

jarano, Y.A. Levendis // Comb. and Flame. – 156. – 2008. – P. 270-287.

4. Резняков А.Б. Горение натурального твердого топлива / А.Б. Резняков [и др.]. – Алма-Ата: Наука, 1968. – 410 с.

#### Bibliography:

1. V.I. Babij. Combustion of coal dust and calculation of pulverized coal flame / V.I. Babij, U.F. Kyvaev. – M.:Energoatomizdat, 1986. – 208 p. (Rus.)
2. Essenhigh R.H. Kinetics of coal combustion: The influence of oxygen concentration on the burning-out time of single particles / R.H. Essenhigh, G. Beeston // J. Phys. Chem. – 1963. – Vol.67 – P. 1349.
3. Bejarano P.A. Single coal particle combustion in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environments / P.A. Bejarano, Y.A. Levendis // Comb. and Flame. – 156. – 2008. – P. 270-287.
4. Reznjakov A.B. Combustion of natural solid fuel / A.B. Reznjakov [and oth.]. – Alma-Ata:Nauka, 1968. – 410 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.05.2013

УДК 621.6.057.8

© Шаганов А.Ю.\*

### ОПТИМИЗАЦИЯ МАТЕРИАЛОЗАТРАТ НА ВОЗДУХОВОДЫ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАБЛИЦ

*Предложено определение диаметров воздуховодов с минимальными материалозатратами на основе решения оптимизационной задачи методом динамического программирования в системе электронных таблиц. Показано, что применяемые методы проектирования вентиляционных систем не обеспечивают минимальных материалозатрат на воздуховоды.*

**Ключевые слова:** аспирационная система, гидравлическая сеть, воздуховоды, оптимизация, динамическое программирование.

**Шаганов О.Ю.** Оптимізація матеріалозатрат на повітроводи вентиляційних систем методом динамічного програмування в системі електронних таблиць. Запропоновано визначення діаметрів повітроводів з мінімальними матеріалозатратами на основі рішення оптимізаційної задачі методом динамічного програмування в системі електронних таблиць. Показано, методи, що застосовуються для проектування вентиляційних систем, не забезпечують мінімальних матеріалозатрат на повітроводи.

**Ключові слова:** аспіраційна система, повітроводи, гідравлічна мережа, оптимізація, динамічне програмування.

**O.J. Shaganov.** Optimization of materials consumption for ventilation systems air ducts outlay with dynamic programming in spreadsheets. Determining the duct diameters of minimum material outlay by solving the optimization problem with dynamic programming in spreadsheets is proposed. It is shown that existing methods of designing ventilation systems do not provide for minimal material outlay of ducts.

**Keywords:** exhaust system, air ducts, hydraulic network, optimization, dynamic programming.

\* главный инженер, «Научно-исследовательская лаборатория фильтров Немцова», г. Мариуполь

**Постановка проблеми.** Системы воздуховодов приточно-вытяжной вентиляции и пневмотранспорта для транспортировки газо-воздушных и дисперсных сред являются важной составляющей промышленных производств. Поэтому задача проектирования вентиляционной и аспирационной систем с минимальными затратами на материал (материалозатратами) воздуховодов при обеспечении заданных расходов и технических требований-ограничений с использованием удобных инструментов расчета является актуальной для сокращения расходов на производство системы.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В отечественном проектировании определение диаметров воздуховодов систем в большинстве случаев выполняется методом постоянных скоростей, который не обеспечивает минимальных затрат. Проектирование систем воздуховодов с минимальными материалозатратами, являющееся задачей оптимизации дискретной нелинейной функции с ограничениями, исследовано в работах отечественных и зарубежных специалистов Цаля Р.Я., Чечика Е.Н., Селезнева В.Е., Алешина В.В., Huei-Jiunn Chen и др. Данными авторами решение задачи рассматривается на основе динамического программирования, требующего разработки специализированного программного обеспечения.

**Цель статьи** – выполнить анализ используемых в проектировании методов определения диаметров воздуховодов вентиляционных сетей, сформулировать область рабочих параметров воздуховодов системы, сравнить затраты, разработать инженерный инструмент расчета оптимизированного варианта вентсистем с минимальными материалозатратами.

**Изложение основного материала.** Рассматривается проектная задача определения диаметров воздуховодов из номенклатурного ряда для заданных схемы сети, расходов  $q$ , длин  $l$  участков и предварительного выбранного нагнетателя со значением давления  $P_{\Sigma}$ .

В данной работе моделируемой вентиляционной системой является распространенная в промышленности однонаправленная бесконтурная (разветвлённая) гидравлическая сеть из одного источника давления (разрежения) и  $b$  воздуховодов, которой соответствует ориентированный граф из  $n=b+1$  узлов соединения  $n_c$  воздуховодов, источника и потребления (снабжения)  $n_f$  и  $b$  рёбер. Согласно проекту для каждого участка  $i$  сети ( $i \in 1..b$ ) заданы расходы  $q_i$ .

Аэродинамическая схема для каждой ветви  $i$  графа-участка гидравлической сети определяется из номенклатурного ряда диаметр  $d_i$  воздуховода с соответствующими материалозатратами  $e$  и гидравлическим сопротивлением  $\Delta p$ . Номенклатурный ряд диаметров воздуховодов задан множеством  $D$ .

Для каждого участка  $i$  сети определяется подмножество допустимых диаметров  $D_i \in D$  на основе технических требований-ограничений к скорости газо-воздушной среды в воздуховоде  $w_i$  и диаметру воздуховода  $d_i$ :

$$\begin{cases} w_i^{\min} < w_i < w_i^{\max} \\ d_{\min} < d_i < d_i^{\max} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $w_i^{\min}$  – минимальная скорость потока для транспортирования дисперсных частиц в воздуховоде  $i$ , м/с;  
 $w_i^{\max}$  – максимальная скорость потока для предупреждения шума и вибрации в воздуховоде  $i$ , м/с;  
 $d_{\min}$  – минимальный диаметр номенклатурного ряда выпускаемых воздуховодов, м;  
 $d_i^{\max}$  – максимальный диаметр воздуховода  $i$  согласно архитектурным требованиям или номенклатурному ряду выпускаемых воздуховодов, м.

На основании соотношения

$$f(d_i, w_i, q_i) = q_i - \frac{\pi d_i^2}{4} w_i = 0, \quad (2)$$

где  $q_i$  – расход потока в воздуховоде  $i$ , м<sup>3</sup>/с  
система неравенств (1) преобразуется:

$$\begin{cases} d_i(w_i^{\max}, q_i) < d_i(w_i, q_i) < d_i(w_i^{\min}, q_i) \\ d_{\min} < d_i < d_i^{\max} \end{cases}, \quad (3)$$

где

$$d_i(w_{\min}, q_i) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{q_i}{w_{\min}}}; \quad d_i(w_{\max}, q_i) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{q_i}{w_{\max}}}. \quad (4)$$

Решение системы неравенств (3) определяет область допустимых значений диаметров  $D_i$  воздуховода на участке  $i$ :

$$D_i \in [\max(d_{\min}; d_i(w_{\max}, q_i)); \min(d_{\max}; d_i(w_{\min}, q_i))]. \quad (5)$$

Например, для круглого воздуховода длиной  $l=4$  м, диаметров  $d_{\min}=0,1$  м и  $d_{\max}=0,3$  м, скоростей  $w_{\min}=5$  м/с и  $w_{\max}=25$  м/с диапазоны допустимых значений  $D_i$  для серии расходов потока  $q$  представлены в табл. 1 и показаны сплошной линией в области допустимых значений на рис. 1.

Таблица 1

Область допустимых значений скорости  $w$  и диаметров  $D_i$

$q, \text{ м}^3/\text{ч}$	$d(w_{\max}, q), \text{ м}$	$d(w_{\min}, q), \text{ м}$	$D_i, \text{ м}$
500	0,08	0,19	0,1÷0,19
1000	0,12	0,27	0,12÷0,27
1500	0,15	0,33	0,15÷0,3

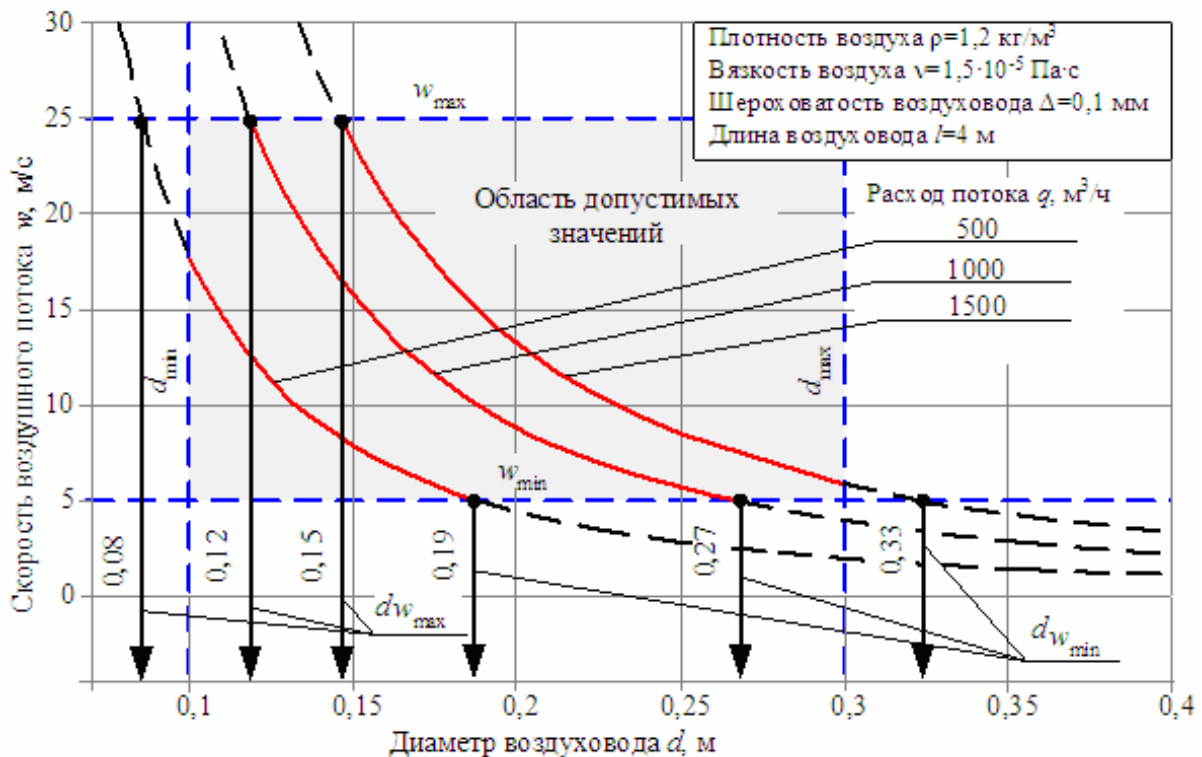


Рис. 1 – Область допустимых значений скорости  $w$  и диаметров  $D_i$

Распространенными способами определения диаметров воздухопроводов вентиляционных систем являются методы: допустимых скоростей, постоянной потери давления, постоянного статического давления.

Метод допустимых скоростей ( $w=\text{const}$ ) [1] применяется для систем с низкой скоростью потока. Согласно методу диаметры воздухопроводов определяются на основании задаваемых при проектировании скоростей газо-воздушного потока, зависящих от назначения вентиляционной

системы, ориентировочные значения которых приведены в табл. 2.

На основании заданной постоянной скорости потока  $w$  определяется диаметр воздуховода  $d$ :

$$d \sim \sqrt{\frac{q}{w}}, \quad (6)$$

где  $q$  – расход газо-воздушного потока в воздуховоде, м<sup>3</sup>/с;

Таблица 2

Ориентировочные скорости газо-воздушного потока в вентиляционных системах

Система	Скорость в воздуховоде $w$ , м/с
Аспирация	12÷23
Пневмотранспорт	13÷22
Промышленная вентиляция	4÷6
Приточная вентиляция бытового назначения	2,5÷4

При задании скорости потока максимально допустимой требованиями-ограничениями ( $w=w_{\max}$ ) расчетный вариант системы обеспечит минимальные материалозатраты  $E_{\min}$  при максимальных энергозатратах на подачу газо-воздушной среды воздухоподогревателем.

Метод постоянной потери давления ( $\Delta P = \text{const}$ ) [1] применяется к низкоскоростным сетям низкого давления. Согласно методу для всей системы газопроводов задается величина удельных потерь давления  $\Delta p_l$  потока на трение по длине  $l$ , например  $\Delta p_l = 25$  Па на  $l = 30$  м. Диаметр воздуховода  $d$ :

$$d \sim \sqrt[5]{\frac{q^2}{\Delta p_l}}, \quad (7)$$

Метод постоянного статического давления ( $P_{\text{ст}} = \text{const}$ ) [2] применяется для больших сетей средней и высокой скорости газо-воздушного потока. Согласно методу диаметр воздуховода определяется из условия поддержания постоянного значения статического давления в узлах соединения воздуховодов. Для этого общие потери давления  $\Delta P_{\Sigma}$  в воздуховоде компенсируются снижением динамического давления  $\Delta P_{\text{дин}}$  потока:

$$\Delta P_{\Sigma} = H \cdot \Delta P_{\text{дин}}$$

$$\Delta P_{\Sigma} = f(l, d, q(w, d), \xi_{\Sigma}), \quad (8)$$

$$\Delta P_{\text{дин}} = \frac{\rho}{2}(w_0^2 - w^2)$$

где  $H$  – коэффициент преобразования,  $H \sim 0,7$ ;

$\xi_{\Sigma}$  – общий коэффициент потерь на местные сопротивления;

$\rho$  – плотность газо-воздушного потока, кг/м<sup>3</sup>;

$w$  – скорость газо-воздушного потока в рассматриваемом газопроводе, м/с;

$w_0$  – скорость газо-воздушного потока в предшествующем по ходу потока газопроводе, м/с.

Диаметр  $d$  определяется итерационным решением (8).

Для сети из номенклатурного ряда  $D$  диаметров воздуховода выбирается ближайшее к определенному согласно методам значение диаметра  $d$ .

Указанные методы определяют различные варианты  $N$  аэродинамических схем с гидравлическим сопротивлением  $P_{\text{сисг}}$  и материалозатратами  $E_{\text{сисг}}$  системы, отличающихся диаметрами воздуховодов. Количество вариантов  $N$ :

$$N = \prod_{i=1}^b m_i, \quad (9)$$

где  $m_i$  – количество дискретных значений диаметров  $D_i$ , допустимых согласно (5) для  $i$ -го участка системы воздухопроводов.

Например, для сети из 10 участков и ряда из 5 типоразмеров диаметров, допустимых для каждого участка, количество вариантов  $N=5^{10}$ , из которых требуется определить вариант, соответствующий минимальной  $E_{\text{сист}}$ .

Определение варианта аэродинамической схемы с минимальными материалозатратами для заданной конфигурации вентиляционной системы является задачей нелинейной условной дискретной оптимизации с целевой функцией  $E_{\text{сист}}$  и техническими требованиями-ограничениями:

$$\begin{cases} E_{\text{сист}} = \pi \sum_{i=1}^b l_i d_i \rightarrow \min \\ w_i^{\min} < w_i < w_i^{\max} \\ d_{\min} < d_i < d_i^{\max} \\ P_{\text{сист}} \leq P_{\Sigma} \end{cases}, \quad (10)$$

где  $l_i$  – длина  $i$ -го воздуховода-участка системы, м;  
 $d_i$  – диаметр  $i$ -го воздуховода-участка системы, м;  
 $P_{\Sigma}$  – давление нагнетателя.

Существующие методы оптимизации гидравлических сетей: (не)линейное программирование, метод ветвей и границ, динамическое программирование, Т-метод, полуэвристические.

В данной работе решение задачи выполняется методом динамического программирования [3, 4, 5] - последовательного определения оптимальных диаметров участков системы для заданных давления и расходов в системе.

Рассматривается сеть воздухопроводов круглого сечения, для расчета гидравлических и экономических характеристик прямоугольные сечения воздухопроводов преобразуются в эквивалентные круглого сечения.

Оптимизируемая целевая функция  $E_{\text{сист}}$  переменных  $d_i$  ( $i=1..b$ ) выражается в виде суммы функций  $e_i$  одной переменной и обладает оптимальной подструктурой:

$$E_{\text{сист}}(p, d_1, d_2 \dots d_b) = \sum_{i=1}^b \pi l_i d_i = \sum_{i=1}^b e_i(d_i) \rightarrow \min. \quad (11)$$

Оптимальное дерево графа сети состоит из оптимальных подграфов и согласно методу динамического программирования решение исходной задачи (11) заменяется рекуррентной последовательностью подзадач единичной размерности:

$$\begin{cases} E_i(p) = e_i(d_i) + \sum_{j=1}^n E_j(p') \rightarrow \min \\ p \geq p' + \Delta p(d_i) \\ i = 1..n_c \end{cases}, \quad (12)$$

где  $E_i(p)$  – значение целевой функции в корне дерева графа - вершине ребра  $i$  для давления  $p$ ;  
 $E_j(p')$  – оптимальные значения  $n$  целевых функций (12) связанных подграфов  $E_j$ , инцидентных ребру  $i$  для давления  $p'$  ( $E_j = E_i | i \wedge n_j \in E_j$ );  
 $\Delta p(d_i)$  – потеря давления в ребре  $i$  для диаметра  $d_i$ .

При отсутствии ограничений решение методом динамического программирования (последовательного определения оптимального решения) выражается аналитической зависимостью, например, в Т-методе [6]. Однако при учёте местных сопротивлений и технических требований-ограничений к сети результат может иметь существенные погрешности [7].

В данной работе решение выполняется оптимизированным перебором в каждом узле (вершине графа)  $n_c$  сети табличных значений  $E(p)$  функции (12) для давлений  $P \in [0 \div 2550]$  Па с

дискретизацией  $\Delta P=10$  Па, определяющей точность решения.

Расчет рекуррентной функции (12) оптимизации гидравлической сети, требующей значительных объемов вычислений и составления таблиц оптимальных значений, выполняется на ЭВМ. Для реализации алгоритма расчета выбран функциональный язык программирования, в котором достаточно определения математической логики вычисления результата в виде системы функций без указания низкоуровневых процедур, обращений к памяти и итеративных циклов.

Электронная таблица является компьютерной системой функционального программирования, в которых алгоритмы вычисления данных определяются через табличные двумерные массивы. Таблица является набором математических функций и констант, определенных в ячейке таблицы согласно последовательности алгоритма ссылками на ячейки, содержащие другие функции или рекурсивно. На основании этого электронные таблицы выбраны как инструмент инженерного расчета и анализа вариантов моделей вентиляционной сети.

Программа расчёта содержит таблицы: исходных данных, расчетной, результатов расчета.

В таблице исходных данных задаются: номер воздуховода; номера смежных участков воздуховодов подграфа; длина участка  $L$ , м; приток (+) или отток (-)  $\Delta Q$  газо-воздушного потока, м<sup>3</sup>/ч; расход  $Q$  газо-воздушного потока, м<sup>3</sup>/ч; общий коэффициент  $\xi$  потерь давления на местные сопротивления; дополнительные сопротивления (-) или добавочные (+) давления  $\Delta P$ , Па; минимально  $w_{\min}$  и максимально  $w_{\max}$  допустимые скорости газо-воздушного потока, м/с; минимально  $D_{\min}$  и максимально  $D_{\max}$  допустимые диаметры участков, м. Воздуховоды predetermined размеров (диаметр  $D$ , ширина×высота  $a \times b$ ) выражаются дополнительным сопротивлением  $\Delta P$ .

В расчетной таблице (табл. 3) для каждого номенклатурного значения диаметра  $D$  выполняется вычисление потерь давления на участках сети  $\Delta P$ , Па; скорости потока  $w$ , м/с; значения функции (12)  $e$ ,  $E_{\text{down}}$ ,  $E_{\Sigma}$ , м<sup>2</sup>. Для удобства расчетная таблица, занимающая значительное пространство, скрыта. Хорды графа сети соответствуют конечным участкам, смежным с зонтами или распределителями; дерево графа сети – остальные участки.

Таблица 3

Расчетная таблица

	$D$	Участки - хорды графа	Участки - дерево графа
$\Delta P$ , Па		$\Delta P=f(L,D)$	
$w$ , м/с		$w=f(Q,D)$	
$e$ , м <sup>2</sup>		$e=f(L,D)$	
$E_{\text{down}}$ , м <sup>2</sup>		-	$\sum E'_{\Sigma}(\Delta P)$
$E_{\Sigma}$ , м <sup>2</sup>		$e$	$e + \sum E'_{\Sigma}(\Delta P)$

В таблице результатов выводятся результаты оптимизационного расчета для каждого участка №, сопротивление  $\Delta P$ , давление в начале  $P'$  и конце  $P''$  участков, Па; значения функций оптимизации  $e$  и  $E_{\Sigma}$ , м<sup>2</sup>.

Оптимизация рассматривается на сравнительном анализе вариантов аспирационной системы отвода запыленного воздуха от источников выбросов на машиностроительном предприятии «Азовмаш», г. Мариуполь – проектного, определенных по разным методам расчета ( $w=\text{const}$ ,  $\Delta P=\text{const}$ ,  $P_{\text{ср}}=\text{const}$ ) и оптимизированного методом динамического программирования в электронных таблицах (рис. 2, табл. 4). Запыленный воздух, забираемый аспирационными зонтами в воздуховоды системы, по сети газопроводов отводится к пылеуловителю, за которым установлен воздухонагнетатель – источник разрежения. Система содержит 8 зонтов - точек отбора, 10 участков воздуховодов постоянного расхода потока.

Для проектных диаметров воздухопроводов ( $d=0,2$  м), соединенных с аспирационными зондами, принимается скорость потока  $w=25$  м/с (расход  $q=2827$  м<sup>3</sup>/ч). Согласно принятой производительности  $Q$  гидравлическое сопротивление по длине воздухопроводов проектной системы  $\Delta P_{\Sigma}^{\text{проект}}=450$  Па. В расчётной и оптимизированной системах скорости потока, обеспечивающие транспортировку запыленного материала: минимальная  $w_{\text{min}}=15$  м/с, максимальная  $w_{\text{max}}=26$  м/с; гидравлическое сопротивление по длине системы  $\Delta P_{\Sigma}$  - не более проектного ( $\Delta P_{\Sigma} \leq \Delta P_{\Sigma}^{\text{проект}}$ ).

Номенклатурный ряд из 25 значений диаметров воздухопроводов принят в диапазоне 0,1÷1,6 м по [8], для которого общее количество вариантов системы для 10 участков  $N=25^{10}$ , количество вариантов системы, удовлетворяющих (5)  $N' \sim 3^{10}$ .

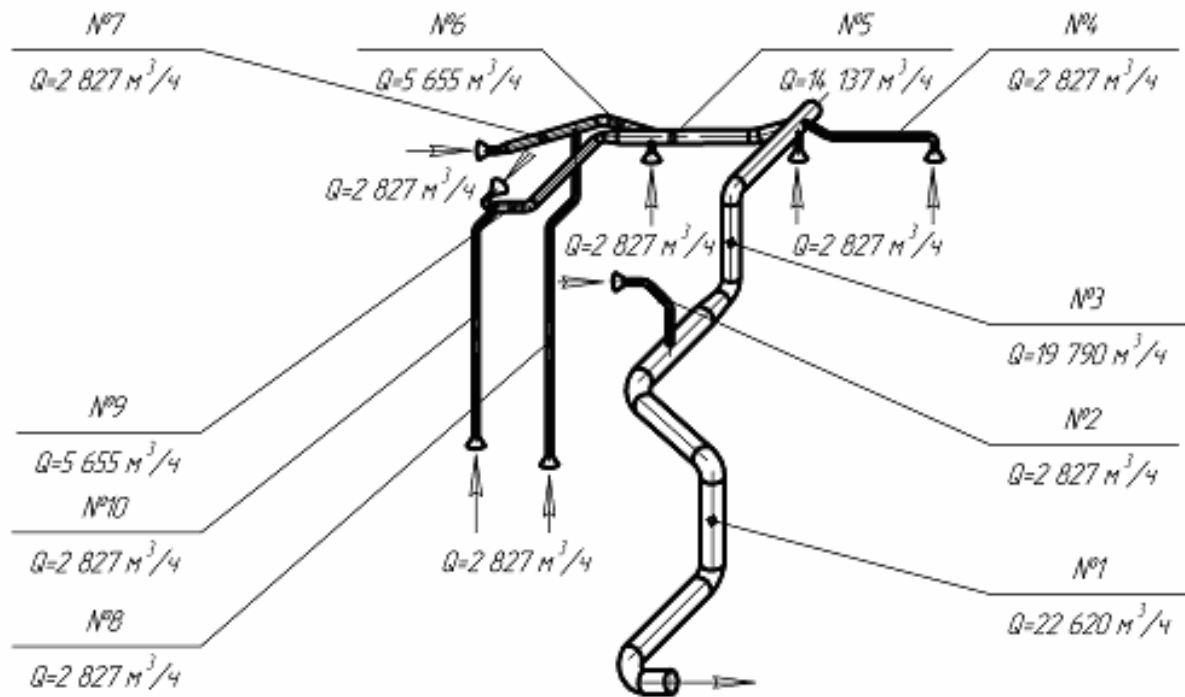


Рис. 2 – Проект аспирационной системы

При рассмотрении вариантов аэродинамических схем общие потери давления в системе на местные сопротивления (отводы, тройники, колена, задвижки, демпферы), затраты на комплектующие принимаются равными и в сравнительном анализе не учитываются.

Сравнительный анализ распределений (дифференциальное и интегральное) материалозатрат  $E$  участков воздухопроводов вариантов системы по длинам  $L$ , рассчитанных по разным методикам, графически представлен на рис. 3. Распределения во всех вариантах, кроме проектного, имеют близкие значения. Наибольшие материалозатраты - в проектном варианте (91,05 м<sup>2</sup>), материалозатраты оптимизированного варианта меньше проектного на 17% и составляет наименьшее значение (75,65 м<sup>2</sup>) среди всех вариантов систем.

Распределение материалозатрат  $E$  участков воздухопроводов системы по скоростям  $w$  потока представлено графически на рис. 4. В оптимизированном варианте скорость - в допустимом диапазоне (максимальная 25,5 м/с, минимальная 16 м/с); минимальная скорость потока в проектной системе (11,6 м/с) - вне допустимого диапазона, т.к. диаметр на участке №1 не соответствует условию (5). Для вариантов системы, рассчитанных по другим методам, скорости потока - в допустимом диапазоне, материалозатраты - ниже проектных 91,05 м<sup>2</sup> (77,53÷79,52 м<sup>2</sup>).

Таким образом, проектный вариант – наиболее затратный по материалу, скорость потока – вне допустимого диапазона. Варианты, рассчитанные по другим методикам, обеспечивают скорости потока в допустимом диапазоне и близкие значения материалозатрат, при этом оптимизированный вариант обеспечивает минимальные материалозатраты.

Таблиця 4

Проектні, расчётные и оптимизированные параметры аспирационной системы

№ участка воздуховодов	Расход поюлка $q, \text{ м}^3/\text{ч}$	Длина участка $L, \text{ м}$	Диаметр воздуховодов $d, \text{ мм}$						Скорость потока $w, \text{ м/с}$ минимально-допустимая $w_{\text{min}}=15 \text{ м/с}$ максимально-допустимая $w_{\text{max}}=26 \text{ м/с}$				Потери давления $\Delta P, \text{ Па}$				Материалозатраты $E, \text{ м}^2$							
			Минимально-допустимый	Максимально-допустимый	Проект	$\Delta P = \text{const}$	$W = \text{const}$	$P_{\text{ст}} = \text{const}$	Оптим-изированный	Проект	$\Delta P = \text{const}$	$W = \text{const}$	$P_{\text{ст}} = \text{const}$	Оптим-изированный	Проект	$\Delta P = \text{const}$	$W = \text{const}$	$P_{\text{ст}} = \text{const}$	Оптим-изированный					
1	22620	18,8	0,55	0,73	0,83	0,56	0,63	0,56	0,56	25,5	20,2	25,5	25,5	25	181	84	190	25	49,02	33,07	31,27	33,07	33,07	33,07
2	2827	3,1	0,20	0,26	0,2	0,25	0,225	0,2	0,25	19,8	19,8	19,8	19,8	104	34	57	79	104	1,95	2,43	2,19	2,19	1,95	1,95
3	19790	6	0,52	0,68	0,625	0,56	0,56	0,56	0,56	22,3	22,3	22,3	22,3	26	45	67	52	26	11,78	10,56	15,83	10,56	10,56	10,56
4	2827	4,2	0,20	0,26	0,2	0,25	0,225	0,25	0,2	19,8	19,8	19,8	19,8	141	45	77	77	141	2,64	3,30	2,97	3,30	2,64	2,64
5	14137	3,7	0,44	0,58	0,48	0,45	0,5	0,5	0,5	20,0	20,0	20,0	20,0	32	44	26	33	32	5,58	5,23	5,81	5,81	5,81	5,81
6	5655	4,1	0,28	0,37	0,32	0,315	0,315	0,315	0,28	15,9	15,9	15,9	15,9	48	52	52	48	48	4,12	4,06	4,06	4,06	4,06	3,61
7	2827	1,5	0,20	0,26	0,2	0,25	0,225	0,25	0,2	19,8	19,8	19,8	19,8	50	16	28	22	50	0,94	1,18	1,06	1,18	0,94	0,94
8	2827	9,5	0,20	0,26	0,2	0,25	0,225	0,25	0,25	19,8	19,8	19,8	19,8	319	103	175	128	319	5,97	7,46	6,72	7,46	7,46	7,46
9	5655	4	0,28	0,37	0,32	0,315	0,315	0,315	0,315	15,9	15,9	15,9	15,9	46	50	50	47	46	4,02	3,96	3,96	3,96	3,96	3,96
10	2827	8	0,20	0,26	0,2	0,25	0,225	0,25	0,225	19,8	19,8	19,8	19,8	269	86	148	108	269	5,03	6,28	5,65	6,28	5,65	5,65
$\Sigma$													450	425	404	452	450	91,05	77,53	79,52	77,87	75,65	75,65	

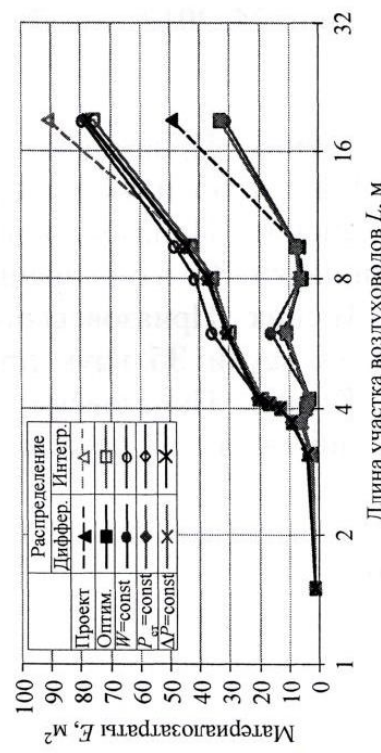


Рис. 3 – Дифференциальное и интегральное распределение материалозатрат  $E$  участков воздуховодов системы по длине  $L$

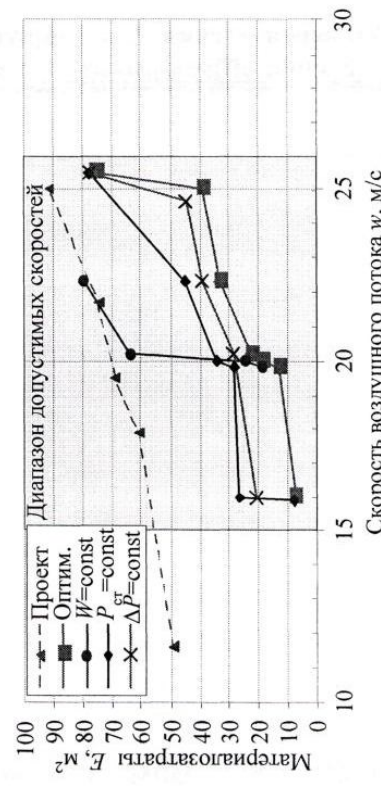


Рис. 4 – Интегральное распределение материалозатрат  $E$  участков воздуховодов системы по скоростям и потокам



**Выводы**

1. Применяемые для проектирования вентиляционных систем методы постоянной потери давления, допустимых скоростей, постоянного статического давления не обеспечивают минимальных материало затрат на воздухопроводы системы.
2. Рассмотренный метод на основе динамического программирования определяет оптимизированную аэродинамическую схему вентиляционной системы с минимальными материало затратами и выполнен в электронных таблицах как инструмент инженерного расчета и анализа вариантов вентиляционных систем.
3. С использованием метода для практического примера проекта аспирационной системы разработана аэродинамическая схема с учётом проектных ограничений со снижением на 17% материало затрат на газоходы по сравнению с проектом.

**Список использованных источников:**

1. Аэродинамический расчет воздушных сетей // Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / В.А. Ананьев [и др.]. 3-е изд. [М]: Евроклимат, 2000. Гл 6.3.4. С. 301-307.
2. Static regain method // ASHRAE Handbook: Fundamentals. SI Edition / ASHRAE. Atlanta: ASHRAE, 1997. - С. 32-19.
3. Селезнев В.Е. Применение методов динамического программирования для оптимизации режимов транспорта газов по газотранспортной сети // Методы и технологии численного моделирования газопроводных систем / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, Г.С. Клишин. – М: Едиториал УРСС, 2002. Гл 3.10.3. - С. 141-149.
4. Цаль Р.Я. Метод динамического программирования // Вычислительные машины в расчетах санитарно-технических систем / Р.Я. Цаль, Е.И. Чечик. Киев: Будівельник, 1968. С. 57-58.
5. Huei-Jiunn Chen. Process exhaust duct system design using dynamic programming methods / Huei-Jiunn Chen, Huan-Ruei Shiu, Sih-Li Chen // Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2003. Т. 26, № 2. - С. 155-164.
6. Tsal R.J. T-method duct design: Part 1. Optimization theory and T-method duct design / R.J. Tsal , H.F. Behls, R. Mangel // ASHRAE Transactions. 1988. Т. 94, Ч. 2. - С. 90-150.
7. Mathews E.H. Problems with the T-Method /E.H. Mathews, D.T. Claassen // Building and Environment. 1998. Июль. Т. 33, вып. 4. - С. 173-179.
8. Расчет потребного давления для подачи воздуха в сети // Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / под ред. А.С. Юрьева. С.-Пб: Мир и семья, 2001. Гл. 4.2.5. - С. 919-925.

**Bibliography:**

1. Aerodynamic calculation of air-ducts networks // Systems of ventilation and conditioning. Theory and practice / V.A. Ananev [and others]. 3-d ed. [M]: Evroklimat, 2000. Ch. 6.3.4. P. 301-307. (Rus.)
2. Static regain method // ASHRAE Handbook: Fundamentals. SI Edition / ASHRAE. Atlanta: ASHRAE, 1997. - P. 32.19.
3. Seleznev V.E. Use of dynamic programming methods for optimizing modes of gas transportation by gas networks // Methods and technologies of numerical modeling of gas pipeline systems / V.E. Seleznev, V.V. Aleshin, G.S. Klishin. M: Editorial URSS, 2002. Ch. 3.10.3. P. 141-149. (Rus.)
4. Tsal R.J. Dynamic programming method // Use of computers in HVAC Systems / R.J. Tsal, E.I. Chechik. Kiev: Budivelnick, 1968. - P. 57-58. (Rus.)
5. Huei-Jiunn Chen. Process exhaust duct system design using dynamic programming methods / Huei-Jiunn Chen, Huan-Ruei Shiu, Sih-Li Chen // Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2003. Vol.26, No.2. - P. 155-164.
6. Tsal R.J. T-method duct design: Part 1. Optimization theory and T-method duct design / R.J. Tsal , H.F. Behls, R. Mangel // ASHRAE Transactions. 1988. Vol. 94, Part 2. - P. 90-150.
7. Mathews E.H. Problems with the T-Method /E.H. Mathews, D.T. Claassen // Building and Environment. 1998. July. Vol. 33, issue 4. - P. 173-179.
8. Calculation of required pressure for transporting air to networks // Handbook of calculation of hydraulic and ventilation systems / ed. by A.S. Yuriev. St. Petersburg: Mir i semya, 2001. Ch.4.2.5. - P. 919-925. (Rus.)

Рецензент: А.В. Маслов

д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.05.2013