

## ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ

---

УДК 533.6

Соколов В.И., д.т.н., Гусенцова Я.А., инж., Адамчо Я.В., инж.

ВНУ им. Владимира Даля, г. Луганск

### ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ

*Выполнена оценка точности измерения средней скорости турбулентного потока в зависимости от радиуса установки датчика. Произведена оценка влияния на точность измерения средней скорости турбулентного потока радиуса установки датчика скорости. Получены аналитические зависимости, связывающие погрешность измерения с числом Рейнольдса. Установлены выражения для определения радиусов средней скорости в кольцевом цилиндрическом канале.*

#### **Постановка проблемы**

Одним из основных параметров при контроле промышленных выбросов является их объем, который устанавливают по величине расхода газового потока в вентиляционных трубах, непосредственно осуществляющих выброс. Методы и средства измерения расхода достаточно разнообразны [1, 2], но самым надежным и получившим наибольшее распространение является гидродинамический метод [3]. Значение расхода определяется по величине средней скорости, найденной по разности между полным и статическим давлением

$$Q = u_0 S, \quad (1)$$

где  $u_0$  – средняя скорость потока;  $S$  – площадь поперечного сечения вентиляционного канала.

Датчик скорости устанавливают на длине не менее 20 гидравлических диаметров канала от входа [3, 4] с тем, чтобы в контрольном сечении иметь сформировавшийся профиль скорости. В точности измерения расхода также играет место установки датчика по сечению канала, поскольку скорость потока неравномерно распределена по сечению. Кроме того, распределение скорости зависит от числа Рейнольдса [2, 5, 6], т.е. от самого значения средней скорости или расхода. И, если для круглых цилиндрических каналов имеются рекомендации по месторасположению датчиков скорости при развитом турбулентном течении [3], то для кольцевых каналов такие сведения в литературе отсутствуют. Вместе с тем, кольцевые цилиндрические каналы достаточно часто используются в качестве выходных для вентиляционных систем. Так, выброс систем вентиляции энергоблоков типа ВВЭР-1000 атомных станций в аварийно-ремонтном режиме осуществляется через такие каналы. Поэтому вопрос достоверного измерения расхода газового потока в кольцевых цилиндрических каналах, является актуальным.

#### **Цель статьи**

Целью работы является исследование зависимости расположения датчиков на радиусе в цилиндрической трубе от средней скорости газового потока при турбулентном режиме течения.

### Изложение аналитических исследований

Распределение скорости при турбулентном течении в круглой цилиндрической трубе для газового потока при скоростях до 70 м/с и числах Рейнольдса  $Re > 10^4$ , имеет вид [5, 6]

$$\frac{u}{u_0} = \frac{(n+1)(n+2)}{2} \left(1 - \frac{r}{r_0}\right)^n, \quad (2)$$

где  $u_0$  – средняя скорость потока;  $n$  – показатель степени, зависящий от числа Рейнольдса (например,  $n = 1/7$  для  $Re = 10^5$ );

$r$  – радиус произвольной точки, отсчитываемый от оси трубы;  $r_0$  – радиус трубы.

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{u_0 d}{\nu}. \quad (3)$$

Здесь  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости.

Безразмерное отклонение скорости от среднего значения

$$\varepsilon_u = \frac{u - u_0}{u_0} = \frac{u}{u_0} - 1, \quad (4)$$

поэтому систематическая погрешность измерения средней скорости с учетом (1), выраженная в процентах, составит

$$\delta_u = \left| \frac{(n+1)(n+2)}{2} \left(1 - \frac{r}{r_0}\right)^n - 1 \right| \times 100, \%. \quad (5)$$

На рис.1 показано распределение модуля систематической погрешности по безразмерному радиусу  $\bar{r} = r/r_0$ , рассчитанное согласно (2) для  $Re = 10^5$ . Как видно, при установке датчика в центре трубы погрешность превышает 20%.

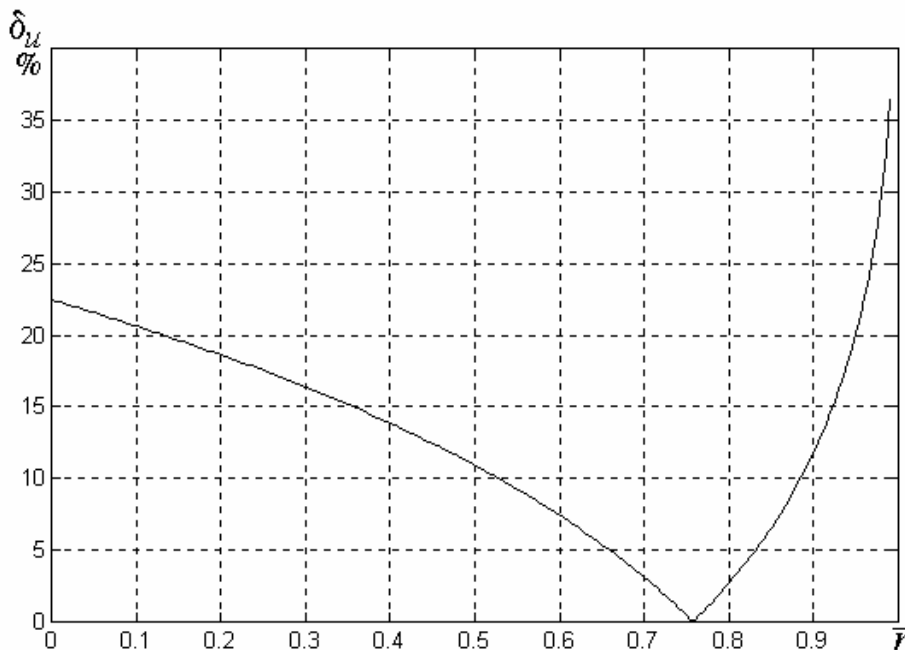


Рис. 1. Зависимость модуля систематической погрешности от радиуса установки датчика ( $Re = 10^5$ )

Значение радиуса средней скорости можно установить, подставляя равенство  $u=u_0$  в выражение (2),

$$r^* = \frac{d}{2} \left( 1 - \left( \frac{2}{(n+1)(n+1)} \right)^{\frac{1}{n}} \right). \quad (6)$$

Для определения радиуса средней скорости при произвольных числах Рейнольдса воспользуемся экспериментальными данными [6] значений показателя степени в распределении (2) скорости по сечению трубы. Значения  $n$  для ряда чисел Рейнольдса  $Re$  представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения показателя степени в распределении скорости

Re	$4 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^4$	$10^5$	$1,1 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^6$
N	1/6	1/6,6	1/7	1/8,8	1/10

Табличные данные аппроксимированы по методу наименьших квадратов следующей зависимостью

$$n = 0,252 - 2,29 \times 10^{-2} \lg Re. \quad (7)$$

С учетом аппроксимационной зависимости (4) можно установить связь радиуса средней скорости с числом Рейнольдса для круглого цилиндрического канала. Однако, как показывают расчеты, радиус средней скорости практически не зависит от числа Рейнольдса и имеет значение  $\approx 0,76r_0$  в диапазоне  $Re=10^5 \div 10^6$ , являющегося рабочим для промышленных вентиляционных систем.

Степенную зависимость для профиля скорости в кольцевом цилиндрическом канале представим следующим алгоритмическим выражением

$$\frac{u}{u_m} = \begin{cases} \left( \frac{r-r_1}{r_m-r_1} \right)^n, & r_1 \leq r \leq r_m; \\ \left( \frac{r_2-r}{r_2-r_m} \right)^n, & r_m \leq r \leq r_2, \end{cases} \quad (8)$$

где  $u_m$  – максимальная скорость;

$r_1, r_2$  – радиусы внутренней и внешней поверхностей;

$r_m$  – радиус максимальной скорости.

Для радиуса максимальной скорости используем следующую эмпирическую зависимость [7]

$$\frac{r_m - r_1}{r_2 - r_m} = \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{0,343}. \quad (9)$$

Так как средняя скорость

$$u_0 = \frac{Q}{\pi(r_2^2 - r_1^2)}, \quad (10)$$

а расход

$$Q = 2\pi \left( \int_{r_1}^{r_m} ur dr + \int_{r_m}^{r_2} ur dr \right), \quad (11)$$

то с учетом (5) можно получить

$$\frac{u_0}{u_m} = \frac{2}{(n+2)(n+1)} \frac{r_2 + r_1 + nr_m}{r_2 + r_1}. \quad (12)$$

На основании (9) преобразуем зависимость (12) к виду

$$\frac{u}{u_0} = \frac{(n+2)(n+1)}{2} \frac{r_2 + r_1}{r_2 + r_1 + nr_m} \times \begin{cases} \left( \frac{r - r_1}{r_m - r_1} \right)^n, & r_1 \leq r \leq r_m; \\ \left( \frac{r_2 - r}{r_2 - r_m} \right)^n, & r_m \leq r \leq r_2. \end{cases} \quad (13)$$

Подставляя сюда равенство  $u = u_0$ , устанавливаем выражения для двух радиусов средней скорости

$$r_1^* = r_1 + (r_m - r_1) A^{\frac{1}{n}}, \quad (14)$$

$$r_2^* = r_2 - (r_2 - r_m) A^{\frac{1}{n}}, \quad (15)$$

где

$$A = \frac{2}{(n+2)(n+1)} \frac{r_2 + r_1 + nr_m}{r_2 + r_1}. \quad (16)$$

На рис. 2 показаны зависимости безразмерных радиусов средней скорости  $\bar{r}_1^* = r_1^*/r_0$  и  $\bar{r}_2^* = r_2^*/r_0$  от безразмерного форм параметра канала  $\xi = r_1/r_2$ , рассчитанные согласно (8) и (9) с учетом (6) при  $n = 1/7$ . Как видно, радиус средней скорости существенно зависит от соотношения радиусов внутренней и внешней поверхностей канала. Грубую оценку влияния числа Рейнольдса на радиус нулевой систематической погрешности измерения скорости можно выполнить на основании аппроксимационной зависимости (4). Однако, расчеты показывают, что, как и в случае круглого цилиндрического канала, в диапазоне рабочих для промышленных вентиляционных систем чисел Рейнольдса, величина радиуса средней скорости изменяется не существенно.

### Выводы

Точность измерения средней скорости турбулентного потока существенно зависит от радиуса расположения датчика. При расположении датчика на радиусе средней скорости погрешность измерения практически не зависит от числа Рейнольдса в диапазоне  $Re = 10^5 \div 10^6$ . Из двух радиусов средней скорости в кольцевом цилиндрическом канале, определяемых исходя из соотношения радиусов внутренней и внешней поверхностей, на практике рекомендуется использовать больший, где вследствие меньшего радиального градиента скорости слабее проявляется погрешность установки датчика на точность измерения средней скорости.

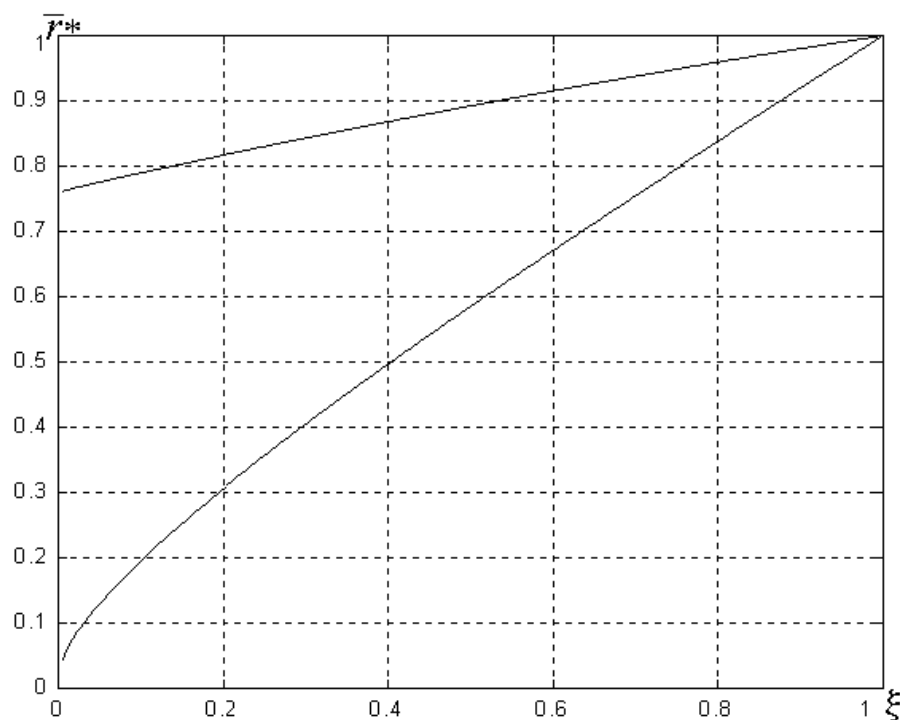


Рис. 2. Радиусы средней скорости в кольцевом канале

### Список литературы

1. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1974. — 480 с.
2. Коваленко А.А., Соколов В.И., Дымнич А.Х., Уваров П.Е. Основы технической механики жидкостей и газов. - Луганск: ВУГУ, 1998. — 272 с.
3. Голинько В.И., Колесник В.Е. Измерение скорости газоздушных потоков при контроле промышленных выбросов // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1999. - № 1. – С. 39 – 43.
4. Соколов В.И. О расчете начальных участков турбулентных потоков в цилиндрических каналах. – Луганск: ВУГУ, 1999. – 35 с.
5. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. - М.: Машиностроение, 1978. — 463 с.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1974. - 712 с.
7. Kays W.M., Leung E.J. Heat transfer in annular passages - hydrodynamically developed turbulent flow with arbitrarily prescribed heat flux, Int. J. – Heat Mass Transfer. — 1963. Vol. 6. — P. 537-557.

Стаття надійшла до редакції 15.05.06

© Соколов В.И., Гусенцова Я.А., Адамчо Я.В., 2006