

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ГАЗА ПО МЕТОДУ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИИС ГРАДУИРОВКИ ТЕРМОАНЕМОМЕТРОВ

**Кузнецов Д.Н.**

Донецкий национальный технический университет,

кафедра электронной техники

E-mail: [kuzen@skif.net](mailto:kuzen@skif.net)

*Abstract. Kuznecov D. Research of errors of definition of speed of gas on a method of measurement of dynamic pressure for ids of graduation. The research of errors of definition of speed of gas on a method of measurement of dynamic pressure is executed. The critical mode of graduation is revealed, at which the total error is maximal. The dependence, between an allowable error of measurement of temperature of gas and error of measurement of dynamic pressure is established, at which the total error of measurement of speed of gas does not exceed the established limit.*

**Постановка задачи исследований.** Градуировка термоанемометров (ТА) осуществляется с целью расчета градуировочных зависимостей, связывающих температуру газа и выходное напряжение ТА с массовой скоростью газа. Для увеличения точности и эффективности градуировок термоанемометров в СКТБ “Турбулентность” при Донецком национальном университете была разработана ИИС автоматизации и контроля градуировок ТА [1, 2]. В состав ИИС входят следующие основные измерительные каналы:

- 1) канал измерения динамического давления;
- 2) канал измерения температуры образцовым термометром;
- 3) канал измерения выходного напряжения термоанемометра;
- 4) канал измерения температуры термометром, встроенным в ТА.

Градуировка осуществляется на аэродинамической установке АДС-200/250 путем сопоставления данных измерений ТА с данными, полученными от образцового средства измерения скорости газа. В качестве образцового средства измерения (ОСИ) скорости используется трубка Пито. При этом скорость газа определяется, согласно ГОСТ 17.2.4.06–90, по методу измерения динамического давления газа ( $P_d$ )

$$P_{\partial} = P_n - P_{cm}, \quad (1)$$

где  $P_n$  — полное давление газа, Па;

$P_{cm}$  — статическое давление газа, Па;

и последующего расчета скорости газа по формуле

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{\partial}}{\rho}}, \quad (2)$$

где  $\rho = 0.46446 \frac{P_{атм}}{T + 273.15}$  — плотность газа при рабочих условиях, кг/м<sup>3</sup>;

$P_{атм}$  — атмосферное давление, Па;

$T$  — температура газа, °С.

При расчете градуировочных зависимостей целесообразно оперировать критериальными соотношениями, что в дальнейшем даст возможность проводить измерения в газах иного состава, используя результаты градуировки на воздухе. Число Рейнольдса для трубки Пито

$$Re(P_{\partial}, T) = \frac{d}{f_g(T)} \sqrt{2 \cdot P_{\partial} \cdot \rho}, \quad (3)$$

где  $d$  — диаметр измерительного отверстия трубки;

$f_g = 17.2 \cdot 10^{-6} \left( \frac{T + 273.15}{273.15} \right)^{0.77}$  — динамическая вязкость газа.

**Оценка погрешности определения скорости газа.** Из (3) следует, что число Рейнольдса определяется косвенным путем и для его расчета необходимо выполнить прямые измерения динамического давления и температуры газа. Доверительная граница неисключенной систематической погрешности измерения числа Рейнольдса трубкой Пито [3]:

$$\delta_{осн} = \frac{\Delta Re}{Re} = K(P, m) \cdot \sqrt{W_1^2 + W_2^2} = K(P, m) \cdot \sqrt{\left( \frac{\frac{\partial Re}{\partial P_{\partial}} \cdot \Delta P_{\partial}}{Re} \right)^2 + \left( \frac{\frac{\partial Re}{\partial T} \cdot \Delta T}{Re} \right)^2}, \quad (4)$$

где  $W_1, W_2$  — частные относительные погрешности измерения числа  $Re$ , обусловленные погрешностями прямых измерений динамического давления и температуры газа соответственно;  $\Delta P_{\partial}, \Delta T$  — абсолютные погрешности измерений разности давлений и температуры газа;  $K$  — коэффициент, обусловленный принятой доверительной вероятностью  $P$  и числом  $m$  составляющих  $\delta_{осн}$  (при  $P=0,95$   $K=1,1$  и мало зависит от  $m$ ).

Найдем частные производные (весовые функции), входящие в (4):

$$\frac{\partial Re}{\partial P_0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{2}d}{\left[ (P_0 \cdot \rho(T))^{\frac{1}{2}} \cdot f_g(T) \right]} \cdot \rho(T); \quad (5)$$

$$\frac{\partial Re}{\partial T} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{2}d}{\left[ (P_0 \cdot \rho(T))^{\frac{1}{2}} \cdot f_g(T) \right]} \cdot P_0 \cdot \frac{d\rho(T)}{dT} - \sqrt{2} \cdot \frac{(P_0 \cdot \rho(T))^{\frac{1}{2}} \cdot f_g(T)}{f_g(T)^2} \cdot \frac{df_g(T)}{dT}. \quad (6)$$

Исследуем частные погрешности  $W_1$  и  $W_2$ , определим характер их изменения во всем диапазоне скоростей и температур градуировки и выделим критические области, в которых погрешности максимальны. Вычисления осуществим в пакете MathCad. На рис.1 представлены графики зависимости частной погрешности  $W_1$  от числа Re (от скорости) при граничных температурах градуировки и  $\Delta P_0=1$  Па. Из результатов приведенных на рисунке следует, что погрешность  $W_1$  возрастает с уменьшением скорости потока и его температуры. Таким образом, критическим режимом для  $W_1$  является режим с минимальными скоростью и температурой потока. На рис.2 представлены результаты исследования частной погрешности  $W_2$  при  $\Delta T=1^\circ\text{C}$ , которые показывают, что  $W_2$  не зависит от скорости газа и возрастает с уменьшением его температуры. Критический режим для  $W_2$  — минимальная температура градуировки.

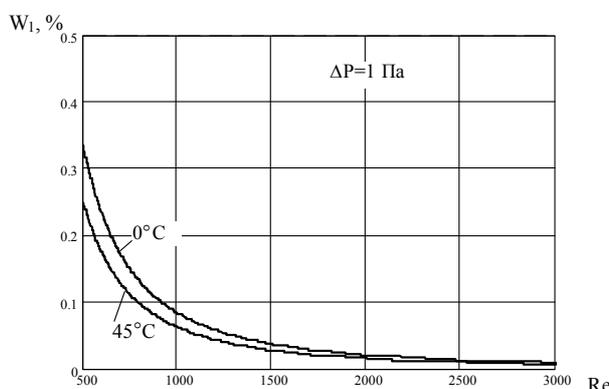


Рисунок 1 — Зависимость  $W_1$  от  $Re$  при граничных значениях температуры газа

На основании результатов исследований частных погрешностей  $W_1$ ,  $W_2$  делаем вывод, что ОСИ дает максимальную погрешность измерений при минимальной скорости и температуре воздушного потока.

Выполним исследование суммарной погрешности ОСИ скорости газа для выявленного критического режима с минимальной скоростью и температурой потока ( $Re=500$  и  $T=0^\circ\text{C}$ ). Погрешность ОСИ по техническому заданию (ТЗ) не должна

превышать 0,5%. Проанализируем полученные результаты. На рис.3 представлены графики зависимости суммарной относительной погрешности ОСИ  $\delta_{ОСИ}$  от абсолютной погрешности измерения динамического давления  $\Delta P_0$  при различных значениях абсолютной погрешности измерения температуры газа  $\Delta T$ .

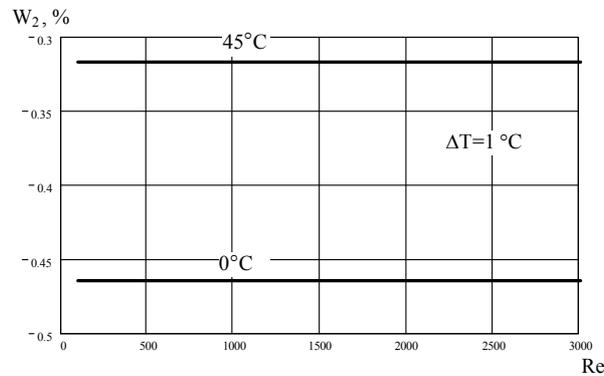


Рисунок 2 — Зависимость  $W_2$  от  $Re$  при граничных значениях температуры газа

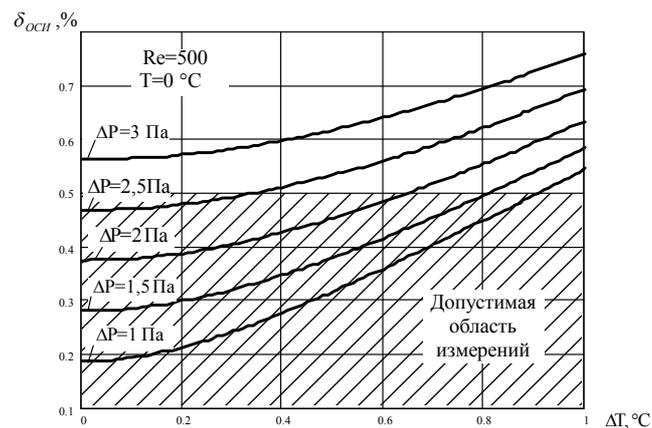


Рисунок 3 — Зависимость суммарной погрешности ОСИ от погрешности измерения температуры газа при различных значениях  $\Delta P_0$

Рисунок 4 содержит аналогичные результаты, но полученные для случая, когда  $\Delta T$  является непрерывным аргументом, а  $\Delta P$  — дискретным.

Из результатов исследований следует, что с уменьшением погрешности измерения давления, растет предел допустимой погрешности по температуре и наоборот, чем выше класс точности термометра, тем менее точный нужен дифманометр.

Установим связь между допустимой погрешностью термометра и погрешностью дифманометра, обеспечивающие заданное значение суммарной погрешности ОСИ. Для этого перепишем выражение (4) относительно  $\Delta T$ :

$$\Delta T(\Delta P) = \frac{\sqrt{\left(\frac{\delta_{ОСИ} \cdot Re}{1,1}\right)^2 - \left(\frac{\partial Re}{\partial P} \cdot \Delta P\right)^2}}{\frac{\partial Re}{\partial T}}. \quad (7)$$

Графическая интерпретация зависимости (7) представлена на рис.5.

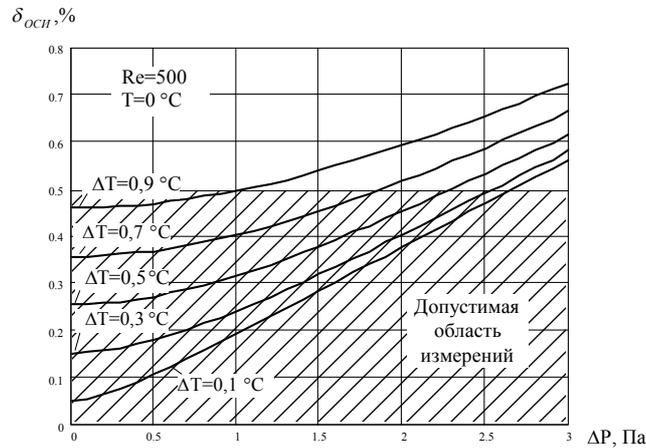


Рисунок 4 — Зависимость суммарной погрешности ОСИ от погрешности измерения динамического давления при различных значениях  $\Delta T$

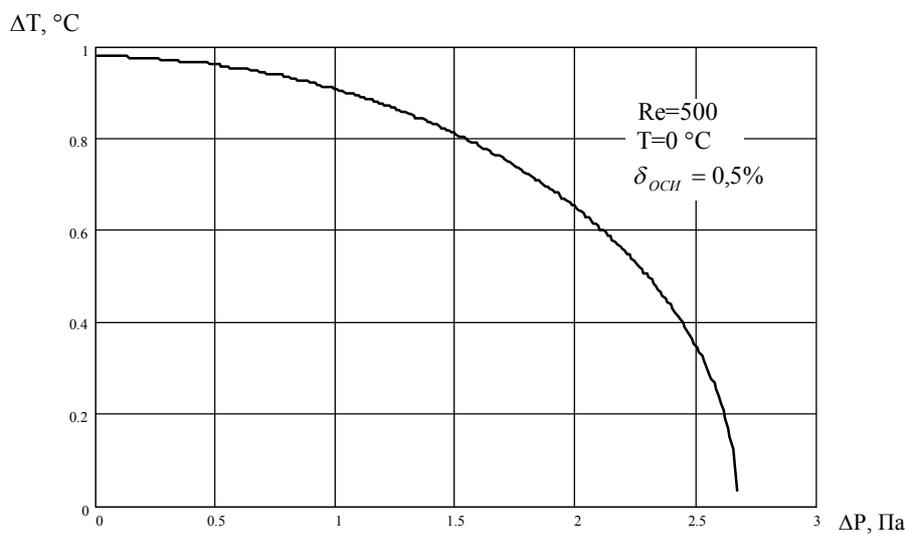


Рисунок 5 — Зависимость погрешности измерения температуры газа от погрешности измерения динамического давления, обеспечивающие заданное значение суммарной погрешности ОСИ ( $\delta_{ОСИ}=0,5\%$ )

Анализ результатов показывает, что при  $\Delta P_\delta < 1,5$  Па допустимый уровень  $\Delta T$  слабо зависит от  $\Delta P_\delta$  и находится в пределах от 0,8 до 1  $^\circ\text{C}$ . Однако с увеличением  $\Delta P_\delta$  от 2 Па и выше требования к точности измерения температуры газа

резко возрастают и при  $\Delta P_0=2,5$  Па предел допустимой погрешности по температуре составляет всего  $0,35$  °С. Полученная зависимость позволяет по заданной суммарной погрешности ОСИ скорости газа поставить требования к точности измерительных каналов температуры газа и динамического давления.

### **Выводы.**

1. На основании результатов исследований погрешностей измерения скорости газа по методу измерения динамического давления при помощи трубки Пито выявлен критический режим градуировки, при котором суммарная погрешность максимальна. Это режим с минимальными скоростью и температурой газа.

2. Установлена зависимость, между допустимой погрешностью измерения температуры газа и погрешностью измерения динамического давления, при которых суммарная погрешность измерения числа Рейнольдса не превышает установленного предела. Полученная зависимость позволяет по заданной суммарной погрешности ОСИ скорости газа поставить требования к точности измерительных каналов температуры газа и динамического давления.

### *Литература*

1. Зорі А.А., Український Ю.Д., Кузнецов Д.М. Система автоматизації градування первинних вимірювальних перетворювачів термоанемометрів. Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 20: — Донецьк: ДонДТУ, 2000. — С. 260–268.
2. Зори А.А., Кузнецов Д.Н. Повышение эффективности градуировки первичных измерительных преобразователей термоанемометров. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 25: — Донецьк: ДонДТУ, 2001.– С. 183–189.
3. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений: Метрологическая справочная книга. — Л.: Лениздат, 1987. — 295 с., ил.
4. Зори А.А., Коренев В.Д., Хламов М.Г. Методы, средства, системы измерения и контроля параметров водных сред. — Донецк: РИА ДонГТУ, 2000. — 388 с.: ил.
5. Ярин Л.П. и др. Термоанемометрия газовых потоков/ Л.П.Ярин, А.Л.Генкин, В.И.Кукес. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983, — 198 с., ил.

Сдано в редакцию: 11.03.2003г.

Рекомендовано к печати: д.т.н., проф. Зори А.А.