

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 697.98

DOI: 10.17673/Vestnik.2017.03.4

С. М. ПУРИНГ
Д.Н. ВАТУЗОВ
Г.И.ТИТОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ АППАРАТОВ ОЧИСТКИ В СИСТЕМАХ МЕСТНОЙ ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

OPTIMIZING THE CHOICE OF VENTILATING AIR CLEANING EQUIPMENT IN SYSTEMS OF LOCAL EXHAUST VENTILATION

В статье указано, что функционирование промышленных зданий невозможно без правильно организованной системы вытяжной вентиляции, работа которой обеспечивает не только тепловлажностный режим, но и чистоту воздуха в помещении. Определено, что эффективность работы системы вентиляции подразумевает соблюдение технических параметров, а также установку аппаратов очистки. Выявлена целесообразность использования многокритериальной оптимизации при выборе характеристик очистного аппарата. Предложено выбрать оптимального варианта аппарата выполнить с использованием обобщенной функции желательности Харрингтона. В результате проведенного многокритериального анализа выявлены оптимальные характеристики аппаратов очистки, основываясь на требуемой степени очистки воздуха, геометрических размерах аппарата и аэродинамическом сопротивлении при внедрении конкретного устройства.

Ключевые слова: вентиляционные выбросы, аппарат очистки воздуха, эффективность очистки, габариты аппарата, аэродинамическое сопротивление, критерий оптимальности

Functioning of industrial buildings is impossible without correctly organized ventilation system. Its work both regulates heat moist mode and the required indoor air purity that is cleaned with the help of air cleaning equipment. To make decision to construct the required air cleaning equipment at the enterprise it is worthwhile to give additional parameters and to solve a problem of multicriteria optimization to get the best results. The choice of the best variant is supposed to be carried out using Harrington's desirability function. The conducted multicriteria analysis allowed to reveal optimum characteristics of air cleaning equipment, based on the required purification air degree, the geometrical sizes of the equipment and aerodynamic resistance while introducing any particular device.

Keywords: ventilating emissions, air cleaning equipment, purification efficiency, device dimensions, economic efficiency, aerodynamic resistance, optimum criteria

Среди множества аспектов, определяющих состояние окружающей среды, особое место занимают проблемы охраны атмосферного воздуха (СанПиН 2.1.6.1032-01. Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест). Значительный вклад в загрязнение атмосферы вносят вентиляционные выбросы промышленных предприятий, содержащие твердые или жидкие взвешенные частицы. Неотъемлемой частью природоохранных мероприятий является разработка технологических процессов и оборудования, предназначенных для снижения выбросов от существующих промышленных источников, т.е. очистка вентиляционных выбросов от аэрозолей.

С другой стороны, функционирование промышленных предприятий невозможно без правиль-

но организованной системы вентиляции, работа которой обеспечивает не только регламентируемый тепловлажностный режим (СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха), но и требуемую чистоту воздуха в помещении (СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений). Для повышения эффективности работы вентиляционной системы целесообразно в ее составе предусматривать установку аппаратов очистки воздуха [1,2], особенно от высокодисперсных аэрозольных частиц с размерами менее 1 мкм, оказывающих наиболее неблагоприятное воздействие на организм человека [3–8].

Эффективность использования аппаратов очистки вентиляционных выбросов от аэрозолей субмикронных размеров в значительной степени

определяется их стоимостью, удобством и экономичностью монтажа и эксплуатации, возможностью возвращения уловленного сырья в производство.

При использовании для очистки вентиляционных выбросов аппаратов, принцип действия которых основан на осаждении высокодисперсных частиц в тонких трубках и щелевых каналах [9–12], параметрами, характеризующими эффективность работы аппарата, являются степень очистки воздуха, геометрические характеристики и аэродинамическое сопротивление (потери давления) аппарата:

$$\eta = f(L/D; \Delta p), \quad (1)$$

где η – эффективность очистки, %; L – длина осадительного элемента, м; D – диаметр трубки, м (в каналах – эквивалентный диаметр D_3); Δp – аэродинамическое сопротивление, Па.

Исследования показали [5–8], что добиться заданной величины эффективности очистки возможно комбинацией пар значений $(L/D; \Delta p)$. Наибольший интерес представляют значения в диапазоне $\eta \geq 90\%$. Для одинакового значения эффективности очистки увеличение значения L/D ведет к уменьшению потерь давления Δp . Задачей является нахождение оптимального сочетания значений L/D и Δp , дающего максимальный эффект, т.е. необходимо решить задачу многокритериальной оптимизации [13].

Реализовать принцип оптимальности – это значит решить экстремальную задачу вида:

$$\begin{aligned} & \max(\min) f(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ & \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_i, \quad i = 1, m, \\ & x_j \geq 0, \quad j = 1, n, \end{aligned} \quad (2)$$

где $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – целевая функция, включающая в себя критерий оптимальности; $x_j, j = 1, n$ – набор управляющих переменных; $\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_i, i = 1, m$ – система ограничений.

Для решения многокритериальных задач используются различные методы определения обобщенного показателя оптимальности. В случае разноразмерных критериев оптимизацию возможно выполнить с использованием обобщенной функции желательности Харрингтона $d(x)$. Она возникла в результате наблюдений за реальными решениями экспериментаторов и обладает свойствами непрерывности, монотонности и гладкости. Значимые параметры пересчитываются в числовые значения, а затем определяется общий показатель [14–16].

Шкала Харрингтона устанавливает соответствие между лингвистическими оценками желательности значений показателя x и числовыми интервалами $d(x)$. Возможно ограничиться тремя градациями шкалы Харрингтона, отвечающими лингвистическим категориям «плохо», «удовлетворительно», «хорошо». В этом случае область, соответствующая уровню «удовлетворительно», находится в диапазоне

от 0,37 до 0,69, а области «плохо» и «хорошо» характеризуются интервалами (0,00; 0,37) и (0,69; 1,00) соответственно.

Аналитически для монотонных по предпочтениям критериев функция желательности Харрингтона задается следующей формулой:

$$\begin{aligned} d_i &= d(z_i) = \exp(-\exp(-z_i)), \\ z_i &= (x_i - x_{i0}) / (x_{i1} - x_{i0}), \end{aligned} \quad (3)$$

где z_i – кодированные значения i -го показателя, представляющие собой безразмерные величины; x_i – значение i -го информативного показателя; x_{i0} и x_{i1} – границы области «удовлетворительно» в исходной шкале.

Введение шкалы желательности позволяет свести исходную многокритериальную задачу принятия решения с разноразмерными критериями к многокритериальной задаче с критериями, измеряемыми в одной и той же шкале, поэтому следующим этапом является свертка частных функций желательности d_i в обобщенный критерий желательности.

$$f(d_1, d_2, \dots, d_n) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}. \quad (4)$$

Таким образом, задача оптимизации по критерию «максимум эффекта» математически запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} & \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i} \rightarrow \max, \\ & 0,368 \leq d_i \leq 0,692, \quad i = 1, n, \\ & d_i = d(z_i) = \exp(-\exp(-z_i)), \\ & z_i = z_i(x) = (x_i - x_{i\min}) / (x_{i\max} - x_{i\min}). \end{aligned} \quad (5)$$

Для поиска оптимального сочетания геометрических размеров осадительного элемента, аэродинамического сопротивления аппарата и его коэффициента эффективности очистки целесообразно найти обобщенный критерий желательности, пользуясь следующими критериями:

- эффективность очистки: диапазон изменения критерия находится в промежутке $\eta \in (90; 98)$;
- геометрические размеры осадительного элемента: диапазон изменения $L/D \in (175; 300)$;
- аэродинамическое сопротивление : диапазон изменения $\Delta p \in (800; 2200)$.

По этим показателям сравниваются различные сочетания пар значений $(L/D; \Delta p)$, определяющие характеристику конструируемого аппарата очистки. Конкретные параметры сравниваемых вариантов, соответствующих определенным парам значений $(L/D; \Delta p)$, распределяются на промежутке эффективных значений шкалы частных показателей. Затем соответствующие им показатели пересчитываются

в отметки на шкале желательности (рис.1). Полученное значение d_i для i -го параметра пересчитывается вместе с другими в обобщенный коэффициент желательности.

Функция желательности для эффективности очистки (табл. 1)

d_1 – критерий, зависящий от эффективности очистки;

$$x_{1max} = 98 \text{ и } x_{1min} = 90; z_1 = (x_1^j - 90)/(98 - 90);$$

x_1^j – значения коэффициента эффективности очистки, $x_1^j \in [90; 98]; j = 1, m$.

Функция желательности для геометрических размеров осадительного элемента (табл. 2)

d_2 – параметр, зависящий от геометрических размеров осадительного элемента L/D ;

$$x_{2max} = 175 \text{ и } x_{2min} = 300;$$

$$z_2 = (x_2^k - 300)/(175 - 300);$$

x_2^k – значения величины L/D , $x_2^k \in (175; 300)$.

Функция желательности для аэродинамического сопротивления (табл. 3)

d_3 – параметр, зависящий от аэродинамического сопротивления, Δp ;

$$x_{3max} = 2200 \text{ и } x_{3min} = 800;$$

$$z_3 = (x_3^m - 800)/(2200 - 800);$$

x_3^m – значения величины Δp , $\Delta p \in (800; 2200)$.

Обобщенный критерий желательности (табл. 4, рис. 2)

$$\sqrt[3]{\prod_{i=1}^3 d_i} \rightarrow \max. \quad (6)$$

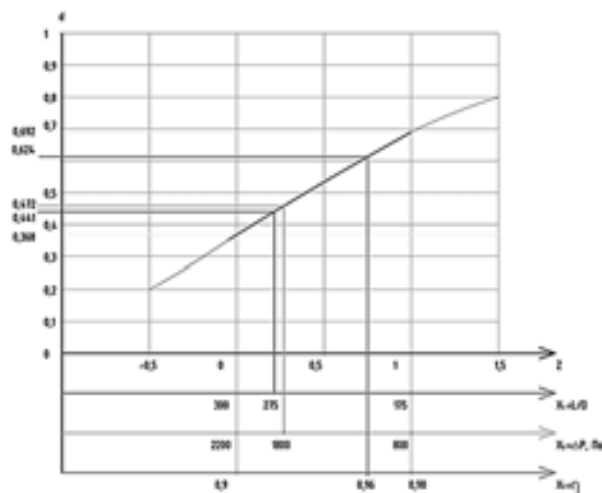


Рис.1. Определение частных значений желательности

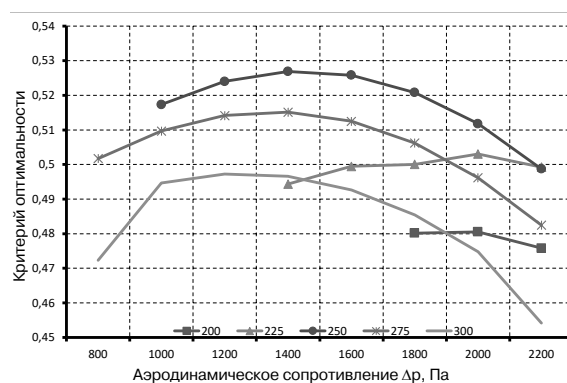


Рис.2. Значения обобщенного критерия оптимальности

Таблица 1

Значения функции желательности для эффективности очистки

Эффективность очистки	Кодированное значение	Функция желательности
x_1	z_1	d_1
90	0	0,367879
91	0,125	0,413749
92	0,25	0,458956
93	0,375	0,502938
94	0,5	0,545239
95	0,625	0,585516
96	0,75	0,623525
97	0,875	0,659112
98	1	0,692201

Таблица 2

Значение функции желательности для геометрических размеров осадительного элемента

Значение L/D	Кодированное значение	Функция желательности
x_2	z_2	d_2
175	1	0,692201
200	0,8	0,638056
225	0,6	0,577636
250	0,4	0,511545
275	0,2	0,440991
300	0	0,367879

Таблица 3

Значение функции желательности для аэродинамического сопротивления

Значение L/D	Кодированное значение	Функция желательности
x3	z3	d3
800	1	0,692201
1000	0,857143	0,65418
1200	0,714286	0,612907
1400	0,571429	0,56852
1600	0,428571	0,521295
1800	0,285714	0,471669
2000	0,142857	0,420262
2200	0	0,367879

Таблица 4

Значения обобщенного критерия оптимальности

ΔP, Па	Отношение L/D					
	175	200	225	250	275	300
800	η<90 %				0,502	0,472
1000				0,517	0,510	0,495
1200				0,524	0,514	0,497
1400				0,494	0,527	0,515
1600		0,499	0,526	0,512	0,493	
1800		0,480	0,500	0,521	0,506	0,485
2000		0,481	0,503	0,512	0,496	0,475
2200	0,454	0,476	0,499	0,499	0,482	0,454

Проведенный многокритериальный анализ позволил выявить оптимальные геометрические характеристики осадительных элементов и соответствующего им аэродинамического сопротивления. Согласно выполненным расчетам лучший результат наблюдается при значении $L/D = 250$ и аэродинамическом сопротивлении Δp в диапазоне от 1200 до 1600 Па).

Выводы. Учитывая, что на современном этапе в индустриально развитых странах функционирование промышленного предприятия включает в себя комплекс технических и организационных мер, прямо или косвенно направленных на прекращение или уменьшение загрязнения атмосферы, актуально повышение эффективности работы вентиляционных систем путем установки аппаратов очистки. Получаемый экономический результат является не единственным критерием выбора аппарата очистки, и для определения максимальной эффективности целесообразно учитывать различные параметры, характеризующие аппарат, такие как степень очистки выбросов, аэродинамическое сопротивление и габаритные размеры используемого аппарата. Таким образом, проведенные исследования позволили рассчитать обобщенный критерий оптимальности, определяющий наиболее значимые геометрические параметры аппаратов очистки воздуха и их оптимальный режим работы в составе вентиляционной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егизаров А. Г. Устройство и изготовление вентиляционных систем. М.: Высш. шк., 1987. 167 с.
2. Рекомендации по проектированию очистки воздуха от пыли в системах вытяжной вентиляции. М.: Стройиздат, 1985. 21 с.
3. Ватузов Д.Н., Пуринг С.М. Методика подбора и расчета аппаратов очистки воздуха от капельных аэрозолей // Градостроительство и архитектура. 2016. №2(23). С. 14–18. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.02.3.
4. Ватузов Д.Н., Пуринг С.М., Хурин И.А. Совершенствование устройств очистки вентиляционных выбросов загрязняющих веществ при производстве изделий из пластмасс // Экология и промышленность России. 2013. № 8. С. 22–26.
5. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. К вопросу о конструировании аппаратов для очистки воздуха // Научное обозрение. 2014. № 4. С. 94–97.
6. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Очистка воздуха от мелкодисперсных капельных аэрозолей // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. Энергосбережение. 2014. № 1. С. 109–111.
7. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Экспериментальные исследования по определению конструктивных особенностей аппаратов по очистке воздуха от субмикронных частиц // Научное обозрение. 2014. № 4. С. 90–93.
8. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Экспериментальные исследования – основа проектирования устано-

вок по очистке воздуха от тонкодисперсных частиц // Международный научно-исследовательский журнал = Research Journal of International Studies. 2014. № 1 (20). Ч. 1. С. 40–43.

9. Пластинчатый сепаратор аэрозоля: пат. 2246340 Рос. Федерация. № 2002135269/15; заявл. 25.12.02; опубл. 20.02.05, Бюл. №5.

10. Коаксиальный сепаратор капельного аэрозоля: пат. 2327508 Рос. Федерация. № 2007100310/15; заявл. 09.01.07; опубл. 27.06.08, Бюл. №18.

11. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980. 101 с.

12. Сепаратор туманов с изогнутыми пластинчатыми осадительными элементами: пат. 2259861 Рос. Федерация. № 2002135268/15; заявл. 25.12.02; опубл. 10.09.05, Бюл. №25.

13. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. М.: Машиностроение – 1, 2004. 37 с.

14. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 157 с.

15. Ахназарова С.А., Гордеев Л.С. Использование функции желательности Харрингтона при решении оптимизационных задач химической технологии: учебно-методическое пособие. М.: РХТУ им. Д.С. Менделеева, 2003. 177 с.

Об авторах:

ПУРИНГ Светлана Михайловна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Архитектурно-строительный институт 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194, тел. (902) 3364013 E-mail: Puring@mail.ru

ВАТУЗОВ Денис Николаевич

старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Архитектурно-строительный институт 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194, тел. (927) 6580087 E-mail: Vatuzov74@mail.ru

ТИТОВ Геннадий Иванович

профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Архитектурно-строительный институт 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194, тел. (927) 2083724

16. Puring S.M., Vatuzov D.N., Tyurin N.P. Parameter choice optimization of ventilating air cleaning equipment while designing and constructing industrial buildings // Procedia Engineering. 2016. Т. 153. P. 563–568.

PURING Svetlana M.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University Institute of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194, tel. (902) 3364013 E-mail: Puring@mail.ru

VATUZOV Denis N.

Senior Lecturer of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University Institute of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194, tel. (927) 6580087 E-mail: Vatuzov74@mail.ru

TITOV Gennady I.

Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University Institute of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194, tel. (927) 2083724

Для цитирования: Пуринг С.М., Ватузов Д.Н., Титов Г.И. Оптимизация выбора параметров аппаратов очистки в системах местной вытяжной вентиляции // Градостроительство и архитектура. 2017. Т.7, №3. С. 19-23. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.03.4. For citation: Puring S.M., Vatuzov D.N., Titov G.I. Optimization of choice of ventilating air cleaning equipment in systems of local exhaust ventilation // Urban Construction and Architecture. 2017. V.7, 3. Pp. 19-23. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.03.4.