

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ

УДК 697.922.2

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА ПО ДЛИНЕ ВОЗДУХОВОДОВ РАВНОМЕРНОЙ РАЗДАЧИ

канд. техн. наук, доц. **Т.И. КОРОЛЁВА, О.Н. ШИРОКОВА**
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены вопросы совершенствования воздухоподающих вентиляционных устройств, служащих для поддержания в помещении состава и состояния воздуха, удовлетворяющего санитарно-гигиеническим и технологическим требованиям. Описаны способы, обеспечивающие равномерную раздачу воздуха по длине воздуховодов различной конструкции. Приведены схемы неорганизованного истечения воздуха из отверстий воздуховода равномерной раздачи и организованного истечения воздуха через щель с насадкой. На аэродинамическом стенде проведены экспериментальные исследования воздуховодов равномерной раздачи со щелью постоянной ширины и с установкой в щели направляющих насадок. Экспериментальные исследования показали, что статическое давление и скорость выхода воздуха по длине воздуховода равномерной раздачи конусообразной формы как со щелью постоянной ширины, так и с направляющими решетками остаются постоянными при изменении расхода воздуха. Выбрана оптимальная конструкция направляющих решеток для установки в щели воздухораспределителя, устраняющая настиление потока на поверхность воздуховода.

Введение. Удовлетворительное состояние воздушной среды является одним из главных факторов, способствующих улучшению условий труда, производственной санитарии, техники безопасности на рабочих местах. Вентиляционные устройства служат для поддержания в помещении состава и состояния воздуха, удовлетворяющего санитарно-гигиеническим и технологическим требованиям. Как показали исследования, характер циркуляции воздуха в помещениях, скорость его движения в различных точках определяется главным образом действием приточных струй. В настоящее время существует большое количество различных по конструкции приточных устройств. Техника вентиляции выдвигает задачу равномерного распределения воздуха по всей длине помещений, для чего осуществляется выпуск воздуха из воздуховодов равномерной раздачи. Отверстия, через которые происходит подача воздуха, могут быть щелевыми (при отношении сторон 1 : 20) или компактными (круглого, квадратного и прямоугольного сечения). Сами воздухораспределители могут быть прямоугольными, круглыми, конусными и клиновидными [1]. Воздухораспределители такого типа нашли широкое применение в общеобменных приточных системах вентиляции и для создания местного притока при устройстве воздушных завес, бортовых сдувов у промышленных ванн, а также для установок, состоящих из групп параллельно работающих аппаратов.

Основная часть. Истечение воздуха через отверстие в стенке воздуховода происходит за счет действия статического давления P_{cm} , скорость истечения, м/с, определяется по формуле:

$$v = \mu \sqrt{\frac{2P_{cm}}{\rho}}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент расхода воздуха отверстия, зависящий от конструктивного исполнения последнего; P_{cm} – статическое давление, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Расход воздуха через отверстие компактной формы, м³/ч:

$$L_x = \mu \sigma \sqrt{\frac{2P_{cm}}{\rho}}. \quad (2)$$

Расход воздуха на единицу длины щели, м³/ч:

$$L_{щ} = \mu \delta \sqrt{\frac{2P_{cm}}{\rho}}, \quad (3)$$

где σ – площадь отверстия, м²; δ – ширина щели, м.

Из уравнений (2), (3) следует, что равномерный попутный расход воздуха в воздуховоде можно обеспечить разными способами.

В первом способе имеет место постоянное сечение воздуховода ($F = const$) и постоянный коэффициент расхода воздуха ($\mu = const$). Поскольку происходит попутный отток воздуха, то статическое давление по его длине меняется. Следовательно, необходимо изменять и размеры отверстий σ (δ) так, чтобы соблюдались условия:

$$\sigma \sqrt{P_{cm}} = const = \frac{L_k}{\mu} \sqrt{\frac{\rho}{2}}; \quad (4)$$

$$\delta \sqrt{P_{cm}} = const = \frac{L_{ut}}{\mu} \sqrt{\frac{\rho}{2}}. \quad (5)$$

Второй способ реализуется, если $\sigma(\delta) = const$, $\mu = const$, а поперечное сечение воздуховода меняется таким образом, что статическое давление по длине воздухопровода остается постоянным.

Третий способ возможен, если воздухопровод имеет постоянное сечение $F = const$ и отверстия (щель) постоянного размера $\sigma(\delta) = const$, выполненные конструктивно так, что значение μ меняется по длине, при этом

$$\mu \sqrt{P_{cm}} = const = \frac{L_k}{\sigma} \sqrt{\frac{\rho}{2}}; \quad (6)$$

$$\mu \sqrt{P_{cm}} = const = \frac{L_{ut}}{\delta} \sqrt{\frac{\rho}{2}}. \quad (7)$$

Четвертый способ позволяет обеспечить приблизительно равномерный попутный расход. Воздуховод постоянного размера имеет такое большое поперечное сечение, что скорость, динамическое давление и, соответственно, потери давления по длине пренебрежимо малы. Поэтому воздухопровод является по сути камерой постоянного статического давления и все отверстия находятся в одинаковом положении. Приток тем равномернее, чем больше сечение воздуховода и меньше площадь (ширина) отверстий. Таким образом, приблизительно равномерная раздача обеспечивается при выполнении следующих условий:

$$\sigma(\delta) = const; \mu = const; P_{cm} \approx const.$$

Последнее условие выполняется, если

$$\frac{F}{\sigma} \left(\frac{F}{\delta l} \right) \gg 1.$$

Здесь F и l – соответственно площадь поперечного сечения, m^2 , и длина воздухопровода, m .

Воздуховоды с равномерными расходами воздуха по длине устраиваются:

- переменного сечения с изменяющейся и постоянной шириной щели по длине;
- постоянного сечения со щелью постоянной и переменной ширины по длине;
- постоянного и переменного (конусного) сечений с отверстиями различной площади по длине воздухопровода [2].

Однако не всегда в этих воздухопроводах происходит равномерная раздача воздуха. Объясняется это тем, что статическое давление, как правило, не бывает одинаковым по длине. Кроме того, благодаря

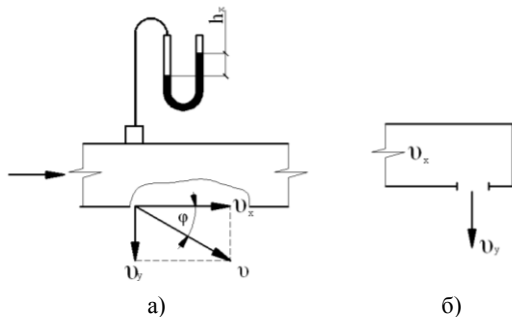


Рис. 1. Схема истечения воздуха из отверстий:
а – в первых (от вентилятора) приточных отверстиях;
б – в последних приточных отверстиях

влиянию сравнительно больших скоростей потока внутри начального участка воздухопровода из первых его отверстий воздух вытекает под небольшим углом к оси воздухопровода (рис. 1, а), настилаясь на последний, и только по мере приближения к концу воздухопровода принимает нормальное к оси положение (рис. 1, б).

Относительно легче достигается равномерное распределение расходов воздуха в конических воздухопроводах вследствие большого постоянства статических давлений, но и здесь не устраняется настильность потока, отрицательно отражающаяся на равномерности раздачи воздуха в помещении.

Значение и направление скорости выхода воздуха v определяется как равнодействующая, построенная на двух векторах скоростей, соответствующих

динамическому и статическому давлению. Скорость v_x равна скорости потока внутри воздуховода, скорость v_y вызывается статическим давлением внутри воздуховода, значение этого давления определяется по манометру h_x (см. рис. 1, а). Угол φ , составляемый вытекающим потоком с продольной осью воздуховода, обуславливается соотношением скоростного и статического давлений в рассматриваемом сечении и в общем случае является переменным по длине воздуховода.

Так как истечение из отверстия происходит не только за счет статического, но и за счет динамического давления, скорость имеет и продольную, и поперечную компоненты. Чем ближе к отверстию, тем больше модуль скорости и его поперечная компонента. Статическое давление, наоборот, минимально вблизи отверстия и возрастает по направлению к противоположной стенке.

В результате мы имеем картину истечения, показанную на рисунке 2, а. В начале воздухоораспределителя продольная скорость достаточно велика и истечение происходит почти параллельно образующей воздуховода.

Скорость v_y , м/с, определяется главным образом избыточным статическим давлением внутри воздуховода [3]:

$$v_y = \mu \sqrt{2h_x / \rho}, \quad (8)$$

где $\mu = (0,5...0,7)$ – коэффициент расхода воздуха; h_x – замеренное статическое давление, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³.

По ходу воздухоораспределителя динамическое давление уменьшается, так что в конце истечение происходит только за счет статического давления практически перпендикулярно образующей воздуховода. Столь неорганизованный характер истечения не позволяет добиться равномерности попутного расхода. Чтобы исключить влияние динамической составляющей давления, отверстия снабжают насадками, в которых гасится продольная компонента скорости и истечение происходит перпендикулярно образующей воздуховода (рис. 2, б).

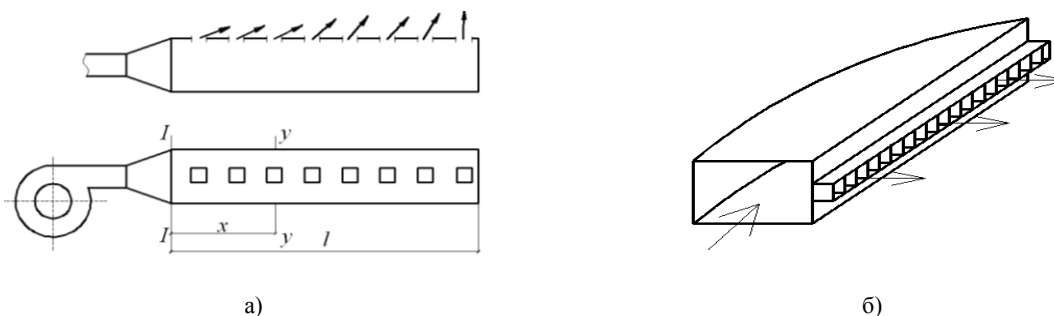


Рис. 2. Направление потоков при истечении воздуха из воздуховода:
а – неорганизованное через отверстия; б – организованное через щель с насадкой

При анализе щелевых воздухоораспределителей постоянного сечения принимаются следующие допущения [3]:

- истечение происходит только под действием статического давления;
- коэффициент расхода по всей длине щели постоянен;
- поля скоростей в поперечных сечениях воздухоораспределителя равномерны;
- коэффициент сопротивления трения по длине воздуховода постоянен;
- местные потери давления на проход мимо приточных щелей не учитываются.

Эти предположения значительно упрощают анализ. С другой стороны, ясно, что неучет реальных обстоятельств течений делает решение весьма приближенным.

Полученные аналитические зависимости для расчета воздуховодов постоянного статического давления и принятые допущения требуют экспериментальной проверки. В задачу экспериментальных исследований входило следующее:

- исследование равномерности раздачи воздуха воздухоораспределителем конусообразной формы со щелью и определение изменения скорости истечения $v_{вых}$ для исследуемого воздухоораспределителя;
- исследование статического давления и осевой скорости по длине воздухоораспределителя конусообразной формы;
- исследование влияния установки поперечных направляющих насадок в продольной щели на равномерность раздачи воздуха по длине воздуховода.

В соответствии с поставленными задачами и принятой методикой исследования был создан аэродинамический стенд для исследования режима работы конусообразного воздухоораспределителя длиной 2420 мм с продольной щелью постоянной ширины 25 мм (рис. 3).

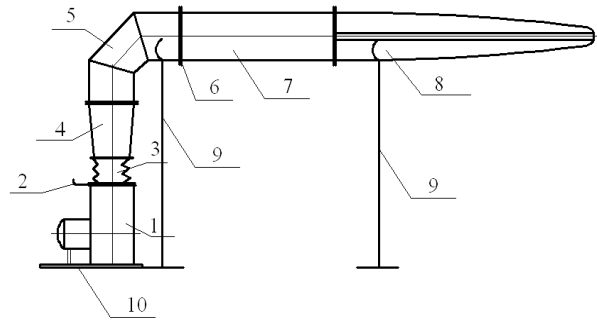


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

- 1 – вентилятор с вентилятором радиальным ВР № 2,5; 2 – шибер;
 3 – гибкая вставка; 4 – переход с сечения 180×180 мм на Ø 180 мм;
 5 – отвод под углом 90°; 6 – спрямляющая решетка; 7 – входной участок Ø 180 мм;
 8 – конусообразный воздухоораспределитель со щелью; 9 – опора; 10 – виброоснование

Экспериментальные исследования проводились в два этапа: на первом этапе было исследовано неорганизованное истечение воздуха через конусообразный воздухоораспределитель со щелью постоянной величины при различных расходах воздуха; на втором – организованное истечение через конусообразный воздухоораспределитель с установкой в щели спрямляющих решеток с шагом пластин 13, 25, 50 мм для равномерного распределения скоростей как по величине, так и по направлению.

Для определения равномерности раздачи воздуха экспериментальный воздухоораспределитель условно разделили на ряд контрольных сечений. Расход воздуха в каждом сечении определялся путем измерения скоростных полей по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Для этой цели в круглом воздуховоде сечения разбивались на четыре равновеликих по площади кольца (диаметры сечений не превышали 200 мм). Каждое кольцо имело 4 точки измерения скоростей, расположенных на пересечении окружности, разделяющей площадь кольца на две равновеликих части, с осями симметрии площади сечения воздуховода. Расстояние точек замера от центра воздуховода r_n определялось по формуле:

$$r_n = R_o \sqrt{\frac{2n-1}{2m}}, \quad (9)$$

где R_o – радиус круглого воздуховода, мм; n – порядковый номер отсчета от центра воздуховода; m – число колец, на которое разбито сечение воздуховода.

Усредненные значения полных и статических давлений, замеренных в контрольных сечениях, определялись как средние арифметические из значений по каждой из точек замера. Среднее значение динамического давления, замеренного в данном сечении воздуховода, определялось по формуле:

$$\bar{P}_o = \sum_1^k \left(\frac{\sqrt{P_o}}{k} \right)^2, \quad (10)$$

где k – число точек замеров.

По среднему динамическому давлению находилась средняя по сечению скорость

$$v_{cp} = \sqrt{\frac{2\bar{P}_o}{\rho}}. \quad (11)$$

Расход воздуха в воздуховоде, м³/ч, определялся по формуле:

$$L = 3600 v_{cp} F, \quad (12)$$

где F – площадь сечения воздуховода, м².

При исследовании воздухоораспределителя с направляющими решетками для установления условий раздачи воздуха по длине, кроме прохождения скоростных полей в конкретных сечениях, замерялась скорость воздуха на расстоянии 5 мм от выходной кромки пластин с помощью анемометра Testo 425.

Для определения раздачи воздуха через продольную щель опытный воздухоораспределитель был условно разделен на 6 расчетных участков и определена относительная длина \bar{x} каждого из участков по формуле:

$$\bar{x} = x/l, \quad (13)$$

где x – длина расчетного участка, м; l – длина конусообразного воздухоораспределителя, м.

Расход воздуха на каждом участке ΔL определялся как разность расходов воздуха в контрольных сечениях воздуховода в начале и конце участка.

Для определения средней величины статического давления в контрольных сечениях производилось несколько измерений по всему сечению с помощью микроманометра и пневмометрической трубки, а затем определялось среднее арифметическое значение.

Для устранения настильности потока применялись направляющие решетки, представляющие собой равномерно расположенные поперечные пластины. Поперечные пластины располагались таким образом, чтобы не суживать живое поперечное сечение воздуховода с шагом пластин 13, 25, 50 мм.

Экспериментальные исследования показали следующее: статическое давление по длине конусообразного воздухоораспределителя со щелью постоянной ширины и с установкой в щели направляющих решеток остается постоянным (рис. 4), минимальное статическое давление будет при установке в продольную щель направляющих решеток с шагом пластин 13 мм; скорость воздуха по оси конусообразного воздухоораспределителя со щелью постоянной ширины и с установкой в щели направляющих решеток падает незначительно по всей длине (рис. 5).

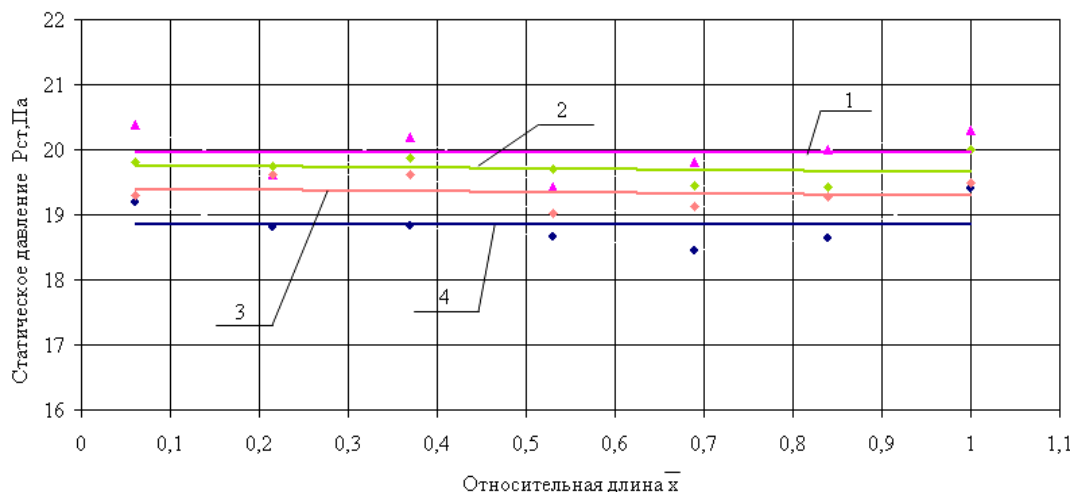


Рис. 4. Зависимость статического давления от относительной длины воздухоораспределителя.

Вид щели воздухоораспределителя:

- 1 – без направляющих решеток; 2 – с направляющими решетками с шагом пластин 50 мм;
3 – с направляющими решетками с шагом пластин 25 мм; 4 – с направляющими решетками с шагом пластин 13 мм

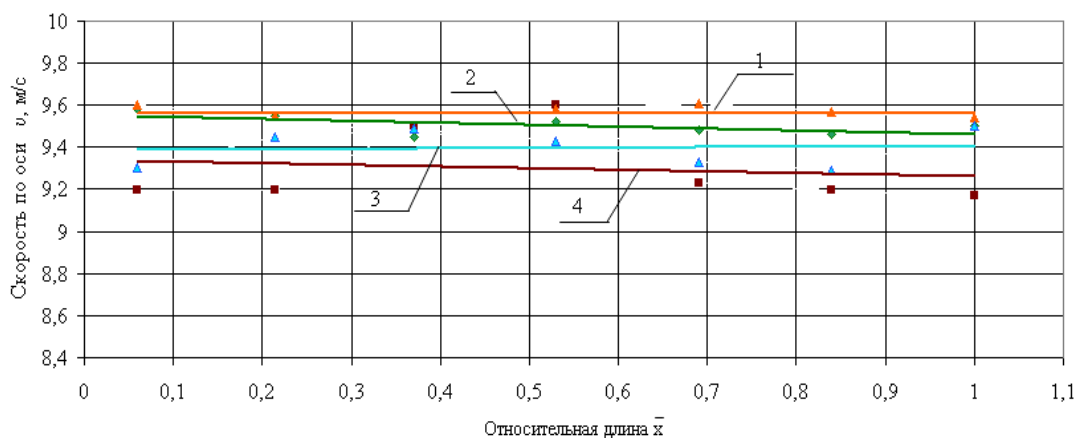


Рис. 5. Зависимость осевой скорости от относительной длины воздухоораспределителя.

Вид щели воздухоораспределителя:

- 1 – без направляющих решеток; 2 – с направляющими решетками с шагом пластин 50 мм;
3 – с направляющими решетками с шагом пластин 25 мм; 4 – с направляющими решетками с шагом пластин 13 мм

Исследования показали, что изменение количества воздуха, подаваемого в воздухоораспределитель, практически не влияет на равномерность раздачи по длине.

Установка решеток с поперечными направляющими пластинами не нарушает равномерность раздачи. При этом разделение потока поперечными пластинами способствует лучшему заполнению образовавшихся с помощью решеток плоских каналов, что приводит к устранению настиления воздушного потока на поверхность воздухоораспределителя.

Как показали результаты испытаний конусообразного воздухоораспределителя со щелью, угол φ , при котором происходит отделение потока к оси воздухоораспределителя, сохраняет практически постоянное значение по всей длине воздуховода и колеблется в пределах $36...38^\circ$ (рис. 6). При установке в щель конусообразного воздухоораспределителя направляющих насадок с шагом пластин 50 мм угол φ составляет 80° , а при установке направляющих насадок с шагом пластин 13 и 25 мм, угол φ составляет 90° . Следовательно, для равномерного распределения воздуха по длине воздуховода рационально использовать решетки с шагом пластин 13 и 25 мм.

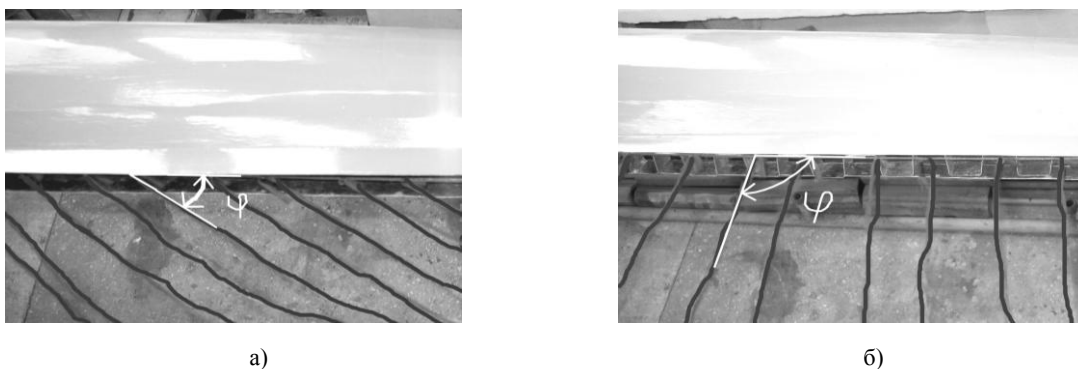


Рис. 6. Выход воздуха из воздухоораспределителя (вид сверху):
а – при свободном истечении из продольной щели; б – через направляющие решетки

Выводы:

- статическое давление внутри воздуховода равномерной раздачи конусообразной формы как со щелью постоянной ширины, так и с направляющими решетками различной формы остается постоянным по длине;
- скорость воздуха по оси конусообразного воздухоораспределителя и скорость выхода воздуха падает незначительно по всей его длине;
- установка направляющих решеток с шагом пластин 25 мм является наиболее рациональной, так как приводит к снижению статического давления в воздуховоде, скорости выхода воздуха, устранению настиления потока на поверхность воздухоораспределителя и требует минимального расхода металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Посохин, В.Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Посохин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2008. – 209 с.
2. Дроздов, В.Ф. Отопление и вентиляция: учеб. пособие для строит. вузов и фак. по спец. «Теплогазоснабжение и вентиляция»: в 2-х ч. / В.Ф. Дроздов. – М.: Высш. шк., 1984. – Ч. 2: Вентиляция. – 263 с.
3. Талиев, В.Н. Аэродинамика вентиляции: учеб. пособие для вузов / В.Н. Талиев. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.

Поступила 26.05.2009