



# Оценка точности определения расхода воздуха в системах вентиляции при их паспортизации

*К. Е. Таратыркин, директор наладочной организации по воздуху ООО «АК-ИТП», taratyркин@icloud.com*

*Д. В. Черноиванов, инженер, ООО ФПК «Космос-Нефть-Газ»*

**Ключевые слова:** система вентиляции, расход воздуха, предельная относительная погрешность определения расхода воздуха, среднеквадратичная относительная погрешность, пульсация турбулентного потока

Пусконаладка систем вентиляции и их паспортизация проводятся в соответствии с ГОСТ 12.3.018-79 «Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний» [1] и СП 73.13330.2012 «Внутренние санитарно-технические системы зданий» [2]. ГОСТ 12.3.018-79 содержит требования к подготовке и проведению испытаний, требования к аппаратуре для измерения скоростей потока, а также определяет положение мерного сечения, количество точек замера и их координаты и содержит расчет погрешности измерения расхода в зависимости от специфики конкретного проводимого испытания – от испытательного оборудования, характеристик мерного сечения, атмосферных условий. В СП 73.13330.2012 определено значение максимального отклонения фактического расхода воздуха от предусмотренного в проектной документации. Согласно данному своду правил значение отклонения не должно превышать  $\pm 8\%$ , однако на практике при проведении аэродинамических испытаний не всегда удается получить результаты, удовлетворяющие указанному критерию. А ведь несоответствие расхода на величину более  $\pm 8\%$  является поводом для отказа от приемки системы вентиляции со всеми вытекающими отсюда последствиями. Причин несоответствия может быть множество, но вся ответственность в конечном счете ложится на организацию, производящую монтаж. Однако давайте задумаемся: насколько требования, указанные в СП 73.13330.2012, выполнимы при проведении замеров в «полевых» условиях? Существуют ли объективные предпосылки для пересмотра нормы  $\pm 8\%$ ? Размышления авторов по этому вопросу представлены в данной статье.

## Наиболее вероятные причины отклонений

Естественно, причин несоответствия замеренного расхода проектному много, и, к сожалению, многие из них не зависят от качества монтажа вентиляционной системы или от мастерства и технической оснащенности наладчиков.

**Во-первых**, как известно, расход в системе зависит от ее аэродинамического сопротивления. При разработке проекта рассчитываются проектный расход, сопротивление системы воздуховодов, и, исходя из этого, подбирается соответствующий вентилятор. При монтаже вентиляционной системы ее фактические размеры будут несколько отличаться от проектных. Некоторые воздуховоды окажутся чуть длиннее, некоторые – чуть короче, радиусы поворота отводов могут оказаться чуть круче, и поэтому отводы будут создавать большее сопротивление. Воздуховоды и фасонные элементы имеют конструктивные допуски, поэтому фактические размеры у разных производителей могут отличаться. Шероховатость стенок каналов тоже может несколько отличаться от той, что предусмотрена расчетом. В совокупности все эти небольшие конструктивные отклонения вентиляционной сети могут привести к несоответствию расхода в системе расчетному.

**Во-вторых**, конструктивные допуски вентиляционной установки могут приводить к отклонению от номинала по расходу воздуха. Данное отклонение регламентируется в ГОСТ ИСО 5802–2012 «Вентиляторы промышленные. Испытания в условиях эксплуатации» [3] и может составлять до  $\pm 1,5\%$  по объемному расходу.

**В-третьих**, система вентиляции является открытой и определенным образом реагирует на изменение параметров окружающей среды. Приведем пример. Вентиляционная установка находится на крыше. Зима, мороз. В помещении включено отопление. Перепад температур и перепад высот создают естественную тягу, направленную из помещения. При работе вентиляционной установки эта тяга создает дополнительное сопротивление, и расход воздуха уменьшается.

Порывы ветра вблизи вентиляционной установки вызывают изменение статического давления. Это приводит к колебанию расхода вентилятора и, как следствие, скорости в мерном сечении. Поэтому в ветреную погоду точность аэродинамических испытаний может быть снижена.

## Поставки

Мицубиси Электрик (РУС) осуществляет поставку на следующих условиях:

- самовывоз из Италии,
- со склада в Москве,
- доставка до клиента в любом городе России.

## Контакты

ООО «Мицубиси Электрик (РУС)»

Москва, Космодамианская набережная, 52, 1

[aircon@mer.mee.com](mailto:aircon@mer.mee.com)

Москва: +7 (495) 721-31-64

Санкт-Петербург: +7 (812) 633-34-93

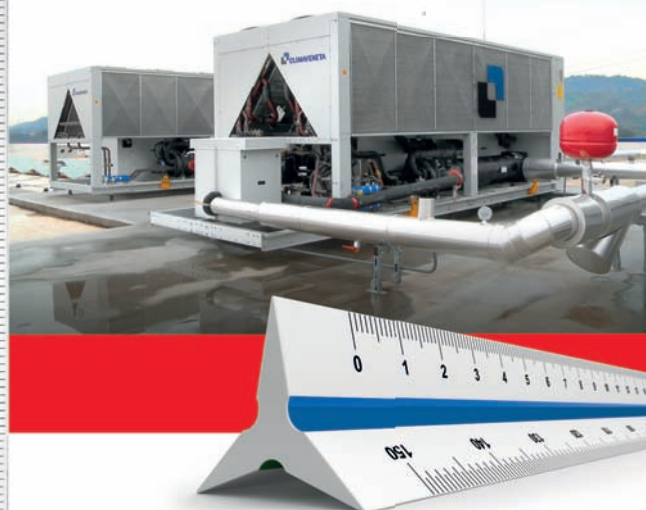
Екатеринбург: +7 (343) 379-90-49

Уфа: +7 (347) 246-10-47

Краснодар: +7 (926) 369-16-55

Новосибирск: +7 (983) 510-26-45

Казань: +7 (917) 221-25-44



JAPAN

Реклама

 **CLIMVENETA**  
SUSTAINABLE COMFORT

A Group Company of

 **MITSUBISHI  
ELECTRIC**

[aircon@mer.mee.com](mailto:aircon@mer.mee.com)



Таблица 1

| Форма мерного сечения | Количество точек измерений | δ, %, при расстоянии от места возмущения потока до мерного сечения в гидравлических диаметрах $D_h$ |    |    |   |    |
|-----------------------|----------------------------|---|----|----|---|----|
|                       |                            | 1   | 2  | 3  | 5 | >5 |
| Круг                  | 4                          | 20  | 16 | 12 | 6 | 3  |
|                       | 8                          | 16  | 12 | 10 | 5 | 2  |
|                       | 12                         | 12  | 8  | 6  | 3 | 2  |
| Прямоугольник         | 4                          | 24  | 20 | 15 | 8 | 4  |
|                       | 16                         | 12  | 8  | 6  | 3 | 2  |

Таблица 2

| Показание прибора в долях длины шкалы | $\sigma_p, \sigma_B, \sigma_t$ %, для приборов класса точности |       |
|---------------------------------------|--|-------|
|                                       | 1,0  | 0,5   |
| 1,00                                  | ±0,5   | ±0,25 |
| 0,75                                  | ±0,7   | ±0,24 |
| 0,50                                  | ±1,0   | ±0,5  |
| 0,25                                  | ±2,0   | ±1,0  |
| 0,10                                  | ±5,0   | ±2,5  |
| 0,05                                  | ±10,0  | ±5,0  |

Таким образом, ввиду открытости вентиляционной системы колебания параметров окружающей среды – давления, температуры, влажности, скорости и направления ветра – оказывают влияние на расход воздуха.

Следующая большая группа погрешностей связана с самой методикой испытаний и с техникой проведения измерений. Эти погрешности зависят от точности показаний приборов, точности позиционирования измерительного инструмента, правильности выбора мерного сечения и т. д. Большинство этих погрешностей учтено в ГОСТ 12.3.018–79 при оценке общей погрешности методики.

### Погрешность методики определения расхода по ГОСТ 12.3.018

В соответствии с ГОСТ 12.3.018–79 предельная относительная погрешность определения расхода воздуха в процентах выражается следующей формулой:

$$\delta_L = (2\sigma_L + \delta_\Phi), \quad (1)$$

где  $\delta_\Phi$  – предельная относительная погрешность определения расхода воздуха, связанная с неравномерностью распределения скоростей в мерном сечении;

$\sigma_L$  – среднеквадратичная относительная погрешность, обусловленная неточностью измерений в процессе испытаний.

Значение погрешности  $\delta_\Phi$  зависит от формы воздуховода, количества точек измерения и расстояния от места возмущения потока до мерного сечения. В табл. 1 приведены значения погрешности  $\delta_\Phi$ , представленные в ГОСТ 12.3.018–79.

Как следует из табл. 1, отклонение по расходу воздуха, вызванное неравномерностью профиля скорости в воздуховоде при расположении мерного сечения на расстоянии трех гидравлических диаметров (минимально допустимое в [1] расстояние) от места возмущения потока, может составить до 15%. Значение погрешности  $\sigma_L$  определяется по формуле:

$$\sigma_L = \left( 4\sigma_D^2 + \frac{1}{4}\sigma_B^2 + \frac{1}{4}\sigma_t^2 + \frac{1}{4}\sigma_p^2 \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где  $\sigma_p, \sigma_B, \sigma_t$  – среднеквадратичные погрешности измерений динамического давления  $P_d$  потока, барометрического давления  $B_a$ , температуры  $t$  потока соответственно;

$\sigma_D$  – среднеквадратичная погрешность определения размеров мерного сечения воздуховода; при  $100 \text{ мм} \leq D_h \leq 300 \text{ мм}$  величина  $\sigma_D = \pm 3\%$ , при  $D_h > 300 \text{ мм}$  величина  $\sigma_D = \pm 2\%$ .

Значения  $\sigma_p, \sigma_B, \sigma_t$  по ГОСТ 12.3.018–79 представлены в табл. 2.

Как следует из табл. 2, значения погрешностей зависят от класса точности прибора и от того, в какой части шкалы прибора находится измеряемое значение скорости. Однако в последнее время появились приборы, которые имеют более высокий класс точности, а также более точно измеряют скорость воздуха в нижней части шкалы прибора. Возможно, это и послужило поводом к ужесточению требований и снижению значения допустимого отклонения до  $\pm 8\%$  (до 2012 года допустимое отклонение составляло  $\pm 10\%$ ).



Приведем пример расчета предельной погрешности измерения расхода, взятый из ГОСТ 12.3.018–79.

«... Мерное сечение расположено на расстоянии 3 диаметров за коленом воздуховода диаметром 300 мм (т. е.  $\sigma_D = \pm 3\%$ ). Измерения производят комбинированным приемником давления в 8 точках мерного сечения (т. е. по табл. 1  $\delta_\phi = +10\%$ ). Класс точности приборов (дифманометр, барометр, термометр) – 1,0. Отсчеты по всем приборам производятся примерно в середине шкалы, т. е. по табл. 2,  $\sigma_p = \sigma_B = \sigma_t = \pm 1,0\%$ . Предельная относительная погрешность измерения расхода воздуха, %, составляет:

$$\delta_L = 2 \left( 4 \cdot 3^2 + \frac{1}{4} \cdot 1 + \frac{1}{4} \cdot 1 + \frac{1}{4} \cdot 1 \right)^{0,5} + 10 = \pm 12 + 10 = \pm 22, -2\% \quad \dots$$

Таким образом, мы видим, что методика аэродинамических испытаний, описанная в ГОСТ 12.3.018–79, во многих случаях имеет погрешность больше, чем допустимое в СП 73.13330.2012 отклонение замеренного расхода от проектного. В некоторых случаях погрешность может превышать 20%.

### Влияние турбулентных пульсаций

В последнее время чувствительность приборов для определения скорости воздуха в воздуховоде значительно выросла. Современные приборы стали чувствительны к пульсациям турбулентного потока, которые, в свою очередь, могут внести некоторую погрешность в результаты измерений.

Определим погрешность, вносимую турбулентными пульсациями потока. На рис. 1 представлен принципиальный график изменения продольной составляющей мгновенной скорости в произвольной точке сечения в зависимости от времени.

Из рис. 1 видно, что мгновенную скорость в определенной точке пространства можно представить как сумму осредненной по времени скорости и пульсации скорости:

$$u(t) = \bar{u}(t) + u'(t). \quad (3)$$

В соответствии с теорией Прандтля пульсационная составляющая продольной скорости потока зависит от пути смещения и градиента продольной скорости от оси к стенке. Путь смещения представляет собой длину пробега макроэлемента

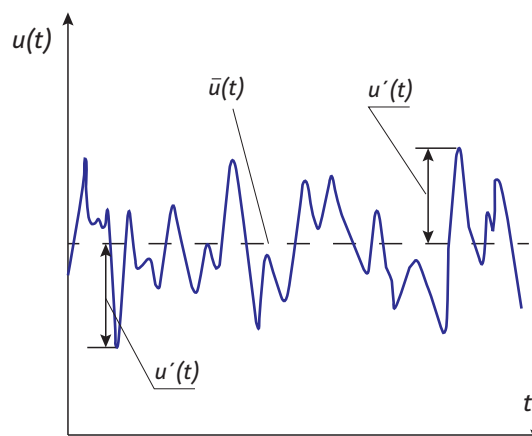


Рис. 1. Пульсации продольной скорости в произвольной точке сечения в зависимости от времени

турбулентного объема жидкости (газа) [4] и определяется, как:

$$l = ky, \quad (4)$$

где  $k$  – экспериментальная постоянная (постоянная Кармана)  $k = 0,4$ ;

$y$  – расстояние от стенки трубопровода до произвольной точки сечения.

Пульсационная составляющая определяется выражением:

$$u' = l \frac{du}{dy}. \quad (5)$$

Из теории Прандтля следует, что абсолютное значение пульсаций скорости увеличивается от стенки канала к его оси, а процентное отношение пульсационной составляющей скорости к осредненной по времени скорости в любой точке сечения будет постоянно для потока с заданными параметрами:

$$\Delta_{u'} = \frac{u' \cdot 100\%}{u}. \quad (6)$$

Результаты расчета пульсационной составляющей скорости в зависимости от скорости потока в воздуховоде круглого сечения диаметром 400 мм представлены в табл. 3. При этом профиль скорости в воздуховоде принимался в соответствии со степенным законом:

$$\frac{u}{u_0} = \left( \frac{y}{R} \right)^n, \quad (7)$$

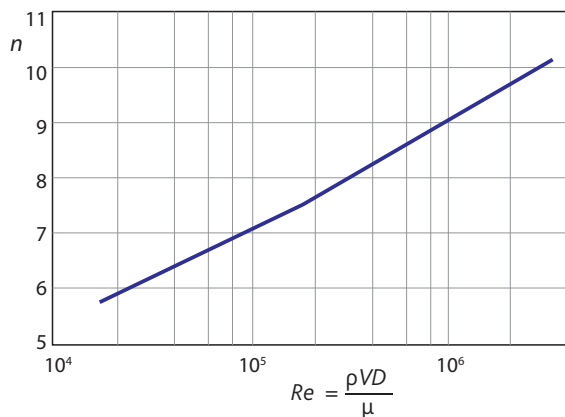


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $n$  от числа Рейнольдса

где  $u$  – осредненная по времени скорость в произвольной точке сечения;

$u_0$  – осредненная по времени скорость на оси трубопровода;

$R$  – радиус трубопровода;

$n$  – эмпирический коэффициент.

Эмпирический коэффициент  $n$  зависит от числа Рейнольдса и определяется по графику (рис. 2).

Точки замеров, обозначенные в табл. 3 ( $y_1 = 0,054D$  и  $y_2 = 0,28D$ ), соответствуют координатам замера скорости в круглых воздуховодах согласно ГОСТ 12.3.018–79. Таким образом, при проведении замеров отклонение замеренной скорости от осредненной по времени, вызванное турбулентными пульсациями потока, может составлять  $\pm 5 \dots \pm 7\%$ .

Среднеквадратичное отклонение пульсационной составляющей от осредненной по времени скорости при этом будет равно:

$$\sigma_{u'} = |0,71u'|. \quad (8)$$

Следовательно, значение среднеквадратичного отклонения составит приблизительно 3,5...5%.

Оценим вероятность получения погрешности измерения скорости более 1% либо в большую,

либо в меньшую сторону от средней скорости. Оценку вероятности проведем для одного, трех и десяти замеров. Для этого условимся, что результаты условных замеров подчиняются закону нормального распределения случайной величины. В таком случае вероятность получить отклонение, превышающее среднее значение скорости более чем на 1%, составит:

- для одного измерения – 42%;
- для трех измерений – 7,4%;
- для десяти измерений – 0,17%.

Приведенные выше результаты расчетов показывают, что влияние турбулентных пульсаций скорости может ощущаться лишь при небольшом количестве замеров. Например, измерив скорость в одной точке три раза, мы с вероятностью 7,4% ошибемся более чем на +1% или на –1%. При этом результаты замеров скорости в других точках сечения с большой долей вероятности нивелируют это отклонение.

### Опыт других стран

Европейские нормы, которые регламентируют приемку систем вентиляции, менее жесткие, чем российские. Например, стандарт EN 12599 «Вентиляция для зданий – Процедуры проведения испытаний и измерительные методы для передачи систем кондиционирования воздуха и систем вентиляции» [5] допускает отклонение расхода всей системы от проектного  $\pm 15\%$ , а для каждого отдельного помещения допускается отклонение до  $\pm 20\%$ . При таких нормативах сдача и наладка систем вентиляции становятся вполне решаемой задачей и перестает быть «подвигом».

В работе [6] предпринята хорошая попытка разобраться в вопросе, какое отклонение расхода считать справедливым. Авторы провели прямое численное моделирование турбулентных течений

Таблица 3

| Скорость воздуха на оси воздуховода, м/с | Re                | n   | Скорость $u$ в точке $y_1 = 0,054D$ , м/с | Пульсации скорости $u'$ в точке $y_1 = 0,054D$ , м/с | Скорость $u$ в точке $y_2 = 0,28D$ , м/с | Пульсации скорости $u'$ в точке $y_2 = 0,28D$ , м/с | $\Delta_{u'}$ , % |
|--|-------------------|-----|---|--|--|---|-------------------|
| 1  | $2,16 \cdot 10^4$ | 6   | 0,69                                      | 0,046  | 0,908                                    | 0,061   | 6,7               |
| 5  | $1,08 \cdot 10^5$ | 7,2 | 3,67                                      | 0,204  | 4,61                                     | 0,256   | 5,6               |
| 10                                       | $2,16 \cdot 10^5$ | 7,7 | 7,49                                      | 0,389  | 9,28                                     | 0,482   | 5,2               |



Таблица 4

| Схема испытаний     | Количество осей (точек) | Макс. погрешность, %                |    |    |
|---------------------|-------------------------|-------------------------------------|----|----|
|                     |                         | L/D, расстояние от места возмущения |    |    |
|                     |                         | 5                                   | 10 | 45 |
| ISO 3966            | 5 (25)                  | 4                                   | 4  | 2  |
|                     | 1 (5)                   | 10                                  | 7  | 7  |
| EN 12599            | 3 (9)                   | 8                                   | 8  | 5  |
|                     | 1 (3)                   | 17                                  | 11 | 9  |
| Pr EN 16211         | 1 (6)                   | 15                                  | 6  | 4  |
| Нестандартный метод | 1 (5)                   | 15                                  | 7  | 7  |

при числах Рейнольдса, характерных для вентиляционных систем. Численное моделирование проводилось с применением специализированного программного обеспечения. Результаты, полученные по компьютерной модели, сверялись с данными экспериментов [7]. При этом была показана хорошая сходимость модели с опытом. Далее было проведено исследование отклонения фактического расхода, определенного по модели, от замеренного по методикам стандартов ISO 3966, EN 12599, Pr EN 16211 в тех же модельных течениях. Методики указанных выше стандартов аналогичны ГОСТ 12.3.018–79, но отличаются количеством точек замеров и их расположением. Также было исследовано влияния удаления мерного сечения от мест возмущения потока (от отводов). Некоторые результаты, полученные в [6] для прямоугольных воздуховодов, приведены в табл. 4.

Согласно [6] и [7] профиль скорости в воздуховоде полностью устанавливается лишь на расстоянии, равном приблизительно 45 гидравлическим диаметрам от места возмущения.

## Заключение

В данной статье были проанализированы основные факторы, влияющие на точность определения расхода в системах вентиляции, причем влияние некоторых из этих факторов было оценено количественно. Например, ГОСТ 12.3.018–79 допускает погрешность описанной в нем методики определения расхода воздуха более 20%. Отклонение параметров вентиляционной установки от номинала может составлять до  $\pm 1,5\%$  [3].

EN 12599, регламентирующий приемку систем вентиляции в Европе, определяет максимальное

отклонение замеренного расхода от проектного не более  $\pm 15\%$  для системы в целом, а для отдельных помещений не более  $\pm 20\%$  [5].

Ввиду объективных обстоятельств, изложенных в данной статье, критерий приемки системы вентиляции, определенный в СП 73.13330.2012, – максимальное отклонение замеренного расхода от проектного не более  $\pm 8\%$  – является необоснованным, не имеющим под собой никакой – ни научной, ни практической базы. Поэтому авторам представляется необходимым поднять вопрос о пересмотре значения допускаемого отклонения в сторону увеличения согласно последним достижениям теории и практики.

## Литература

1. ГОСТ 12.3.018–79 «Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний». – М., 1979.
2. СП 73.13330.2012 «Внутренние санитарно-технические системы зданий». – М., 2012.
3. ГОСТ ИСО 5802–2012 «Вентиляторы промышленные. Испытания в условиях эксплуатации». – М., 2012.
4. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Госуд. изд. техн.-теор. лит-ры, 1953.
5. EN 12599 «Вентиляция для зданий – Процедуры проведения испытаний и измерительные методы для передачи систем кондиционирования воздуха и систем вентиляции». 2012.
6. Care I., Bonthoux F., Fountane J.-R. Measurement of air flow in duct by velocity measurements. EDP Sciences, 2014.
7. Bonthoux F., Fountane J.-R. Measurement of flow rate in a duct by investigation of the velocity field. Uncertainty linked to position and number of measurement points. – Roomvent, 2002. ■