

## РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ ОКРАСОЧНО-СУШИЛЬНЫХ КАМЕР ДЛЯ РЕМОНТНОЙ ОКРАСКИ АВТОМОБИЛЕЙ

В статье представлены результаты исследования по разработке методики расчета системы вентиляции окрасочно-сушильных камер, используемых при ремонтной окраске автомобилей. Новизной является подход к обоснованию и использованию коэффициента согласования вентиляторов окрасочно-сушильных камер в двухмоторном исполнении.

Ключевые слова: автомобиль, окраска, окрасочно-сушильная камера, вентиляция, вентилятор, фильтр.

Целесообразность использования окрасочно-сушильных камер (ОСК) в условиях автосервисных предприятий обусловлена требованиями технологического процесса создания лакокрасочных покрытий. Для получения качественного покрытия необходимо поддерживать в зоне проведения работ специальный микроклимат, который характеризуется: температурой; направлением и скоростью движения воздушных потоков; степенью чистоты воздуха от твердых примесей; освещением.

Воздушный поток в рабочей кабине ОСК создают вентиляторы (рисунок 1), которые разделены на два блока: приточной и вытяжной вентиляции. В отдельных случаях в целях уменьшения стоимости производители комплектуют ОСК только одним приточным вентилятором.

От характеристик вентиляторных установок (ВУ) зависят характер движения воздуха, давление, скорость и кратность воздушного потока. Чем больше мощность ВУ, тем выше кратность воздухообмена, выше скорость движения воздуха, полнее используется ресурс фильтров. Однако ВУ более высокой мощности имеют большую стоимость, потребляют больше энергии в процессе эксплуатации, а увеличение интенсивности воздухообмена способствует ускоренной выработке ресурса фильтров. Поэтому является актуальным разработка рекомендаций по обоснованному выбору комплектаций ОСК, в частности вентиляторных установок, позволяющих обеспечивать оптимальные эксплуатационные и энергетические характеристики для конкретных производственных условий.

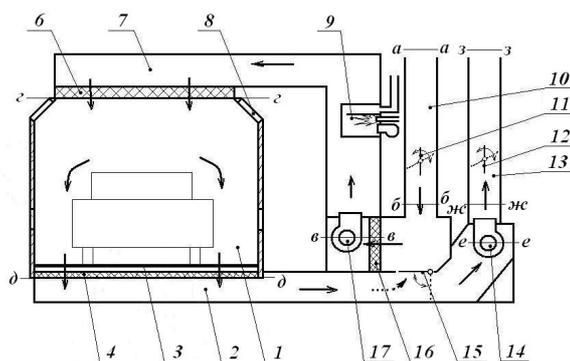
Если известна площадь рабочей камеры, то, задаваясь скоростью потока воздуха, можно определить требуемую производительность

системы вентиляции окрасочно-сушильной камеры

$$Q = 3600Sv, \quad (1)$$

где  $Q$  – требуемая производительность вентиляции, м<sup>3</sup>/час;  $S$  – площадь камеры, м<sup>2</sup>;  $v$  – скорость воздушного потока, м/с.

При подсчете с использованием зависимости (1) для наиболее распространенных окрасочно-сушильных камер, предлагаемых современными производителями, имеющих площадь  $S$  от 24 до 28 м<sup>2</sup> и паспортную производительность вентиляции от 18 000 до 26 000 м<sup>3</sup>/час, можно получить значения скоростей потока от 0,18 до 0,26 м/сек. Существует тенденция к установлению более высоких значений скорости воздушных потоков, особенно при работе с лакокрасочными материалами (ЛКМ) на водной основе, с 2-компонентными органосодержащи-



1 – рабочая камера; 2 – вентиляционный колодез; 3 – решетки пола; 4 – напольный фильтр; 6 – потолочный фильтр; 7 – надпотолочное пространство (пленум); 8 – осветительные панели; 9 – теплогенератор; 10 – канал притока воздуха; 11 – входная заслонка; 12 – выходная заслонка; 13 – канал удаления отработанного воздуха; 14 – вентилятор вытяжной вентиляции; 15 – заслонка рециркуляции; 16 – предварительный фильтр; 17 – вентилятор приточной вентиляции; а-а, ...з-з – расчетные сечения

Рисунок 1. Схема окрасочно-сушильной камеры

ми ЛКМ и ЛКМ, содержащими вредные примеси [3]. В связи с этим наиболее часто встречаются рекомендации по обеспечению скорости потока не менее 0,3 м/сек.

Полное давление  $p$ , Н/м<sup>2</sup>, в рабочей камере, создаваемое вентиляторами, определяется как [1]

$$\pm p = \pm p_{ст} + p_{дин}. \quad (2)$$

где  $p_{ст}$  – статическое давление, характеризующее удельную потенциальную энергию движения воздуха, Па;  $p_{дин}$  – динамическое, или скоростное, давление, характеризующее удельную кинетическую энергию движения потока воздуха с определенной скоростью, Па.

Необходимое минимальное положительное значение статического давления воздуха определяется из необходимости создания избыточного давления в рабочей камере ОСК для предотвращения подсосывания неочищенного воздуха через неплотности стыков рабочей камеры. Излишнее увеличение давления также следует считать нежелательным, т.к. это приводит к увеличению нагрузок на стенки ОСК и соответственно снижению ресурса конструкции.

При работе вентилятор развивает полное давление, необходимое для преодоления сопротивления воздушной сети ОСК. Для подбора вентилятора методом наложения характеристик необходимо графически построить характеристику сети (зависимость суммарных потерь давления  $p$  воздуха в сети от производительности  $Q$ ). Для этого необходимо выделить в общей конструкции ОСК характерные участки движения потока воздуха, разделяя их сечениями, характеризующимися максимальным количеством известных величин (в нашем случае такими сечениями могут быть  $a-a, \dots, z-z$ , рисунок 1) [1, 2]. Тогда в общем виде зависимость  $p$  от  $Q$  для ОСК с одним приточным вентилятором можно представить в виде:

$$p = \sum \left( l_i \frac{\lambda}{d_{vi}} + \sum \zeta \right) \frac{\rho V_i^2}{2} + p_{прф} + p_{пф} + p_{нф}, \quad (3)$$

где  $l_i$  – длина расчетного участка, м;  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трения;  $d_{vi}$  – эквивалентный диаметр расчетного участка, м;  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $V_i$  – скорость движения потока воздуха на расчетном участке, м/с;  $p_{прф}, p_{пф}, p_{нф}$  – потери давления соответственно на предварительном, потолочном и напольном фильтрах, Па.

Характеристики фильтров не являются постоянными и изменяются в процессе эксплуатации. Интенсивность изменения их состояния зависит от режимов работы ОСК, качества подаваемого воздуха, материала фильтров, производительности вентиляции и многих других факторов. При этом сопротивление фильтра зависит от удельной нагрузки, пылеемкости, сопротивления потоку воздуха и пропускной способности фильтра. Для каждого случая эти показатели определяются экспериментальным способом и представляются в каталогах фирм производителей в виде начального и конечного сопротивлений при определенной удельной воздушной нагрузке. В общем виде переменное полное сопротивление фильтра можно представить в виде [4]:

$$P_{иф}(t) = \Delta p_{iG} + \Delta p_{iQ}, \quad (4)$$

где  $\Delta p_{iG}$  – зависимость изменения сопротивления фильтра от количества задержанной пыли;  $\Delta p_{iQ}$  – зависимость изменения сопротивления чистого фильтра от производительности вентиляции.

При работе только вентилятора приточной вентиляции статическое давление в рабочей камере будет равно потерям давления на участке воздуховода от напольного фильтра до выходного сечения канала удаления отработавшего воздуха, включая сопротивление напольного фильтра и потери давления на удар, равный динамическому давлению воздуха на данном участке. Поэтому при такой комплектации ОСК статическое давление в рабочей камере будет увеличиваться по мере заполнения напольного фильтра. В некоторых случаях для компенсации изменения статического давления в рабочей камере используют выходную заслонку, переменное сопротивление которой будет определяться по следующей зависимости:

$$p_z(t) = p_{нф.max} - p_{нф}(t), \quad (5)$$

где  $P_{нф.max}$  – максимальное сопротивление напольного фильтра, Па;  $P_{нф}(t)$  – сопротивление напольного фильтра для рассматриваемого момента времени, Па.

Тогда полное давление, создаваемое вентилятором приточной вентиляции, можно представить в следующем виде:

$$P_{нс}(t) = \sum P_l + \sum P_{фи}(t) + \sum P_{гг} + P_{р.к.} + P_y + P_z(t), \quad (6)$$

где  $P_{нс}(t)$  – полное давление, создаваемое вентилятором приточной вентиляции для рас-

смаатриваемого момента времени, Па;  $Sp_l$  – суммарные потери давления от сопротивления трения о внутренние стенки воздуховода ОСК, Па;  $p_{\phi_i}(t)$  – сопротивление  $i$ -го воздушного фильтра для рассматриваемого момента времени, Па;  $p_{\xi_i}$  – потери давления в  $i$ -м фасонном элементе воздушной сети (местном сопротивлении), Па;  $p_{p.k.}$  – потери давления от сопротивления трения в рабочей камере, Па;  $p_y$  – потери на удар при выходе воздушного потока в атмосферу, Па.

Все составляющие выражения (6) являются величинами переменными и зависят от состояния фильтров, характеристик вентиляторов и производительности вентиляции для рассматриваемого момента времени.

В случае использования двухмоторной схемы вентиляции рабочая камера располагается на участке воздушной сети ОСК между вентиляторами приточной и вытяжной вентиляции. В этом случае вентилятор приточной вентиляции создает в рабочей камере положительные динамическое и статическое давления. Вытяжной вентилятор, в свою очередь, будет создавать в рабочей камере отрицательное статическое давление. В этом случае действительное статическое давление в рабочей камере, в зависимости от текущего состояния фильтров, характеристики воздушной сети ОСК и рабочих характеристик вентиляторов, может принимать как положительное, так и отрицательное значения. Выход величины статического давления в область отрицательных значений (разрежение) неминуемо приводит к подосу пыли из неплотностей стыков стеновых панелей рабочей камеры и появлению брака в работе. Поэтому характеристики вентилятора вытяжной вентиляции должны быть подобраны и согласованы с вентилятором приточной вентиляции с таким расчетом, чтобы при всех режимах работы статическое давление в рабочей камере имело минимальное положительное значение.

Суммарное давление, создаваемое двумя вентиляторами, установленными последовательно и работающими на одну сеть, определяются сложением их индивидуальных характеристик при равной производительности [1]. Тогда, пренебрегая потерями воздуха на неплотностях стыков, выражение (6) для ОСК с двухмоторным исполнением преобразуем к следующему виду:

$$p_{ns}(t) + p_{os}(t) = \sum p_l + \sum p_{\phi_i}(t) + \sum p_{\xi_i} + p_{p.k.} + p_y + p_z(t), \quad (7)$$

где  $p_{BB}(t)$  – полное давление, создаваемое вентилятором вытяжной вентиляции для рассматриваемого момента времени, Па.

Граница перехода статического давления от положительного значения к отрицательному может занимать различные положения в зависимости от состояния фильтров, геометрических параметров воздухопроводов, рабочих характеристик вентиляторов и объекта окраски, находящегося в рабочей камере. Оптимальным с точки зрения обеспечения технологических режимов и ресурса ОСК является нахождение зоны перехода в объеме напольного фильтра. Тогда, принимая статическое давление в этой зоне равным атмосферному, можем представить выражение (7) в виде следующих двух зависимостей:

$$p_{ns}^o(t) = \Delta p_{np.\phi.}(t) + \Delta p_{nom.\phi.}(t) + p_l^{ns} + \sum p_{\xi_i}^{ns} + p_{p.k.} + p_c, \quad (8)$$

$$p_{os}^o(t) = \Delta p_{n.\phi.}(t) + p_l^{os} + \sum p_{\xi_i}^{os} + p_y + p_z - p_c, \quad (9)$$

где  $p_{ns}^o(t)$  и  $p_{os}^o(t)$  – функции изменения значения полного давления, развиваемого соответственно нагнетающим и вытяжным вентиляторами по времени, обеспечивающие оптимальные значения потока воздуха в рабочей камере, Па;  $\Delta p_{np.\phi.}(t)$  – функция изменения сопротивления предварительного фильтра по времени, Па;  $\Delta p_{nom.\phi.}(t)$  – функция изменения сопротивления потолочного фильтра по времени, Па;  $p_l^{ns}$  и  $p_l^{os}$  – соответственно потери давления на сопротивление трения о внутренние стенки воздухопроводов от входного сечения канала притока воздуха до рабочей камеры и от рабочей камеры до выходного сечения канала удаления воздуха, Па;  $\sum p_{\xi_i}^{ns}$  и  $\sum p_{\xi_i}^{os}$  – суммарные потери давления на фасонных элементах соответственно на участках воздухопроводов от входного сечения канала притока воздуха до рабочей камеры и от рабочей камеры до выходного сечения канала удаления воздуха, Па;  $\Delta p_{n.\phi.}(t)$  – функция изменения сопротивления напольного фильтра по времени, Па;  $p_c$  – скоростной напор на границе перехода, Па.

Учитывая, что в любом случае оба вентилятора перемещают один и тот же объем воздуха, можно выражения (8) и (9) представить в виде следующего отношения [5]:

$$\frac{P_{вв}^o(t)}{P_{нев}^o(t)} = \frac{\Delta p_{и.ф.}(t) + P_{л}^{вв} + \sum P_{з}^{вв} + p_{у} + p_{з} - P_{с}}{\Delta p_{пр.ф.}(t) + \Delta p_{пот.ф.}(t) + P_{л}^{нев} + \sum P_{з}^{нев} + P_{р.к.} + P_{с}} = K, \quad (10)$$

где  $K$  – коэффициент согласования вентиляторных установок (СВУ).

Полученный коэффициент характеризует отношение полных давлений, создаваемых вентиляторами вытяжной и приточной вентиляции, при котором в рабочей камере обеспечивается минимальное положительное значение избыточного давления воздуха. Учитывая, что оба вентилятора имеют одинаковую фактическую производительность, можно констатировать, что полученный коэффициент  $K$  отражает соотношение мощностей, потребляемых вентиляторными установками ОСК. Выражение (10) позволяет моделировать различные состояния воздушной сети ОСК, получая для каждого случая оптимальные характеристики вентиляторных установок.

На рисунке 2 представлен график зависимости коэффициента  $K$  от времени работы в пределах полного цикла эксплуатации фильтров (предварительного и напольного – 120 часов, потолочного – 1200 часов) для системы вентиляции ОСК SAIMA Gamma.

Циклическая кривая на графике отражает изменение значения отношения потребляемых мощностей вентиляторов, удовлетворяющее условию обеспечения минимального значения избыточного давления в рабочей камере без использования заслонки регулирования. Отношение установленной мощности ВУ должно соот-

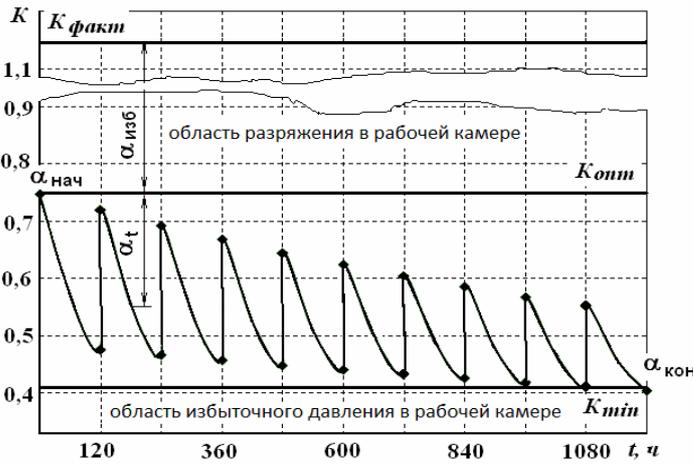


Рисунок 2. Зависимость коэффициента СВУ от времени работы ОСК

ветствовать значению  $K_{опт}$  на графике, а выполнение требования минимизации избыточного давления в рабочей камере в каждый конкретный момент времени будет обеспечиваться поворотом заслонки регулирования на угол  $\alpha_{раб} = \alpha_t$  в диапазоне от  $\alpha_{нач}$  до  $\alpha_{кон}$ .

В случае оснащения ОСК вентиляторными установками, соотношение установленных мощностей которых составляет  $K_{факт}$ , превышающее значение  $K_{опт}$ , заслонку регулирования необходимо поворачивать на дополнительный угол  $\alpha_{изб}$ , соответствующий значению избыточной мощности вытяжной вентиляторной установки. Тогда рабочий угол заслонки будет составлять  $\alpha_{раб} = \alpha_t + \alpha_{изб}$ .

Для системы вентиляции ОСК SAIMA Gamma с  $K_{факт} = 1,15$  расчет по выражению (10) дает  $K_{опт} = 0,748$ , что соответствует избыточной мощности вытяжного вентилятора  $N_{изб} = 3,216$  кВт. Для его компенсации ОСК функционирует с постоянным начальным значением угла поворота заслонки  $\alpha_{изб} = 21,3^\circ$ .

Полученный коэффициент согласования позволяет производить выбор вентиляторных установок с оптимальными характеристиками на стадии проектирования или модернизации ОСК, который описывается следующей последовательностью (рисунок 3):

- 1) построение характеристики воздушной сети ОСК в координатах  $Q-p$  (кривая 1, рисунок 3);
- 2) расчет коэффициента  $K$  для данной ОСК;
- 3) определение положения рабочей точки  $(T)$  на характеристике воздушной сети;

- 4) определение величины давления, создаваемого вентилятором приточной вентиляции  $P_{нев}$  в точке

$$H = \frac{T}{1+K},$$

расположенной на ординате, опущенной из рабочей точки  $T$ ;

- 5) выбор характеристики вентилятора приточной вентиляции (кривая 3, рисунок 3), проходящей через точку  $H$ ;

- 6) расчет величины давления  $p_{вв}$ , создаваемого вентилятором вытяжной вентиляции, равной  $B = H \times K$ ;

- 7) выбор характеристики вентилятора вытяжной вентиляции (кривая 2, рисунок 3), пересекающей ординату, опущенную из рабочей точки  $T$  в точке  $B$ ;

8) построение суммарной характеристики вентиляторных установок (кривая 4).

Использование предлагаемой методики позволяет производить обоснованный выбор характеристик вентиляторов ОСК, обеспечивающих требуемые технологические режимы вентиляции при минимальных энерго- и ресурсозатратах, что позволит снизить стоимость работ по окраске и сушке восстановленных кузовов автомобилей. Расчет изменения коэффициента согласования вентиляторных установок в течение цикла эксплуатации фильтров позволит задать алгоритм управления выходной заслонкой в режиме реального времени, обеспе-

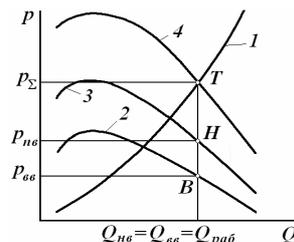


Рисунок 3. Подбор характеристик вентиляторов ОСК с помощью коэффициента  $K$

чивающего стабильность технологических режимов и качество производимых с использованием ОСК работ.

16.05.2011

#### Список литературы:

1. Вахвахов, Г. Г. Работа вентиляторов в сети [Текст] / Г. Г. Вахвахов. – М.: Стройиздат, 1975. – 104 с.
2. Аэродинамический расчет окрасочно-сушильных камер: сборник докладов Шестой российской научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в транспортных системах» / Р.С. Фаскиев, Е.Г. Кеян. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. С. 224-226.
3. Лакокрасочные покрытия в машиностроении. Справочник. Изд. 2-е, переработ. и доп. Под ред. канд. техн. наук М.М. Гольдберга. – М.: Машиностроение, 1974. – 576 с.
4. Пирумов, А.И. Обеспыливание воздуха / А.И. Пирумов. – М.: Стройиздат, 1974. – 208 с.
5. Снижение энергоемкости оборудования для ремонтной окраски и сушки автомобилей / Е.В. Бондаренко, Р.С. Фаскиев, М.Р. Фазуллин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2009. – №4. – С. 74-78.

Сведения об авторе:

**Фаскиев Риф Сагитович**, доцент кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей транспортного факультета Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент

460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, тел. (3532) 757771, e-mail: rif@house.osu.ru

#### UDC 629.3.083.4

#### Faskiyev R.S.

Orenburg state university, e-mail: rif@house.osu.ru

#### CALCULATION OF VENTILATION SYSTEM OF PAINT-DRYING CHAMBERS FOR REPAIR CAR PAINTING

The article presents the results of the study on the development of methods for calculating of ventilation of paint-drying chambers used in the repair of car painting. Novelty is the approach to justification and use of rate of harmonization of fans of paint-drying in double-engine performance.

Key words: car, painting, paint-drying, ventilation, fan filter.

#### Bibliography:

1. Vahvahov, G. G. Work of fans in networks [Text] / Vahvahov G. G.: Stroyizdat, 1975. – 104 pages.
2. Estimated aerodynamic spray-drying chambers: collection of reports sixth Russia scientific and technical conference «Progressive technologies in transport systems» / R.S.Faskiev, E.G.Keyan – Orenburg: Orenburg State University, 2003, pages 224-226.
3. Paint-and-lacquer coating in a mechanical engineering. Reference manual. Two edition, revised and complemented. Edited by M.M.Golberga. – M.: Mechanical engineering, 1974. – 576 pages.
4. Pirumov, A.I. Air dedusting / A.I.Pirumov. – M.: Stroyizdat, 1974. -208 pages.
5. Reduction energy-intensive of equipment for repair car painting and drying of car / E.V. Bondarenko, R.S.Faskiev, M.R.Faizullin // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2009. – №4. – С. 74-78.