

УДК 681.536.6 : 631.23

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ  
В СИСТЕМЕ ВОЗДУШНОГО ОТОПЛЕНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ  
ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ\***

**COOLANT DISTRIBUTION IN THE SYSTEM  
OF INDUSTRIAL AIR HEATING AND VENTILATION**

*Н.В. КИСЕЛЁВ, В.М. КАРАВАЙКОВ*  
*N.V. KISELEV, V.M. KARAVAYKOV*

(Костромской государственный технологический университет)  
(Kostroma State Technological University)

E-mail: krice2010@yandex.ru

*В статье рассмотрены вопросы обеспечения равномерного распределения теплоносителя в системах воздушного отопления и вентиляции при использовании текстильных воздуховодов. Определен закон изменения коэффициента сопротивления перфорации по длине воздуховода, обеспечивающий равномерную раздачу воздуха.*

---

\* Работа выполняется при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОНТРАКТ № 14.740.11.1373.

*The questions of providing uniform coolant distribution in the systems of air heating and ventilation using textile airlines have been considered in the article. The law of changing perforation resistance factor along the airline, providing uniform air distribution, has been defined.*

**Ключевые слова:** теплоноситель, воздушное отопление, вентиляция, равномерная раздача воздуха.

**Keywords:** a coolant, air heating, ventilation, uniform air distribution.

Оптимальным решением для системы отопления промышленных предприятий является система воздушного отопления, рекомендуемая СНиП 41-01-2003 [1], которая может быть совмещена с системой приточной вентиляции.

В последнее время для систем воздушного отопления и вентиляции вместо традиционных воздуховодов из оцинкованного железа активно применяются текстильные воздуховоды (textile ducts, air socks), которые позволяют уменьшить затраты на установку на 50...70% [2]. Изготовленные из синтетических нитей, они обладают исключительной легкостью, на них отсутствует конденсация в системах охлаждения, они легко снимаются для очистки (путем стирки), не подвержены коррозии. Для раздачи воздуха в помещении выпускаются как сопловые текстильные воздуховоды, имеющие один или несколько рядов сопел, распределенных по длине рукава, так и мембранные, в которых подача воздуха производится за счет фильтрации

через ткань рукава [2]. Несомненные преимущества текстильные воздуховоды имеют в системах воздушного отопления и вентиляции теплиц, когда требуется равномерная раздача воздуха по длине воздуховода длиной 70...100 м [3].

Фирма CONVIRON (Канада) предлагает текстильные воздуховоды для систем климат-контроля теплиц, включая возможность отопления, воздушного и испарительного охлаждения и увлажнения воздуха теплицы за счет подачи взвешенных капель влаги (тумана) [3]. Активно предлагает на рынке аналогичные системы голландская фирма ATS b.v., специализирующаяся на инженерном оборудовании тепличных комплексов [4].

Для правильного проектирования и применения перспективных текстильных воздуховодов теоретически рассмотрим процесс движения воздуха в нем.

Используем общее уравнение движения вязкой среды вдоль канала переменного сечения с непрерывной раздачей по длине [5]:

$$Q'' \left( \frac{a}{\rho} - \frac{\xi}{4\pi S} Q' \operatorname{sign} Q \right) - \xi' Q'^2 \frac{\operatorname{sign} Q}{8\pi S} + Q' \left( \frac{a'}{\rho} - \frac{2Q}{S^2} \right) + \frac{Q^2}{S^3} S' - \frac{\lambda}{8R_r} \frac{Q^2}{S^2} \operatorname{sign} Q + g \operatorname{sign} g = 0. \quad (1)$$

Граничные условия имеют вид:

$$Q(0) = Q_0, \quad Q(h) = 0, \quad (2)$$

где  $Q_0$  – расход среды на входе;  $Q$  – транзитный расход среды;  $S$  – площадь проходного сечения;  $R_r$  – гидравлический радиус проходного сечения;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления проходного сечения;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\operatorname{sign} g$  – знаковая функция, учитывающая разность гидростатического дав-

ления между внутренними полостями и окружающим объемом (при горизонтальном расположении канала, а также при движении воздуха равна 0);  $\operatorname{sign} 0$  – знаковая функция, при нагнетании среды равна 1, при отсосе –1;  $\rho$  – плотность среды;  $a$  – коэффициент сопротивления,  $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ , представляющий отношение избыточного статического давления в потоке к путевому расходу среды на единицу длины воздуховода, является характеристикой текстильного материала и учитывается для мембранных текстильных воздуховодов;  $\xi$

– коэффициент сопротивления перфорации; учитывается в случае, когда раздающий воздуховод имеет перфорацию.

Коэффициент гидравлического сопротивления проходного сечения воздуховода в первом приближении можно вычислять по формуле Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}},$$

$$\text{где } \text{Re} = \frac{4R_r Q}{\nu S} \quad (3)$$

Здесь  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости среды.

Уравнение (1) с граничными условиями (2) и соотношениями (3) представляет собой одномерную математическую модель движения вязкой несжимаемой среды с непрерывной раздачей потока. В критериальной форме оно имеет вид [6]:

$$\bar{Q}'' = \frac{1}{\text{Eu}} \left( 2\bar{Q}\bar{Q}' - \frac{\bar{S}'\bar{Q}'^2}{\bar{S}^3} + \lambda k_r \frac{\bar{Q}^2}{2\bar{S}^3} \right), \quad (4)$$

где  $k_r = \frac{h}{4R_r}$  – критерий геометрического подобия;  $h$  – длина воздуховода;

$\text{Eu} = \frac{\rho_0 S^2}{\rho Q_0^2}$  – критерий Эйлера;  $\bar{Q}' = \frac{Q'h}{Q_0}$  –

безразмерный путевой расход;  $\bar{Q} = \frac{Qh}{Q_0}$  –

безразмерный транзитный расход.

При равномерной раздаче потока  $\bar{Q}'' = 0$  и из уравнения (4) следует, что для снижения неравномерности раздачи необходимо повышать число Эйлера, то есть увеличивать давление в воздуховоде, увеличивать его площадь и понижать расход.

Если в системе климат-контроля использовать сопловые текстильные воздуховоды, то за счет изменения частоты расположения сопел (или отверстий перфорации) можно обеспечить равномерное распределение воздуха.

Будем рассматривать перфорацию как местное сопротивление с коэффициентом сопротивления [6]:

$$\xi = \left( 1 + \frac{0,707}{\sqrt{1 - \frac{F_0}{F}}} \right)^2 \left( \frac{F}{F_0} - 1 \right)^2, \quad (5)$$

где  $F_0$  – площадь отверстия перфорации;  $F$  – площадь поверхности воздуховода, приходящаяся на одно отверстие.

При равномерной раздаче потока

$$Q'' = 0, \quad Q' = -\frac{Q_0}{h}, \quad Q = Q_0 \left( 1 - \frac{x}{h} \right), \quad (6)$$

где  $x$  – координата.

Положим в уравнении (1)  $a = 0$ ,  $S = \text{const} = \pi D^2/4$ , тогда с учетом (6) и (3) получим дифференциальное уравнение для  $\xi$ :

$$\xi' = \frac{64(h-x)}{D^2} \left( \frac{4\pi\nu h}{Q_0} - 1 \right). \quad (7)$$

Решением данного уравнения является функция, задающая закон изменения коэффициента сопротивления перфорации по длине воздуховода, обеспечивающего равномерную раздачу воздуха:

$$\xi = \xi_0 - \frac{64h}{d^2} \left( 1 - \frac{4\pi\nu h}{Q_0} \right) \left( x - \frac{x^2}{2h} \right). \quad (8)$$

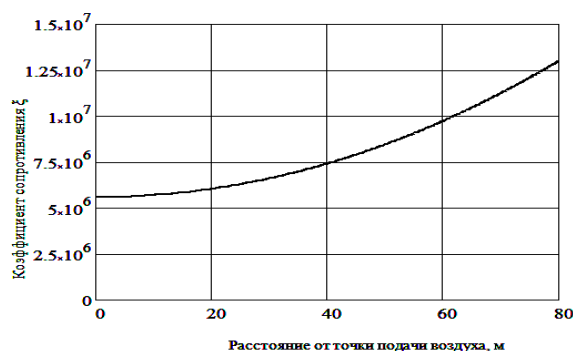


Рис. 1

Например, при  $\xi_0 = 5,614 \cdot 10^6$ , что соответствует четырем соплам диаметром 12

мм на 1 м длины воздуховода диаметром 200 мм, длине воздуховода 80 м и расходе воздуха с вязкостью  $15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , равном  $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$ , закон изменения коэффициента сопротивления перфорации по длине воздуховода для равномерной раздачи воздуха представлен на рис. 1.

При этом давление на входе в воздуховод составит 125 Па (равно наибольшему допускаемому давлению для типовых текстильных воздуховодов), а скорость истечения воздуха из первых сопел –  $8,3 \text{ м/с}$ . На дальнем конце воздуховода диаметр отверстий сопел при том же шаге должен составлять 9,6 мм. При неизменном диаметре сопел 12 мм число их на 1 м длины должно составлять 2,6. Соответствующие расчеты выполнены по формуле (5), из которой при заданном  $\xi$  находится отношение  $F_0/F$ , после чего выбираются параметры отверстий сопел или их шаг.

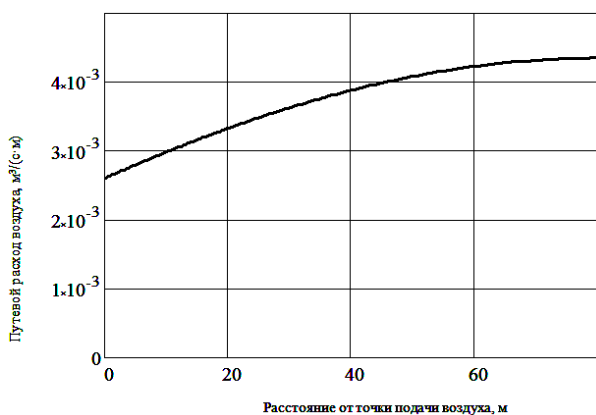


Рис. 2

Если шаг и диаметры сопел делать постоянными по длине воздуховода, распределение воздуха по его длине при тех же условиях, как показывает решение уравнения (1), выполненное в системе Mathcad, будет существенно неравномерным (рис. 2 – распределение путевого расхода по длине воздуховода). Подача воздуха на дальнем конце воздуховода будет на 65% больше, чем на ближнем. При повышении сопротивления сопел неравномерность будет снижаться, однако общее сопротивление воздуховода возрастет, что приведет к неоправданному росту энергозатрат.

Это обуславливает необходимость использования переменного шага или диаметра сопел, что также позволяет понизить среднее сопротивление перфорации и уменьшить энергозатраты на привод вентиляторов. Например, при снижении в 10 раз  $\xi_0$  до уровня  $5,614 \cdot 10^5$ , что соответствует 9 отверстиям диаметром 14 мм на 1 метр длины воздуховода, по уравнению (8) на противоположном его конце плотность расположения отверстий должна составлять 2,5 на 1 м, а при использовании постоянного шага диаметр отверстий должен быть уменьшен до 7,3 мм. Гидравлическое сопротивление воздуховода при этом также снизится на порядок и составит 12,5 Па.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрен процесс движения воздуха в текстильных воздуховодах систем вентиляции и воздушного отопления. Определен закон изменения коэффициента сопротивления перфорации по длине воздуховода, обеспечивающий равномерную раздачу воздуха.

Даны рекомендации использования переменного шага или диаметра сопел, что позволяет понизить среднее сопротивление перфорации и уменьшить энергозатраты на привод вентиляторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 41-01–2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.mkc-ltd.ru/index.asp?id=1254>
  2. Benefits of Fabric Ducts over Galvanized Steel Air Ducts. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.klima.co.th/new/en/benefits.html>
  3. CONVIRON Conditioning System [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.conviron.com/conditioning-system>.
  4. ATS Agro Technical Supplies BV [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.agro-technical.com>
  5. Киселев Н.В. Математическая модель фильтрации жидкости через столб паковок текстильного материала // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1982, № 5. С.85...88.
  6. Рабинович Е.З. Гидравлика. – М.: Недра, 1978.
- Рекомендована кафедрой технологии производства льняного волокна. Поступила 29.05.12.