{11}/P_{12})^{\gamma}(1/K)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = (V_{12}/V_{11})^{\gamma}(K-1) ; \frac{V_1}{V_2} = (T_{12}/T_{11})^{\gamma}(1/(k-1))$$

$$\frac{T_1}{T_2} = (P_{12}/P_{11})^{\gamma}((k-1)/k) ; \frac{P_1}{P_2} = (T_{11}/T_{12})^{\gamma}(1/(k-1))$$

Уравнения энергии в термической форме для адиабатного потока идеального газа (при $M \geq 0,3$) имеет вид

$$C_p T + \frac{V^2}{2} = const$$

$$\frac{k}{k-1} RT + \frac{v^2}{2} = const$$

где C_p ($\frac{Дж}{кг \cdot R}$) - изобарная теплоемкость газа $C_p = 1,4$ (2-х атомный газ)

T (К) - абсолютная температура

R ($\frac{Дж}{кг \cdot R}$) - газовая постоянная

Поэтому при обработке любых аэродинамических испытаний необходимо по скорости, измеренной прибором, вычислять скорость в точке установленной модели.

С этой целью определяют скорость потока в рабочей части аэродинамической трубы как функцию координат точки.

Для определения поля скоростей, следует одновременно измерить скорость в двух точках поля: неподвижной (с постоянными координатами X_0, Y_0, Z_0) и подвижными (X, Y, Z).

Отношение скоростей в подвижной точке к скорости в неподвижной точке

представляет собой безразмерный коэффициент $K = \frac{V_n}{V_a} \dots = (X, Y, Z)$

Он характеризует распределение скоростей в потоке и называется коэффициентом поля скоростей.

V_n - скорость в подвижной точке;

V - скорость в неподвижной точке

Скорость в точке с координатами X_0, Y_0 и Z_0 измеряется микроманометром и неподвижной скоростной трубкой; скорость в переменной точке измеряется микроманометром и скоростной трубкой, перемещающейся с помощью прибора, называемого, называемого координатником.

При измерении скорости необходимо вводить следующие поправки:

φ - на коэффициенты скоростных трубок ;

k - на коэффициенты микроманометров;

на изменение плотности воздуха по сравнению с плотностью при нормальных условиях ρ_H :

$$\rho = \rho_H \cdot \frac{p_1}{p_H} \cdot \frac{T_H}{T_1} = \rho_H \cdot \frac{B_1}{760} \cdot \frac{288}{T_1}$$

здесь p_1 и T_1 - соответственно барометрическое давление и абсолютная температура воздуха в условиях опыта, p_H и T_H - при нормальных условиях.

$$\frac{C_p}{C_v}$$

$K = \frac{C_p}{C_v}$ - показатель адиабаты

$$M$$

$V(\frac{M}{C})$ - скорость газа

Это уравнение показывает, что при движении газа без теплообмена и технической работы, увеличение скорости газа (разгон) обязательно сопровождается уменьшением его энтальпии и понижением температуры.

Уравнение энергии в механической форме (при $M < 0,3$) при изоэнтропическом движении газа без технической работы имеет вид

$$+ \frac{v^2}{2} = \text{const} \quad P + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const}$$

P - статическая составляющая давления

$\frac{\rho v^2}{2}$ - динамическая составляющая давления

Их сумма полное давление.

Из уравнения видно, что скорость газа, увеличивается только при понижении давления.

Наоборот, торможение газа, уменьшение его скорости при отсутствии трения обязательно приводит к повышению давления в потоке газа. Каналы, в которых происходит разогрев газа, увеличение его скорости, называются соплами. В соплах скорость по ходу газа возрастает, а давление, энтальпия и температура уменьшается. Каналы, в которых происходит торможение газа, уменьшение его скорости, обычно называют диффузорами. В диффузорах скорость по ходу газа уменьшается, а давление, энтальпия и температура возрастают.

При опытах в аэродинамической трубе необходимо знать поле скоростей в ее рабочей части для того, чтобы выяснить размеры "ядра рабочей части", т.е. пространство, где неравномерностью потока можно пренебречь.

В любом эксперименте модель и измеритель скорости не могут быть установлены в одной точке рабочей части аэродинамической трубы.

4.1. Методика расчета и проведения испытания для определения давления на срезе сопла

1. Привести аэродинамическую трубу в рабочее состояние, вывести ее на режим установившегося потока воздуха.
2. Провести замеры показаний микроманометра и параметры воздуха в лаборатории. Результаты записать.

$$\Delta p = 220 \text{ (Па)}$$

$$P_a = 767 \text{ (мм.рт.ст.)}$$

$$T \text{ (К)} = 295 \text{ (К)}$$

3. Используя уравнение энергии газа в механической форме (при $M < 0,3$) найти формулу для определения скорости воздуха на срезе сопла.

$$\text{Уравнение энергии (Бернулли): } P_1 + \frac{\rho_1 V^2}{2} = P_a + \frac{\rho_a V_a^2}{2}$$

$$\text{Принимая } V_1 = 0, \text{ получаем } P_1 + P_a = \Delta p = \frac{\rho_a V_a^2}{2} \quad (\text{Па})$$

$$\text{Скорость воздуха на срезе сопла } V_a = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_a}} \text{ (м/с)}$$

4. Записать данные МСА (международные стандарты аудита), уравнение состояния идеального газа и закономерность адиабатного процесса, необходимые для нахождения параметров воздуха на срезе сопла (P_a, ρ_a, T_a, V_a) Согласно МСА на уровне моря принято:

$$P_n = P_{н} = 760 \text{ (мм.рт.ст.)} = 101300 \text{ (Па)};$$

$$T_a = 288 \text{ (К)};$$

$$\rho_a = 1,226 \text{ (кг/м}^3\text{)}$$

- 4.1. Зависимость между параметрами газа в адиабатном процессе:

- 4.2 Уравнение состояния идеального газа:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}; \quad \frac{P_1}{\rho_1 T_1} = \frac{P_2}{\rho_2 T_2}$$

5. Используя результаты замеров и формулы п. 4 подсчитать следующие основные параметры воздуха.

5.1. Величина плотности воздуха на входе в сопло

$$1,226 \cdot \frac{P_1}{760} \cdot \frac{288}{T_1} = 1,226 \cdot \frac{776}{760} \cdot \frac{288}{295} = 1,197 \text{ (кг/м}^3\text{)}$$

5.2. Величина давления воздуха на срезе сопла

$$= -\Delta p = 133,3 \cdot \Delta p = 776 - 220 = 133,3 \cdot 776 - 220 = 102021,1 \text{ (Па)}$$

5.3. Величина плотности воздуха на срезе сопла

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = \left(\frac{P_a}{P_1} \right)^{0,714}$$
$$\rho_a = \rho_1 \cdot \left(\frac{P_a}{133,3 \cdot P_1} \right)^{0,714} = 1,197 \cdot \left(\frac{102021,1}{133,3 \cdot 776} \right)^{0,714}$$

5.4. Величина скорости истечения воздуха из сопла

$$V_a = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho_a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 102021,1}{1,197}} = 19,17 \text{ м/с}$$

5.5. Величина температуры воздуха на срезе сопла

$$\frac{T_a}{T_1} = \left(\frac{P_a}{P_1} \right)^{0,286} ; T_a = T_1 \cdot \left(\frac{P_a}{133,3 \cdot P_1} \right)^{0,286} = 295 \cdot \left(\frac{102021,1}{133,3 \cdot 776} \right)^{0,286} = 295 \text{ (} = 295 \text{ К)}$$

6. Определить критерии сжимаемости воздуха на срезе сопла.

6.1. Величина скорости звука на срезе сопла

$$A_a = 20,1 \sqrt{T_a} = 20,1 \cdot \sqrt{295} = 20,1 \cdot 17,17 = 345,2 \text{ м/с}$$

6.2. Величина числа Маха на срезе сопла - Ма

$$M_a = \frac{V_a}{A_a} = \frac{19,17}{345,2} = 0,06 \text{ Ма}$$

Вывод: параметры на такой скорости фактически не меняются и сжимаемостью можно пренебречь.