

УДК 697.922-037:533.6.011

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕКСТИЛЬНЫХ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ

**Т.И. Королёва, С.И. Пивоварова**

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,

г. Новополоцк, Республика Беларусь

e-mail: t.i.koroleva@psu.by, s.i.pivovarova@psu.by

*Для обеспечения и поддержания необходимых параметров микроклимата в рабочей зоне помещения необходимо правильно организовать воздухообмен в помещении, и в первую очередь, выбрать и рассчитать воздухораспределительные устройства, в том числе текстильные воздухопроводы. Исследованы аэродинамические характеристики текстильных воздухораспределителей, что является важным при проектировании вентиляционных систем для выбора способа раздачи воздуха, скорости струи, конструкции воздухораспределителя, места его установки. Это позволит выполнить правильный расчет параметров воздуха, подаваемого в помещение с помощью выбранного воздухораспределителя.*

**Ключевые слова:** системы вентиляции, измерения аэродинамические, текстильные воздухопроводы, воздухораспределители, перфорация, воздушная струя, аэродинамические характеристики, аэродинамические показатели, динамическое давление, статическое давление, полное давление, измерение скорости воздуха.

## RESEARCH OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF TEXTILE AIR DISTRIBUTORS

**T. Koroleva, S. Pivovarova**

Euphrosyne of Polotsk State University, Novopolotsk, Republic of Belarus

e-mail: t.i.koroleva@psu.by, s.i.pivovarova@psu.by

*To ensure and maintain the required microclimate parameters in the work area, it is necessary to properly organize air exchange within the space, primarily by selecting and calculating air distribution devices, including fabric air ducts. The aerodynamic characteristics of fabric air diffusers have been studied, which is important when designing ventilation systems for selecting the air distribution method, air flow rate, air diffuser design, and installation location. This will allow for the correct calculation of the air parameters supplied to the room by the selected air diffuser.*

**Keywords:** ventilation systems, aerodynamic measurements, textile ducts, air distributors, perforation, air jet, aerodynamic characteristics, aerodynamic indicators, dynamic pressure, static pressure, total pressure, air velocity measurement.

**Введение.** Для поддержания необходимых параметров микроклимата в помещении в рабочей зоне необходимо выполнить ряд требований [1], которые особенно важны для новых материалов, используемых для изготовления воздухопроводов, например для текстильных воздухопроводов. Так же, правильный расчет параметров воздуха, подаваемого в помещение с помощью выбранного текстильного воздухораспределителя, для различных зданий и сооружений позволяет избежать образования застойных зон, в которых происходит отклонение значения температуры от заданного и повышение концентрации вредных веществ.

Следовательно, особое внимание при проектировании вентиляционных систем должно уделяться выбору способа раздачи воздуха, конструкции воздухораспределителя, месту его установки. Важно правильно организовать воздухообмен в помещениях зданий и сооружений, для этого необходимо правильно выбрать и рассчитать воздухораспределительные устройства текстильных воздухопроводов, вид перфорации, скорость воздушной струи, конструкцию воздухораспределителя, место его установки, способы воздухораспределения системами вентиляции с использованием текстильных воздухораспределителей из разных текстильных материалов [2]. Кроме того, необходимо производить правильный расчет параметров воздуха, замерять аэродинамические характеристики воздушных потоков воздухопроводов, подаваемых в помещение с помощью выбранного воздухораспределителя. Применение на практике новых типов воздухораспределителей, к числу которых относятся текстильные воздухораспределительные устройства, позволит подать приточный воздух в рабочую зону помещения непосредственно вблизи расположения человека.

Для исследования аэродинамических характеристик [3] в экспериментальной лаборатории на базе ООО «БелВентаТекс», расположенной в д. Гвоздово Полоцкого района, при разных особах подачи приточного воздуха были использованы текстильные воздухораспределители из разных видов ткани и принят вид перфорации [2]. Выполнено экспериментальное определение основных аэродинамических показателей: скорости, динамического, статического, полного давлений воздушного потока внутри воздухораспределителя и скорости воздушного потока на выходе из отверстий воздухораспределителя. Исследование основных характеристик текстильных воздухораспределителей и их сравнение со стальными воздухораспределителями показало, что текстильные воздухораспределители можно рассчитывать по методике стальных перфорированных воздухораспределителей [4; 5].

В работе были выполнены исследования аэродинамических характеристики текстильных воздухораспределителей с перфорацией [1; 4; 6]:

1. Исследование распределения динамического, статического и полного давлений по длине текстильного воздухораспределителя с перфорацией.
  2. Исследование распределения скоростей воздушного потока по длине внутри сечения текстильного воздухораспределителя с перфорацией.
  3. Исследование скорости истечения воздушного потока через перфорацию.
  4. Определение скорости воздушного потока на границе рабочей зоны помещения.
- Измерение скорости воздуха производилось с учетом требований [6; 7].

Скорость воздуха измеряется в количестве точек, достаточном для нахождения определенной изовелы с погрешностью. Испытания следует начинать после достижения стационарного режима.

Измерение средней скорости воздуха выполняется, как минимум, на четырех различных расстояниях от воздухораспределителя, через каждые 300 мм на разных высотах, чтобы определить ее максимальное значение.

Статическое давление измеряется в соответствии с [3]. Статическое давление измеряют по поперечному сечению по двум ортогональным диаметрам, чтобы достичь максимального и минимального значений. Давление воздуха в выбранной точке не должно отличаться более чем на 10% от максимального и минимального значений в границах плоскости измерения:

- 1) динамическое давление, Па, рассчитывают по формуле, в соответствии с [3]

$$p_d = \frac{\rho \cdot v_m^2}{2}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$v_m$  – средняя скорость воздуха, полученная делением заданного значения расхода воздуха на площадь поперечного сечения воздухопровода, м/с.

2) полное давление, Па, рассчитывают по формуле

$$p_t = p_s + p_d \cdot \quad (2)$$

Значение полного давления корректируется с учетом плотности воздуха  $\rho$  при стандартных условиях равной 1,2 кг/м<sup>3</sup>, по формуле:

$$p_{t1,2} = p_t \cdot \frac{1,2}{\rho}, \quad (3)$$

где  $p_d$  – динамическое давление, Па;

$p_s$  – статическое давление, Па.

Погрешность измерений допускается, в соответствии с [6].

Измерительные приборы должны иметь предельную погрешность при определении следующих величин:

- расход воздуха – менее  $\pm 3\%$  от измеренного расхода;
- статическое давление – менее  $\pm 5\%$  или  $\pm 1$  Па;
- скорость воздуха – менее  $\pm 0,05$  м/с;
- температура воздуха – менее  $\pm 0,25$  К.

Если идентифицировать основное направление потока воздуха невозможно, то скорость необходимо измерять на горизонтальной линии, перпендикулярной вероятному основному направлению потока воздушной струи, и на расстоянии от воздухораспределительного устройства, где скорость воздуха варьируется в пределах от 1,0 до 1,5 м/с.

Линия от середины воздухораспределительного устройства с перфорацией до точки максимума скорости воздуха из воздухораспределителя является основным направлением потока воздуха.

Такие характеристики струи воздуха, как дальность и расширение, нижняя граница струи, должны измеряться в основном направлении потока воздуха. В начале, следует провести быстрые замеры скорости воздуха, чтобы определить расстояние от воздухораспределительного устройства, где скорость воздуха приблизительно 0,5 м/с. Данная точка должна находиться от противоположной стены помещения на расстоянии не менее 0,5 или 1,0 м в зависимости от класса воздухораспределительного устройства.

Измерение скорости воздуха следует выполнять, как минимум, в восьми точках, которые удалены друг от друга на равное расстояние. Первая точка для замеров должна располагаться в 300 мм от воздухораспределительного устройства, а последняя располагается на расстоянии, чтобы скорость воздуха варьировалась от 0,4 до 0,5 м/с (рисунок 1).

Во время измерений были сделаны замеры следующих показателей для текстильных воздухораспределителей с перфорацией:

- скорость воздушного потока внутри воздухораспределителя  $v$ , м/с;
- динамическое давление  $P_d$ , Па;
- статическое давление  $P_{ст}$ , Па;
- полное давление  $P_n$ , Па;
- скорость воздушного потока  $v_v$ , м/с, на выходе из отверстий перфорации.



Рисунок 1. – Распределение точек замеров при определении дальности, верхней и нижней границ струи воздуха

При использовании методики испытания текстильных воздухораспределителей с перфорацией размещение отверстий выполнялось по схеме, представленной на рисунке 2.

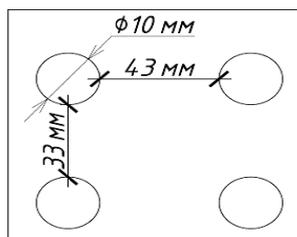


Рисунок 2. – Схема размещения отверстий при перфорации

Для измерения всех аэродинамических показателей внутри текстильного воздуховода экспериментальные воздухораспределители были разделены на ряд условных сечений, представленных на рисунке 3. В сечениях для измерения в текстильном воздухораспределителе было выбрано необходимое количество точек для измерения показателей давления, скорости и расстояния между ними.

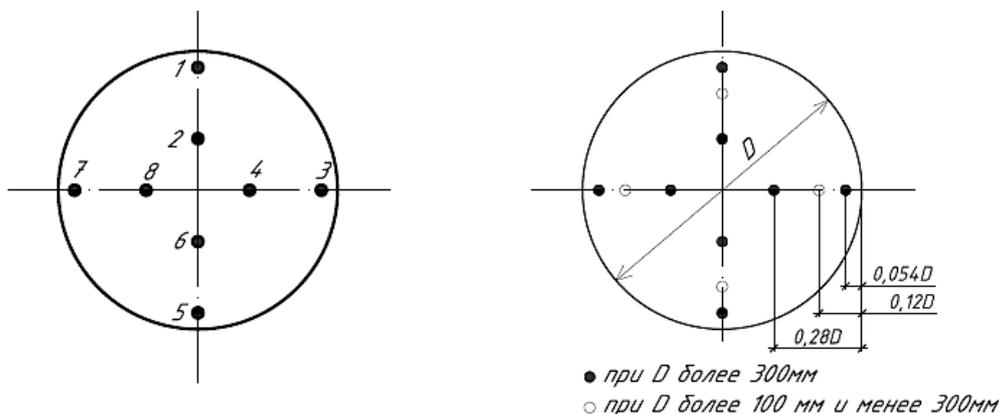


Рисунок 3. – Расположение точек в сечении текстильных воздухораспределителей для измерения аэродинамических показателей [6]

Измерения проводились после достижения стационарного режима в системе вентиляции. В точках измерений производилось по три измерения каждого параметра. После замера аэродинамических показателей внутри текстильного воздухораспределителя, замерялись показатели истечения воздуха из перфорации текстильного воздухораспределителя [5].

Выбирались точки для измерения скорости на расстоянии 0,1 м, 0,5 м, 1 м, 1,5 м, 1,7 м от перфорированных текстильных воздухораспределителей.

Измерения аэродинамических параметров воздуха были выполнены с использованием следующих приборов:

1. Газоанализатор Testo 335 с трубкой Пито, для измерения скорости воздушного потока внутри воздухораспределителя  $v$ , м/с, динамического давления  $P_d$ , Па, статического давления  $P_{ст}$ , Па, полного давления  $P_n$ , Па, рисунок 4.



**Рисунок 4. – Газоанализатор Testo 335 с трубкой Пито**

2. Термоанемометр МЕГЕОН 11005 с выносным датчиком, для измерения скорости истечения воздуха  $v_v$ , м/с, на выходе из отверстий перфорации, погрешность составила (+0,07) м/с, а общая ошибка при определении скорости истечения воздуха составила 2,1%.

Ошибка при измерении скорости воздуха в воздухораспределителе с помощью газоанализатора Testo 335 при погрешности измерений (+ 0,03) м/с составила

$$\sigma_0 = \frac{\Delta(\Delta p')}{\Delta p} = 0,74\%. \quad (4)$$

При определении давлений газоанализатором Testo 335 точность измерений составила (+0,5) Па. Ошибка при определении давлений газоанализатором Testo 335 при погрешности измерений (+ 0,5) Па составила 1,5%.

Испытания проведены на экспериментальной установке (рисунок 5), представляющей систему из текстильных воздухораспределителей с перфорацией (рисунок 2), и осевым вентилятором с частотным преобразователем.

Исследовались два образца № 1 и № 3 текстильных воздухораспределителей диаметром 500 мм длиной 20 м и 3 м. Виды перфорации экспериментальных образцов представлены в таблице 1.

Система текстильных воздухораспределителей делилась на равные участки (рисунок 6), в сечении которых производились замеры скорости воздушного потока внутри воздухораспределителя  $v$ , м/с, динамического давления  $P_d$ , Па, статического давления  $P_{ст}$ , Па, полного давления  $P_n$ , Па, и скорости воздушного потока  $v_v$ , м/с, на выходе из отверстий перфорации. Измерения названных параметров проводились в каждой точке по 3 раза.



Рисунок 5. – Экспериментальная установка с перфорацией

Таблица 1. – Виды перфорации экспериментальных образцов

№ п/п	Образец	Образец № 1	Образец № 3
1	Вид перфорации	Перфорация $\varnothing 10$ мм	Перфорация $\varnothing 10$ мм
2	Направление перфорации на поверхности воздухораспределителя		
3	Вид экспериментального образца текстильного воздухораспределителя		

Рассчитывалось расстояние от текстильного воздуховода до верха рабочей зоны, м:

$$x = h_{\text{пом}} - (d_B + 0,1 \dots 0,3) - h_{p,z}, \quad (5)$$

где  $h_{\text{пом}}$  – высота вентилируемого помещения, м;

$d_B$  – диаметр воздухораспределителя, м;

$h_{p,z}$  – высота рабочей зоны, м.

Максимальная скорость движения воздуха при подаче через перфорированные воздухораспределители определялась по следующей формуле:

$$v_{\text{max}} = 1,25 \cdot v_B \sqrt{K_{ж.с}} \cdot m \cdot \sqrt{\frac{d_B}{x}} \cdot K_c \cdot K_H \cdot K_{in}, \quad (6)$$

где  $v_B$  – скорость приточного воздуха на выходе из воздуховода, м/с;

$K_{ж.с}$  – коэффициент живого сечения;

$m$  – аэродинамический коэффициент; для перфорированных воздуховодов круглого сечения  $m = 0,5$ ;

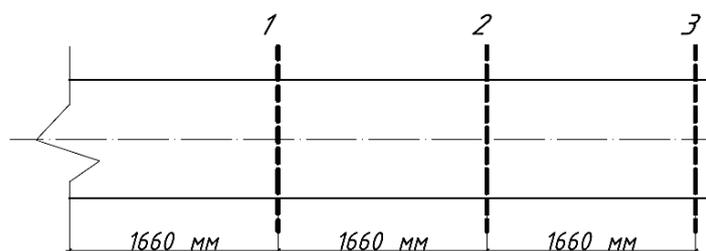
$d_B$  – диаметр воздухораспределителя, м;

$x$  – расстояние от поверхности воздуховода до верха рабочей зоны, м;

$K_c$  – коэффициент стеснения;

$K_H$  – коэффициент неизотермичности;

$K_{in}$  – коэффициент взаимодействия.



**Рисунок 6. – Схема расположения выбранных сечений для измерения основных аэродинамических показателей для перфорированного воздухораспределителя**

Испытания текстильных воздухораспределителей с перфорацией проводились при установившемся стационарном режиме работы.

Результаты испытаний были обработаны и рассчитаны скорости воздушного потока на границе рабочей зоны, где рассматривались варианты высоты рабочей зоны 1,5 м и 2 м. Расчёт текстильных воздухораспределителей с перфорацией производился в соответствии с методикой [8] и представлен в виде таблицы 2.

**Таблица 2. – Расчёт скорости воздушного потока при перфорации на границе рабочей зоны**

Исследуемые параметры	Образец № 1		Образец № 3	
$h_{p.з}$ , м	1,5 м	2 м	1,5 м	2 м
$v_B$ , м/с	1,3		1,6	
$x$ , м (формула 5)	3,48		2–3	
$v_{max}$ , м/с (формула 6)	0,155–0,19		0,159–0,195	
$h_{пом}$ , м	3–3,5	3,5–4	4–5	4,5–5,5

*Примечание:*  $h_{p.з}$  – высота рабочей зоны, м;  $v_B$  – скорость приточного воздуха на выходе из воздуховода, м/с;  $x$  – расстояние от поверхности воздуховода до верха рабочей зоны, м;  $v_{max}$  – максимальная скорость движения воздуха при подаче через перфорированный воздуховод на расстоянии  $x$ , м/с;  $h_{пом}$  – высота вентилируемого помещения, м.

**Заключение.** В ходе экспериментальных исследований с последующими расчетами были построены эпюры скоростей воздуха внутри воздуховода, графики скорости воздуха на расстоянии от воздухораспределителя, внутри воздухораспределителя и на выходе из отверстий перфорации, так же измерены давления динамическое, статическое и полное.

Результаты испытания текстильных воздухораспределителей длиной 3 м и 20 м, и диаметром  $d_B = 500$  мм с разными видами перфорации позволили сделать выводы:

1. Необходимо снизить расход воздуха при длине воздухораспределителя менее 3 м или применять данный вид перфорации на участках длиной более 3 м, что показали испытания образца № 1, длиной 3 м. Потому, что статическое давление  $P_{ст}$  внутри воздухораспределителя распределяется достаточно равномерно и составило в среднем  $P_{ст} = 86$  Па, а дина-

мическое давление  $P_d$  к концу воздухораспределителя стремится к нулю. Это характерно для участков длиной менее 3 м, и большой скорости воздушного потока 1,4 м/с, в результате чего поток воздуха не успевал весь пройти через перфорацию и возвращался обратно. Это явление привело к небольшому увеличению скорости истечения воздуха через перфорацию в последнем сечении. Скорость истечения воздуха из перфорации составила в среднем 1,3 м/с и достаточно быстро затухала, пройдя определенное расстояние от воздуховода и на расстоянии 1,5 м составляла менее 0,5 м/с.

2. Перфорацию лучше использовать на участках длиной более 3 м, как показали испытания образца № 3 длиной 20 м, чтобы достичь более равномерного распределения воздуха и более равномерное распределение статического давления  $P_{ст}$  внутри воздухораспределителя, которое составляло в среднем  $P_{ст} = 84$  Па. В этом испытании динамическое давление  $P_d$  к концу воздухораспределителя стремится к нулю, как и в первом эксперименте образца № 1. В данном экспериментальном образце № 3 отсутствовало явление обратного возвращения воздушного потока, при средней скорости воздуха внутри воздуховода в контрольном сечении 1,2 м/с при расходе 3175,2 м<sup>3</sup>/ч.

3. Данный вид перфорации позволяет использовать текстильные воздухораспределители на большом расстоянии от рабочей зоны, так как скорость истечения воздуха из перфорации в среднем 1,6 м/с и достаточно быстро затухает пройдя некоторое расстояние от воздуховода, а на расстоянии 1,7 м составляла менее 0,5 м/с.

4. Изменение скорости воздуха по длине текстильного воздухораспределителя не превышает 25–30%, что показали построенные эпюры скоростей, а это способствует равномерному распределению воздуха в помещении.

5. Составлены рекомендации по использованию текстильных воздухораспределителей в зависимости от их типа, схемы воздухораспределения, высоты расположения по отношению к рабочей зоне в помещении для гражданских и промышленных зданий [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гримитлин, М.И. Распределение воздуха в помещениях. / М.И. Гримитлин. – Санкт-Петербург: Изд-во «АВОК Северо-Запад», 2004. – 320 с.
2. Каталог Текстильные воздухораспределители БелВента 2019 [Электронный ресурс]: Белвента – Текстильные воздуховоды.
3. Талиев, В.Н. Аэродинамика вентиляции: учебное пособие для ВУЗов / В.Н. Талиев. – Москва: Изд-во Стройиздат, 1979. – 295 с.
4. Пшеничнюк, В.А. Преимущества использования текстильных воздухопроводов для обеспечения микроклимата помещений / Т.И. Королева, С.В. Ланкович, В.А. Пшеничнюк // Инновационные технологии в промышленности: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, г. Стерлитамак, 16 декабря 2016 г.: в 2 т. / Уфимский государственный нефтяной технический университет; редкол. В.В. Пряничникова [и др.]. – Стерлитамак, 2016. – Т.2 – С. 216-216.
5. Рымаров, А.Г. Исследование сопротивления микроперфорированного текстильного воздуховода / А.Г. Рымаров, В.В. Агафонова, В.В. Смирнов // Естественные и технические науки. – 2015. – №6. – С. 553–555.
6. Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства. Аэродинамические испытания и оценка применения для вытесняющей вентиляции = Вентыляцыя будынкаў. Паветраразмеркавальныя прылады. Аэрадынамічныя выпрабаванні і ацэнка прымянення для выцясначаючай вентыляцыі: ГОСТ 32549-2013 (EN 12239:2001). Введ. 03.01.2006. – Минск: Госстандарт, 2016. – 12 с.
7. СП 4.02.07-2024. Системы вентиляции и кондиционирования воздуха зданий и сооружений. Контроль качества работ. Взамен СТБ 2021-2009, СТБ 2020-2009 (раздел 8): введен 14.10.2024. Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2024. – 29 с.
8. Малова, Н.Д. Рекомендации по проектированию для предприятий пищевой промышленности / Н.Д. Малова. – Москва: Изд-во ТермоКул, 2005. – 304 с.