

Технико-экономическая оптимизация воздуховодов

А.И.Василенко¹, А.А.Федосенко²

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

²Донской государственный технический университет

Аннотация: В статье рассматривается способ оптимизации воздуховодов круглого поперечного сечения для систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Приводятся универсальные зависимости для определения оптимальных в технико-экономическом отношении диаметров поперечных сечений воздуховодов и скоростей движения воздуха в них. Показано, что оптимальная скорость воздуха на участке вентиляционной сети не зависит от местоположения участка относительно вентилятора системы. Приведены конкретные примеры определения оптимальных в технико-экономическом отношении диаметров воздуховодов и скоростей воздуха в них с использованием полученных зависимостей.

Ключевые слова: воздуховод, аэродинамический расчет, система вентиляции, система кондиционирования воздуха, технико-экономическая оптимизация, оптимальный диаметр, оптимальная скорость воздуха, энергосбережение, энергоэффективность, аэродинамическая эффективность.

В России 40% топлива и до 10% производимой электроэнергии тратится на обеспечение работы систем отопления, охлаждения, горячего водоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха зданий [1]. В общем энергопотреблении системами инженерно-технического обеспечения зданий значительная доля приходится на системы кондиционирования воздуха и вентиляции (СКВиВ) [2]. Зарубежная практика показывает, что в современных зданиях СКВиВ потребляют более 40% от общей электрической мощности, потребной для жизнеобеспечения зданий [3-5]. В то же время с каждым годом увеличивается доля затрат на СКВиВ в общих затратах на строительство и эксплуатацию зданий, поэтому поиск решений, направленных на энергосбережение и оптимизацию СКВиВ приобретает в настоящее время важнейшее значение. Исследования по данной проблематике осуществляются в разных направлениях – повышение аэродинамической эффективности систем [6-8], совершенствованию алгоритмов управления СКВиВ [9], разработки эффективного и энергоэкономичного вентиляционного оборудования [10]. Одной из

значимых задач в этой области является технико-экономическая оптимизация размеров поперечных сечений воздуховодов. Постановка задачи очевидна – с уменьшением размеров поперечных сечений воздуховодов уменьшается их стоимость, но увеличиваются потери давления воздуха и, следовательно, электропотребление вентилятором системы. Это дает основание предположить возможность поиска размеров поперечного сечения воздуховода, соответствующих технико-экономическому оптимуму затрат на устройство воздуховода и эксплуатационных расходов на электроэнергию, необходимую для транспортировки воздуха по данному воздуховоду. Основы исследований в этом направлении оптимизации вентиляционных систем были заложены Л.Д. Богуславским, разработавшим способ оптимизации поперечных сечений воздуховодов по методу приведенных затрат [11]. Однако алгоритм данного метода не позволял получить общее аналитическое решение задачи. Кроме того, этот метод был разработан в конце XX века, до коренного изменения экономических реалий в России, поэтому его использование для оптимизации воздуховодов в настоящее время невозможно без внесения необходимых корректив.

Выделим произвольный участок вентиляционной системы и рассмотрим влияние вариации диаметра воздуховода на затраты по его устройству и эксплуатации. Отнесем данные затраты к 1 году эксплуатации вентиляционной системы.

Затраты на устройство воздуховода с круглой формой поперечного сечения, длиной l , м, отнесенные к 1 году его эксплуатации, C_m , руб./год, пропорциональны диаметру воздуховода, D , м, и равны

$$C_m = \pi \cdot l \cdot a_{m.c.} \cdot c_m \cdot D \quad (1)$$

где $a_{m.c.}$ – коэффициент, учитывающий увеличение затрат на устройство воздуховода из-за наличия фасонных деталей на рассматриваемом участке

вентиляционной системы; c_m , руб/ $m^2 \cdot год$ - затраты на устройство воздуховода, отнесенные к $1 m^2$ его поверхности и к одному году эксплуатации,

Годовые затраты на электроэнергию, $C_{эл}$, кВт час/год, необходимую для транспортировки заданного объемного расхода воздуха, L , m^3/c , по рассматриваемому участку воздуховода, равны

$$C_{эл} = N_{эл} \cdot n \cdot c_{эл} \cdot b_{м.с.} = \frac{L \cdot \Delta P}{\eta \cdot 10^3} n \cdot c_{эл} \cdot b_{м.с.} \quad (2)$$

где $N_{эл}$ - электрическая мощность, потребляемая электродвигателем вентилятора, кВт; ΔP - потери давления воздуха в воздуховоде, Па; n - число часов работы вентиляционной установки в год, час/год; $c_{эл}$ - стоимость электроэнергии, руб/кВт·час; $b_{м.с.}$ - коэффициент, учитывающий потери давления воздуха в местных сопротивлениях на участке; η - интегральный КПД вентилятора.

Зависимость (2) приводится к виду:

$$C_{эл} = \frac{8\lambda}{\eta \cdot \pi^2} b_{м.с.} \cdot L^3 \cdot \rho \cdot l \cdot n \cdot c_{эл} \cdot 10^{-3} \cdot D^{-5} \quad (3)$$

где ρ - плотность воздуха, кг/ m^3 .

Общие, отнесенные к 1 году, затраты на устройство и эксплуатацию воздуховода на участке, C , руб/год, с учетом (1) и (3) равны:

$$C = \pi \cdot l \cdot a_{м.с.} \cdot c_m \cdot D + \frac{8\lambda}{\eta \cdot \pi^2} b_{м.с.} \cdot L^3 \cdot \rho \cdot l \cdot n \cdot c_{эл} \cdot 10^{-3} \cdot D^{-5} \quad (4)$$

Из анализа таблиц аэродинамического расчета воздуховодов нами установлено, что вариация диаметров воздуховодов не приводит к значимым изменениям коэффициента трения λ при условии $L = const$ и диапазоне изменения скоростей воздуха в воздуховоде от 3,0 до 12,0 м/с. Это позволяет при вариации диаметра воздуховода рассматривать последнюю зависимость как функцию одной переменной $C = f(D)$.

С учетом этого минимум функции (4) соответствует оптимальному в технико-экономическом отношении диаметру воздуховода, D_{opt} , м, который определяется двумя условиями:

$$\frac{\partial(C)}{\partial(D)} = 0; \quad \frac{\partial^2(C)}{\partial(D)^2} > 0$$

$$\frac{\partial(C)}{\partial(D)} = \pi \cdot l \cdot a_{м.с.} \cdot c_m + \frac{40\lambda}{\eta \cdot \pi^2} b_{м.с.} \cdot L^3 \cdot \rho \cdot l \cdot n \cdot c_{эл} \cdot 10^{-3} \cdot D^{-6} = 0.$$

Из последней зависимости:

$$D_{opt} = \left(\frac{L}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{40 \cdot \rho \cdot \lambda \cdot b_{м.с.} \cdot n \cdot c_{эл} \cdot 10^{-3}}{a_{м.с.} \cdot \eta \cdot c_m}\right)^{\frac{1}{6}} \quad (5)$$

Проверка вида экстремума:

$$\frac{\partial^2(C)}{\partial(D)^2} = \frac{280 \cdot \lambda \cdot b_{м.с.} \cdot L^3 \cdot \rho \cdot l \cdot n \cdot 10^{-3} \cdot D^{-7}}{\eta \pi^2} > 0$$

Следовательно, D_{opt} , определенный по формуле (5), соответствует минимуму выражения (4)

Оптимальная скорость движения воздуха в воздуховоде, w_{opt} , м/с, соответствующая его оптимальному диаметру, равна:

$$w_{opt} = 11,84 \left(\frac{a_{м.с.} \cdot \eta \cdot c_m}{b_{м.с.} \cdot \lambda \cdot \rho \cdot n \cdot c_{эл}}\right)^{\frac{1}{3}} = 11,84 \cdot A^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Комплекс A в формуле (6) объединяет аэродинамические и технико-экономические характеристики прямолинейного воздуховода и местных сопротивлений на участке вентиляционной сети. Функция $w_{opt} = f(A)$ в графическом виде представлена на рис. 1.

Необходимо отметить, что в зависимость (6) не входит объемный расход воздуха на участке, поэтому данная зависимость носит универсальный

характер и применима для любого участка, независимо от его местоположения в вентиляционной системе.

Вид зависимостей (5) и (6) позволяет включить их в компьютерные программы аэродинамического расчета воздуховодов.

Конкретизируем полученные результаты на практическом примере.

Определим значения $D_{\text{опт}}$ и $w_{\text{опт}}$ для воздуховода вентиляционной системы при следующих исходных параметрах: $L = 3600 \text{ м}^3/\text{час}$; $\lambda = 0,017$; $c_{\text{эл}} = 5,0 \text{ руб}/\text{кВт}\cdot\text{час}$; $\eta = 0,75$; $c_m = 200 \text{ руб}/\text{м}^2\cdot\text{год}$; $b_{\text{м.с.}} = 1,5$; $a_{\text{м.с.}} = 1,3$; $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Рассмотрим два варианта эксплуатационного режима системы:

а) при круглосуточной работе вентиляционной системы:

$n = 8760 \text{ час}/\text{год}$, $D_{\text{опт}} = 0,455 \text{ м}$, $A = 0,145$; и $w_{\text{опт}} = 6,2 \text{ м}/\text{с}$.

б) при работе вентиляционной системы 12 часов в сутки:

$n = 4380 \text{ час}/\text{год}$, $D_{\text{опт}} = 0,400 \text{ м}$; $A = 0,290$; $w_{\text{опт}} = 7,8 \text{ м}/\text{с}$.

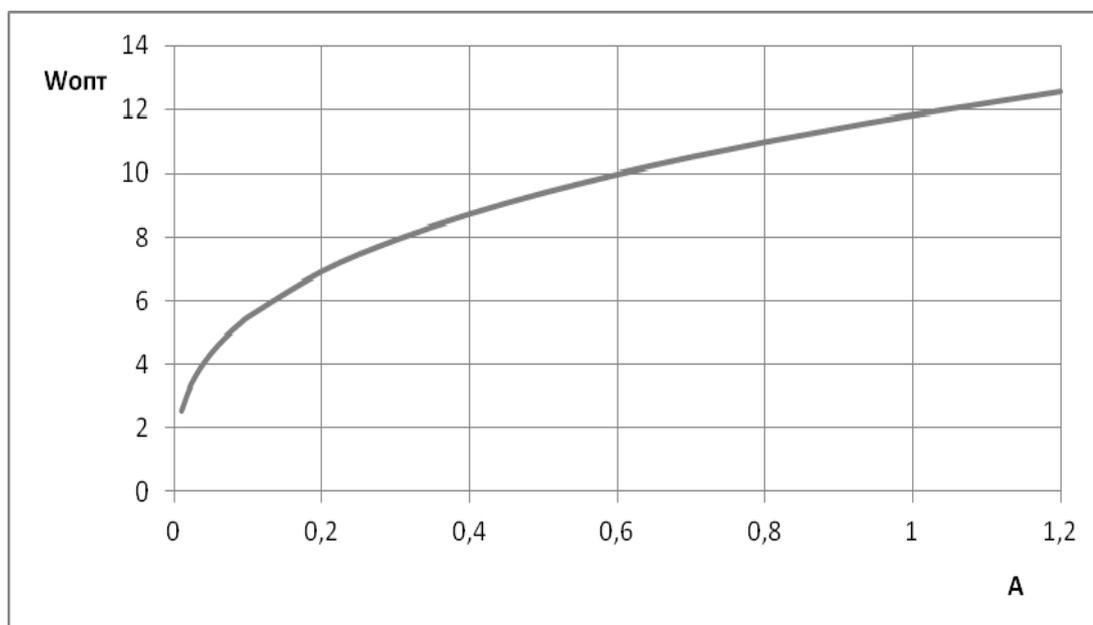


Рис. 1. - График зависимости $w_{\text{опт}} = f(A)$

Выводы:

Технико-экономические характеристики вентиляционной системы и режим ее эксплуатации оказывают существенное влияние на величину оптимальной скорости воздуха в воздуховодах. Повышение затрат на устройство воздуховодов, уменьшение часов работы вентиляционной системы в сутки, снижение доли затрат на фасонные части воздуховодов, уменьшение стоимости электроэнергии приводят к увеличению $w_{\text{опт}}$ и, соответственно, к уменьшению $D_{\text{опт}}$.

Литература

1. Кокорин О.Я. Энергосбережение в системах отопления, вентиляции, кондиционирования. М.: Издательство АСВ, 2013. 256 с.
2. 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/.
3. K. F. Fong, V. I. Hanby, and T. T. Chow, - HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming // Energy Build., vol. 38, no.3, pp. 220 –231, 2006.
4. E. Mathews, C. Botha, D. Arndt, and A. Malan, - HVAC control strategies to enhance comfort and minimise energy usage // Energy Build., vol. 33, no. 8, pp. 853 – 863, 2001.
5. Wong Kwok Wai Johnny. Development of Selection Evaluation and System Intelligence Analytic Models for the Intelligent Building Control Systems, Hong Kong Polytechnic University, 2007. – 414 p.
6. Караджи В.Г., Московко Ю.Г. Способы увеличения аэродинамической эффективности вентиляционных систем // АВОК, 2009, №5. С. 28.



7. Галкина Н.И. КПД систем вентиляции // Инженерный вестник Дона, 2017, №2. URL: 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.

9. Нгуен Суан Мань. Алгоритм управления подсистемой отопления, вентиляции и кондиционирования в составе интеллектуального управления зданием// Инженерный вестник Дона, 2015, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3178.

10. Гвоздков А.Н., Сулова О.Ю., Авдонин А.В., Викстрем А.А. Разработка современных энергоэффективных воздухоприготовительных центров систем кондиционирования воздуха и вентиляции // Инженерный вестник Дона, 2017, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4195.

11. Богуславский Л.Д. Экономика теплоснабжения и вентиляции. М.: Стройиздат, 1988. - 351 с.

References

1. Kokorin O.Ja. Jenergosberezhenie v sistemah otoplenija, ventiljacii, kondicionirovanija [Energy saving in heating, ventilation, air conditioning systems]. M.: Izdatel'stvo ASV, 2013. 319 p.

2. Abramjan S.G., Matvijchuk T.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2017. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/3993/.

3. K. F. Fong, V. I. Hanby, and T. T. Chow, Energy Build., vol. 38, no.3, pp. 220 –231, 2006.

4. E. Mathews, C. Botha, D. Energy Build., vol. 33, no. 8, pp. 853 – 863, 2001.

5. Wong Kwok Wai Johnny. Development o f Selection Evaluation and System Intelligence Analytic Models for the Intelligent Building Control Systems, Hong Kong Polytechnic University, 2007. 414 p.



6. Karadzhi V.G., Moskovko Ju.G. Sposoby uvelichenija aerodinamicheskoy effektivnos ti ventiljacionnyh system [Ways to increase aerodynamic effectiveness of ventilation systems]. AVOK. 2009, № 5. p. 28.

7. Galkina N.I. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2017. №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine /archive/N2y2017/4106/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4106/).

8. Vasilenko A.I. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2017. №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine /archive/N4y2017/4397/.

9. Nguyen Xuan Manh. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2015. №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3178.

10. Gvozdikov A.N. Suslova O.Y. Avdonin A.V. Vikstrem A.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4195.

11. Boguslavskiy L.D. Ekonomika teglosnabjenija i ventiljicii [The economy of heat supply and ventilation]. M.: Stroiizdat, 1988. 351 p.