

УДК 629.7.036.3

**Емельянов Дмитрий Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,  
г. Воронеж

**Елисеев Сергей Яковлевич**,  
кандидат химических наук, старший преподаватель,  
ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,  
г. Воронеж

**Соколов Денис Аркадьевич**, курсант,  
ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,  
г. Воронеж

**Чужданов Александр Вячеславович**, курсант,  
ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,  
г. Воронеж, РФ

## ПРИМЕНЕНИЕ ПНЕВМОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ В АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ

**Аннотация:** В статье рассмотрены особенности применения пневмометрического метода измерения скорости в авиационной технике. Проанализированы виды насадок для измерения статического и полного давления. Приведены принцип действия и схема указателя приборной скорости.

**Ключевые слова:** Пневмометрический метод; скорость; авиационная техника; число Маха; приемник воздушного давления.

Пневмометрический метод измерения скоростей широко распространен в практике благодаря своей простоте. При малых скоростях течения газа (число Маха  $M < 0,3$ ) уравнение Бернулли для потока идеального несжимаемого газа имеет вид:

$$p + \frac{\rho c^2}{2} = p^* = \text{const}, \quad (1)$$

где  $p$  – статическое давление, Па;  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – скорость потока, м/с;  $p^*$  – полное давление, Па;  $M$  – число Маха, показывающее, во сколько раз скорость потока больше или меньше скорости звука:

$$M = \frac{c}{a}, \quad (2)$$

где  $a$  – скорость звука, м/с.

Из уравнения (1) следует, что скорость потока

$$c = \sqrt{\frac{2(p^* - p)}{\rho}}. \quad (3)$$

Следовательно, для определения скорости потока необходимо знать полное и статическое давление, а также плотность газа.

Простейшим насадком для отбора полного давления является круглая трубка, ось которой совпадает с направлением потока, а открытый конец направлен против потока (рис. 1, а). Другой конец трубки соединяется с манометром. Измерительное устройство такого типа называют насадком Пито [1].



Для измерения статического давления используют насадок Прандтля, представляющий собой цилиндрическое тело, на боковых поверхностях которого расположены отверстия на значительном расстоянии от носка (рис. 1, б).

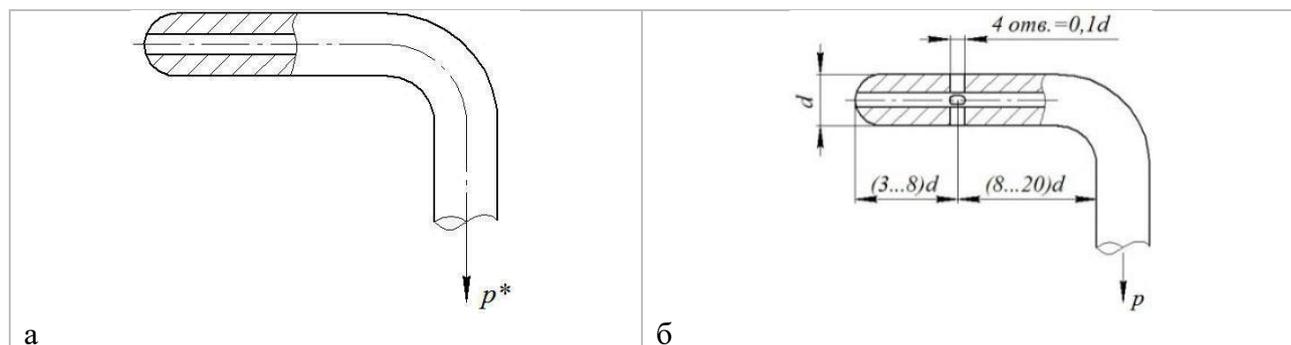


Рис. 1 – Схемы насадков Пито (а) и Прандтля (б)

Плотность газового потока определяется по известному из термодинамики уравнению состояния

$$\frac{p}{\rho} = RT, \quad (4)$$

где  $p$  – статическое давление, Па;

$R$  – удельная газовая постоянная (для воздуха  $R = 287$  Дж/кг·К);

$T$  – термодинамическая температура газа, К.

На практике часто применяют комбинированные насадки – насадки Пито-Прандтля (рис. 2).

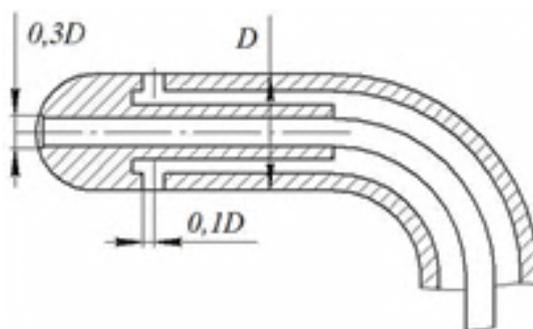


Рис. 2 – Схема насадка Пито-Прандтля

Следует иметь в виду, что как бы хорошо ни был выполнен насадок, полное давление измеряется им не вполне точно. Индивидуальные особенности насадка принято характеризовать поправочным коэффициентом  $\varphi$ :

$$c = \varphi \sqrt{2(p^* - p)/\rho}. \quad (5)$$

Для тщательно изготовленных насадков типа Пито-Прандтля коэффициент  $\varphi$  постоянен и близок к единице в широком диапазоне скоростей [2].

С увеличением скорости газового потока на результаты измерений начинает оказывать влияние его сжимаемость, поэтому при измерениях больших скоростей ( $M > 0,3$ ) следует использовать соотношение, полученное из уравнения Бернулли для сжимаемого газа:

$$c = \sqrt{\frac{2kRT}{k-1} \left[ \left( \frac{p^*}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}, \quad (6)$$

где  $k$  – показатель адиабаты (для воздуха  $k = 1,4$ ).



При  $M > 0,85$  для уменьшения искажений из-за местных сверхзвуковых зон со скачками уплотнений приемные отверстия статического давления (на боковых поверхностях насадка) сносят вниз по потоку [3].

Для измерения полного давления сверхзвукового потока ( $M > 1$ ) насадок должен иметь затупленную форму головки, а диаметр приемного отверстия должен быть значительно меньше диаметра насадка с тем, чтобы это отверстие целиком находилось за прямым скачком уплотнения. Для измерения статического давления необходимо использовать насадки с заостренной конической или оживальной (спрофилированной дугами окружности) головкой. Поэтому в сверхзвуковых потоках полное  $p^*$  и статическое  $p$  давление обычно измеряют различными насадками. При этом поверхность насадка тщательно обрабатывается и полируется. Приемные отверстия делают с особой аккуратностью, так как при сверхзвуковых скоростях заусеницы, рваные кромки и неровности поверхности в зоне приемных отверстий возмущают поток и приводят к большим погрешностям измерения статического давления.

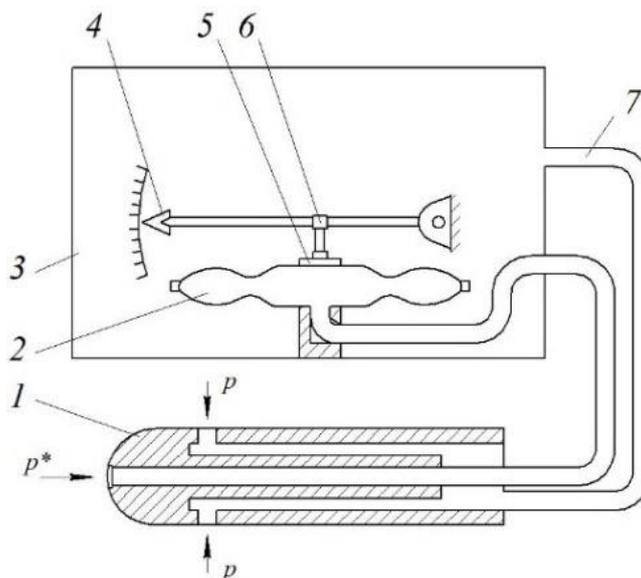
Пневмометрический метод измерения скорости реализуется на большинстве летательных аппаратов при измерении скорости полета [4]. Комбинированные насадки Пито-Прандтля в этом случае объединены в конструкции приемника воздушного давления (ПВД). Для компенсации аэродинамической погрешности на цилиндрическом участке выполняется секция с переменным диаметром, которая за счет геометрического воздействия на воздушный поток изменяет величину статического давления (рис. 3).



**Рис. 3 – Внешний вид приемника воздушного давления ПВД-18**

В приемнике ПВД-18 (рис. 3) выполнены три камеры статического давления (два давления отбираются с цилиндрического участка, одно – с компенсационного контура). Наличие трех каналов для восприятия статического давления делает ПВД способным работать в широком диапазоне скоростей. ПВД-18 используется преимущественно на истребителях, в том числе и на сверхманевренных самолетах.

Для получения значения приборной скорости приемник воздушного давления (ПВД) связан с указателем скорости. Схема указателя приборной скорости показана на рисунке 4.



**Рис. 4 – Схема указателя приборной скорости:**

- 1 – приемник воздушного давления (ПВД); 2 – манометрическая коробка;**
- 3 – корпус; 4 – стрелка; 5 – подвижный центр; 6 – передаточный механизм;**
- 7 – трубопровод**



Указатель приборной скорости состоит из приемника воздушного давления (ПВД) 1, представляющего собой комбинированный насадок Пито-Прандтля, манометрической коробки 2, корпуса 3, стрелки 4, подвижного центра 5, передаточного механизма 6 и трубопровода 7.

Чувствительным элементом указателя приборной скорости является манометрическая коробка 2. Во время полета встречный поток воздуха, набегающий на ПВД, тормозится и его относительная скорость становится равной нулю. При этом кинетическая энергия частиц воздуха переходит в потенциальную энергию, вследствие чего в камере полного давления создается избыточное давление. Полное давление в приемнике и во внутренней полости чувствительного элемента равно сумме статического и динамического давлений. В корпусе прибора создается давление, равное статическому давлению воздуха. На чувствительный элемент будет действовать перепад полного и статического давления. Под действием перепада давлений манометрическая коробка 2 деформируется и через подвижный центр 5 и передаточный механизм 6 перемещает стрелку 4. Шкала указателя приборной скорости проградуирована в единицах измерения скорости при стандартных значениях давления и температуры.

#### **Список литературы:**

1. Братковский Е.В. Технологические измерения и приборы: Учебное пособие / Е.В. Братковский, А.В. Заводяный. – Новотроицк: Новотроицкий филиал ГОУ ВПО «МИСиС», 2007. – 128 с.
2. Дивин А.Г. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: Учебное пособие. В 5 ч. Ч. 2. / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев, Г.В. Мозгова. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 108 с.
3. Ефимов И.П. Авиационные приборы: Учебное пособие / И.П. Ефимов. – Ульяновск: УлГТУ, 2018. – 255 с.
4. Чепурных, И.В. Системы бортового оборудования самолетов и вертолетов: Топливная система и кабинное оборудование / И.В. Чепурных, С.А. Чепурных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – 169 с.

