

## Оптимизация воздуховодов прямоугольного поперечного сечения

*А.И. Василенко*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В статье приводится решение задачи оптимизации воздуховодов с прямоугольной поперечного сечения для систем вентиляции и кондиционирования воздуха. На основе использования методологии оптимизации воздуховодов по приведенным затратам определены оптимальные соотношения размеров сторон прямоугольного поперечного сечения воздуховода в зависимости от величины материальных затрат на устройство воздуховода и стоимостных показателей процесса его эксплуатации. Полученные оптимальные соотношения размеров сторон поперечных сечений воздуховодов носят универсальный характер и не зависят от местоположения воздуховода относительно вентилятора системы. Данные условия позволяют на стадии проектирования вентиляционной системы оценить степень оптимальности принятых решений по выбору размеров поперечных сечений воздуховодов и, при необходимости, внести соответствующие изменения в проектные решения систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Полученные условия оптимальности позволяют включить их в программы расчета воздуховодов.

**Ключевые слова:** система вентиляции, воздуховоды, технико-экономический оптимум, аэродинамический расчет, система кондиционирования воздуха, оптимальная скорость воздуха, энергосбережение, энергоэффективность, энергопотребление, инженерное оборудование зданий.

Системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (СВКВ) оказывают существенное на энергопотребление зданий [1,2] и степень их энергетической эффективности [3-5]. Совершенствование технических решений СВКВ осуществляется в различных направлениях, связанных с поиском энергоэффективных схмотехнических решений систем [6,7], снижением энергозатрат отдельными функциональными элементами СВКВ [8], а также за счет внедрения возобновляемых источников энергии [9]. В тоже время необходимо отметить, что в настоящее время имеется ряд проблем, требующих поиска решений, направленных на оптимизацию энергетических и материальных затрат на устройство и эксплуатацию систем.

Важнейшей частью вентиляционной системы являются воздуховоды, транспортирующие воздух по вентиляционной системе. Проектирование воздуховодов осуществляется путем поиска компромиссных решений,

---

учитывающих влияние двух противоположно направленных факторов. С одной стороны – уменьшение поперечных сечений воздухопроводов приводит к снижению их стоимости, однако при этом увеличивается скорость движения воздуха в воздуховоде и, как следствие – возрастает расход электроэнергии на транспортировку воздуха по системе. Очевидно, что при влиянии противоположно направленных факторов должно существовать оптимальное решение, при котором совокупные затраты на устройство воздуховода и его эксплуатацию будут минимальны. На этой принципиальной идее основан базовый метод оптимизации [10]. Однако, использование базового метода сопряжено с рядом трудностей, не позволяющих получить аналитическое решение задачи по поиску оптимального решения без принятия достаточно грубых допущений. Необходимо отметить, что особенности оптимизации воздухопроводов с прямоугольной формой поперечного сечения не позволяют использовать решения, приведенные в [10,11] и требуют поиска новых подходов к решению оптимизационных задач.

Рассмотрим задачу оптимизации технико-экономических характеристик воздуховода прямоугольного поперечного сечения, отнесенных к 1 году работы системы.

Затраты на электроэнергию,  $C_{эл}$ , руб/год, [11]:

$$C_{э} = N_{эл} \cdot c_{эл} \cdot n \quad (1)$$

где:  $c_{эл}$  - стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб/кВт·час  $N_{эл}$  – потребная мощность, кВт;  $n$  – время работы вентиляционной системы, час/год [10].

$$N_{эл} = \frac{L_{пр} \cdot \Delta P}{\eta \cdot 10^3} \quad (2)$$

где  $L_{пр}$ ,  $\Delta P$  и  $\eta$  - соответственно объемный расход воздуха  $м^3/с$ ; потери давления воздуха, Па; интегральный КПД вентилятора [11].

Объемный расход воздуха в воздуховоде является заданной величиной, так как целевая функция вентиляционной системы заключается в обеспечении подачи в помещение или удаления из него требуемого объема воздуха. Потери давления воздуха являются величиной вариативной, зависят от топологии вентиляционной сети и размеров поперечных сечений воздухопроводов.

Формула Дарси, определяющая потери давления воздуха на трение в каналах с произвольной формой поперечного сечения,  $\Delta P_{\text{тр}}$ , Па, имеет вид

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda_{\text{тр}} \frac{l \cdot \Pi}{4 \cdot F} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (3)$$

где  $\Pi$  – смоченный периметр поперечного сечения канала, м;  $F$  – площадь поперечного сечения канала,  $\text{м}^2$ ;  $l$  – длина воздуховода, м;  $w$  – скорость движения жидкости в канале, м/с;  $\lambda_{\text{тр}}$  – коэффициент гидравлического трения;  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Применительно к прямоугольной форме поперечного сечения воздуховода:

$$\Pi = 2(a + b); \quad F = a \cdot b.$$

где  $a, b$  – стороны поперечного сечения прямоугольного воздуховода, м.

С учетом последних зависимостей формула (3) применительно к воздуховоду с прямоугольной формой поперечного сечения и с учетом коэффициента местных сопротивлений,  $b_{\text{м.с.}}$ , приобретает вид:

$$\Delta P = \frac{\lambda_{\text{тр}} \cdot l \cdot b_{\text{м.с.}} \cdot \rho \cdot L_{\text{пр}}^2}{4} \frac{(a+b)}{(a \cdot b)^3}$$

где  $b_{\text{м.с.}}$  – коэффициент, учитывающий потери давления воздуха в местных сопротивлениях.

С учетом последней формулы, зависимость (1) принимает следующий вид

$$C_{\text{э}} = \frac{\lambda_{\text{тр}} \cdot l \cdot b_{\text{м.с.}} \cdot \rho \cdot L_{\text{пр}}^3 \cdot c_{\text{эл}} \cdot n}{4 \cdot \eta \cdot 10^3} \frac{(a+b)}{(a \cdot b)^3} \quad (4)$$

В последней формуле величину  $\lambda_{\text{тр}}$  в рассматриваемом диапазоне вариации размеров поперечных сечений можно принять величиной постоянной [10], а все остальные величины, кроме комплекса  $\frac{(a+b)}{(a \cdot b)^3}$ , являются величинами заданными, поэтому характер изменения величины  $C_{\text{э}}$  при вариации размеров поперечного сечения воздуховода определяется только изменением величины  $\frac{(a+b)}{(a \cdot b)^3}$ .

Годовые затраты на устройство воздуховода с прямоугольной формой поперечного сечения,  $C_{\text{м}}$ , руб./год,

$$C_{\text{м(пр)}} = 2 \cdot l \cdot a_{\text{м.с.}} \cdot c_{\text{м(пр)}} \cdot (a + b) \quad (5)$$

где  $c_{\text{м}}$ , руб/м<sup>2</sup>·год – удельные затраты на устройство воздуховода.  $a_{\text{м.с.}}$  – коэффициент учитывающий наличие фасонных деталей.

Интегральные затраты на устройство и эксплуатацию воздуховода с прямоугольной формой поперечного сечения,  $C_{\text{г}}$ , руб/г, определяются выражением

$$C_{\text{г}} = 2 \cdot l \cdot a_{\text{м.с.}} \cdot c_{\text{м(пр)}} \cdot (a + b) + \frac{\lambda_{\text{тр}} \cdot l \cdot b_{\text{м.с.}} \cdot \rho \cdot L_{\text{пр}}^3 \cdot c_{\text{эл}} \cdot n}{4 \cdot \eta \cdot 10^3} \frac{(a+b)}{(a \cdot b)^3}$$

Преобразуем последнее выражение используя  $k = \frac{a}{b}$

$$C_{\text{г}} = 2 \cdot l \cdot a_{\text{м.с.}} \cdot c_{\text{м(пр)}} \cdot b(k + 1) + \frac{\lambda_{\text{тр}} \cdot l \cdot b_{\text{м.с.}} \cdot \rho \cdot L_{\text{пр}}^3 \cdot c_{\text{эл}} \cdot n}{4 \cdot \eta \cdot 10^3} \frac{(k+1)}{k^3 \cdot b^3} \quad (6)$$

Практический интерес представляет вариант, когда размер одной из сторон поперечного сечения воздуховода задан архитектурно-конструкторскими решениями здания, например, расстоянием от подшивного

потолка до перекрытия, шириной шахты для прокладки воздухопроводов и т.п. В этом случае вариация размеров поперечного сечения воздухопровода осуществляется только за счет изменения величины другой стороны поперечного сечения. В рассматриваемом случае:  $b = const, a \geq b$ . С учетом этого последняя зависимость приводится к уравнению с одной переменной  $k$ :

$$C_r = A \cdot (k + 1) + B \cdot \frac{(k+1)}{k^2} \quad (7)$$

где

$$A = 2 \cdot l \cdot a_{м.с.(пр)} \cdot c_{м(пр)} \cdot b; \quad B = \frac{\lambda_{тр} \cdot l \cdot b_{м.с.} \cdot \rho \cdot L_{пр}^2 \cdot c_{эл} \cdot n}{4 \cdot \eta \cdot 10^3 \cdot b^3}$$

Экстремум выражения (7) достигается при

$$\frac{\partial(C_r)}{\partial(k)} = A - B \frac{2k+3}{k^4} = 0;$$

Из последнего равенства:

$$k^4 - \frac{B}{A} (2k + 3) = 0$$

Решения последнего уравнения, соответствующие оптимальным значениям  $k_{опт}$ , в зависимости от соотношения  $B/A$ , приведены в таблице 1.

Таблица № 1.

Оптимальные значения  $K_{опт}$

В/А	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$K_{опт}$	1,58	1,93	2,16	2,35	2,52	2,66	2,78	2,90	3,00

Для определения вида экстремума найдем вторую производную  $\frac{\partial^2(C_{пр})}{\partial^2(k)}$ .

Так как

$$\frac{\partial^2(C_{пр})}{\partial^2(k)} = B \frac{6(k+2)}{k^5} > 0,$$

то данные таблицы 1 соответствуют условиям, при которых наблюдается минимум функциональной зависимости (7).

**Выводы:**

1. Установлены условия оптимальности отношения сторон прямоугольного поперечного сечения воздухопроводов систем вентиляции и кондиционирования воздуха.
2. Полученные результаты могут быть включены в программы расчетов воздухопроводов систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

### **Литература**

1. Кокорин О.Я. Энергосбережение в системах отопления, вентиляции, кондиционирования. М.: Издательство АСВ, 2013. 256 с.
2. Mathews E., Botha C., Arndt D. and Malan A. HVAC control strategies to enhance comfort and minimise energy usage // Energy Build. 2001. Vol. 33. №8. pp. 853 – 863.
3. Абрамян С.Г., Матвийчук Т.А. К вопросу энергетической эффективности зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона. 2017. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/3993/.
4. Gustsvsson L., Dodo A., Truong N. L., Danielski I. Primary energy implications of end-use energy efficiency measures in distributed buildings // "Energy and buildings". 2011. V.43. №1. pp. 38-48.
5. Fong K. F., Hanby V. I., and Chow T. T. - HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming // Energy Build. 2006. vol. 38. №3. pp. 220 –231.
6. Караджи В.Г., Московко Ю.Г. Способы увеличения аэродинамической эффективности вентиляционных систем // АВОК. 2009. №5. С. 28-37.

7. Галкина Н.И. КПД систем вентиляции // Инженерный вестник Дона. 2017. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4106](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4106).
8. Василенко А.И. Исследование параметров работы вентилятора в термически нестационарной вентиляционной системе // Инженерный вестник Дона. 2017. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4397](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4397).
9. Шеина С.Г., Грачев К.С. Лучшие европейские практики для внедрения возобновляемых источников энергии в РФ // Инженерный вестник Дона. 2019. №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2019/5993](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2019/5993).
10. Богуславский Л.Д. Экономика теплоснабжения и вентиляции. М.: Стройиздат, 1988. - 351 с.
11. Василенко А.И., Федосенко А.А. Техничко-экономическая оптимизация воздуховодов // Инженерный вестник Дона. 2018. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4674/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4674/).

### References

1. Kokorin O.Ja. Jenergosberezhenie v sistemah otopenija, ventiljacii, kondicionirovanija [Energy saving in heating, ventilation, air conditioning systems]. М.: Izdatel'stvo ASV. 2013. 319 p.
  2. Mathews E., Botha C., Arndt D. and. Malan A. HVAC control strategies to enhance comfort and minimise energy usage. Energy Build. 2001. vol. 33. № 8. pp. 853 – 863.
  3. Abramjan S.G., Matvijchuk T.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/3993/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/3993/).
  4. Gustsvsson L., Dodo A., Truong N. L., Danielski I. Energy and buildings. 2011. V.43. No1. pp. 38-48.
  5. Fong K. F., Hanby V. I., and Chow T. T. HVAC system optimization forenergy management by evolutionary programming.Energy Build. 2006.vol. 38. No3. pp. 220 –231.
  6. Karadzhi V.G., Moskovko Ju.G. AVOK. 2009. No5. pp. 28-37.
-



7. Galkina N.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine /archive/N2y2017/4106/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4106/).
8. Vasilenko A.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine /archive/N4y2017/4397/](http://ivdon.ru/ru/magazine /archive/N4y2017/4397/).
9. Sheina S.G., Grachev K.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2019/5993](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2019/5993).
10. Boguslavskiy L.D. Ekonomika teplosnabjenija i ventiljacji [The economy of heat supply and ventilation]. M.: Stroiizdat, 1988. 351 p.
11. Vasilenko A.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4674/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4674/).