

МОНИТОРИНГ РЕЖИМОВ ВЕНТИЛЯЦИИ ОКРАСОЧНО-СУШИЛЬНЫХ КАМЕР ДЛЯ РЕМОНТНОЙ ОКРАСКИ АВТОМОБИЛЕЙ

В статье представлены результаты исследования по разработке методики мониторинга режимов вентиляции окрасочно-сушильных камер, используемых при ремонтной окраске автомобилей. Новизной является подход к оценке текущего и предельного состояния фильтров окрасочно-сушильных камер посредством анализа обеспечиваемых режимов вентиляции рабочей камеры.

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

Назначением окрасочно-сушильных камер (ОСК) является создание и поддержание специального микроклимата в зоне проведения работ по окраске и сушке кузовных элементов и кузовов автомобилей в целом. ОСК является технологическим оборудованием. Основными технологическими параметрами ОСК являются следующие: производительность вентиляции, чистота поступающего в рабочую камеру воздуха, температура воздуха в рабочей камере, освещенность. Эти технологические режимы, в зависимости от оснащённости ОСК, могут быть больше или меньше рекомендованных (или общепринятых на данный момент времени) для данного типа оборудования значений. Однако является важным не только абсолютные значения технологических режимов, но и их постоянство во времени, или межсервисный интервал работы ОСК. Изменение значений технологических режимов ОСК (даже в пределах рекомендованных значений) ведет к необходимости для маляра приспосабливаться к этим изменениям, а значит, ведет к росту человеческого фактора, который впоследствии отражается на качестве создаваемого лакокрасочного покрытия.

В технической документации производителями ОСК обычно указываются следующие технические и технологические параметры: геометрические размеры рабочей камеры, количество створок дверного проема, производительность вентиляции, установленная мощность электродвигателей системы вентиляции, тепловая мощность теплогенератора. Иногда дополнительно указывают тип используемых фильтровальных материалов, их начальные и конечные сопротивления. Очень редко в технической документации указывают производительность вен-

тиляции, которая обеспечивается при ресурсе фильтров, близких к конечному.

Основными технологическими характеристиками системы вентиляции ОСК являются скорость потока воздуха и величина избыточного давления в рабочей камере. Скорость воздушного потока зависит от производительности вентиляции и размера пола рабочей камеры. В существующих ОСК обеспечиваются начальные значения скорости воздушного потока в пределах 0,15...0,3 м/с. Этот параметр является важным для обеспечения быстрого отвода красочного тумана и паров растворителей через напольный фильтр в подпольное пространство, во избежание их осаждения на свежеекрашенную поверхность, приводящего к нарушению качества окраски. Не менее важным этот параметр является для обеспечения пожарной безопасности и взрывобезопасности малярных работ, а также обеспечения приемлемых санитарно-гигиенических условий труда маляра. Поддержание избыточного давления в рабочей камере необходимо для исключения подсосывания неочищенного воздуха в рабочую камеру через неплотности стенок корпуса ОСК. Величина избыточного давления должна быть минимальной, в целях уменьшения нагрузки на стенки рабочей камеры и соответственно снижения ресурса конструкции.

Технологическим параметром ОСК, подверженным изменению в процессе эксплуатации, является производительность вентиляции. Это происходит по причине изменения сопротивления фильтров системы вентиляции. Сказанное хорошо иллюстрируется на примере совмещенных аэродинамических характеристик вентиляторов и воздушной сети ОСК (рисунок 1).

На рисунке обозначены: 1 – суммарная характеристика 2-х вентиляторов RDH-450 при частоте вращения рабочего колеса 1400 об/мин; 2 – суммарная характеристика 2-х вентиляторов GXHB/GXLB-2-063 при частоте вращения рабочего колеса 1000 об/мин; 3 – суммарная характеристика 2-х вентиляторов ВР-80-75-14 при частоте вращения рабочего колеса 775 об/мин; 4 – суммарная характеристика 2-х вентиляторов RDH-630 при частоте вращения рабочего колеса 1400 об/мин; I – характеристика воздушной сети ОСК при начальном состоянии фильтров; II – характеристика воздушной сети ОСК при конечном состоянии фильтров; Q – производительность вентиляции; p – потери давления.

Кривая I соответствует начальному сопротивлению фильтров, а кривая II – конечному. Расчет производился для ОСК с трехступенчатой системой фильтрации – предварительный фильтр, потолочный фильтр, напольный фильтр. Размер пола рабочей камеры 6,9х3,9 м, высота 2,7 м. В расчете учитывались потери по всей воздушной линии от входного воздуховода до конечного сечения канала отвода воздуха, в том числе – потери на обтекание воздухом автомобиля, установленного в рабочей камере. Изменение сопротивления фильтров по мере увеличения воздушной нагрузки принято линейной. Начальные и конечные значения сопротивлений фильтров приняты в соответствии с таблицей 1.

Наложение суммарной аэродинамической характеристики двух вентиляторов ОСК, установленных последовательно [1], назависимости I и II позволяет получить две рабочие точки A_I и A_{II} (на рисунке 1 для вентилятора RDH-450) соответствующие начальному состоянию фильтров и конечному, когда необходимо производить их замену. При этом производительность вентиляции снижается с Q_I до Q_{II} на величину ΔQ_I . Для вентиляторов, представленных на рисунке 1, они составляют: $\Delta Q_1 = 3100 \text{ м}^3/\text{час}$; $\Delta Q_2 = 4400 \text{ м}^3/\text{час}$; $\Delta Q_3 = 4000 \text{ м}^3/\text{час}$; $\Delta Q_4 = 3000 \text{ м}^3/\text{час}$. Отсюда видно, что работа вентиляторов на воздушную сеть ОСК с переменным по времени сопротивлением ведет к изменению производительности вентиляции. Абсолютное значение ΔQ зависит от вида суммарной характеристики вентиляторов и величин начального и конечного сопротивлений фильтров.

Обобщить сказанное можно при помощи рисунка 2.

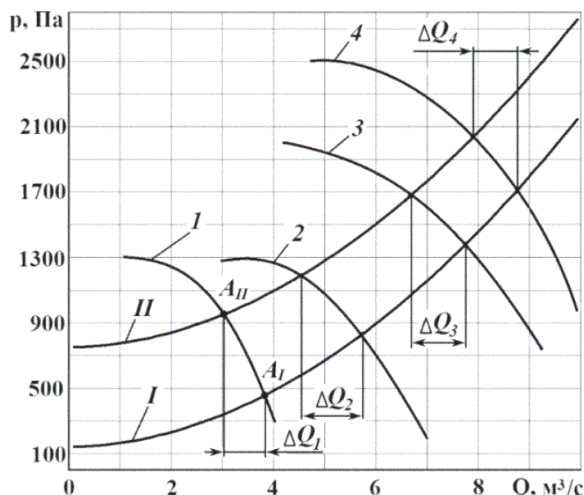


Рисунок 1. Аэродинамические характеристики воздушной сети ОСК и вентиляторов

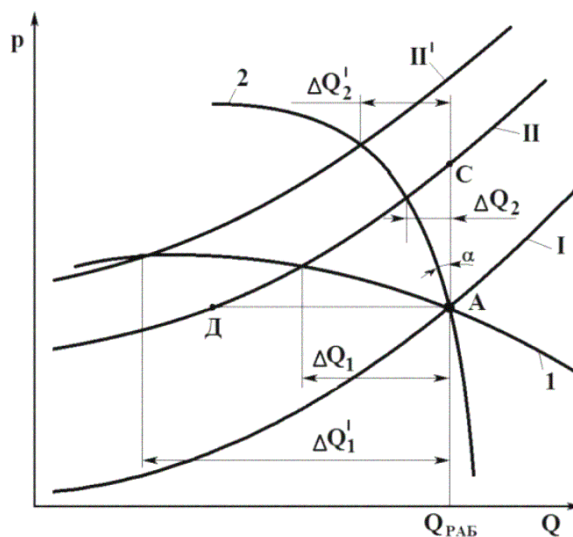


Рисунок 2. Влияние формы характеристик вентиляторов и величин сопротивлений фильтров на режим вентиляции ОСК: 1, 2 – характеристики вентиляторов; I, II, II' – характеристики сети; А – рабочая точка

Таблица 1. Характеристики фильтров окрасочно-сушильных камер

Название	Начальное значение сопротивления, Н/м²	Конечное значение сопротивления, Н/м²
Предварительный	80	450
Потолочный	30	450
Напольный	30	150

Представим ОСК с характеристикой сети в начальном (кривая I) и конечном (кривая II) состояниях фильтров. При заданном значении начальной производительности $Q_{РАБ}$ ОСК может быть укомплектовано вентиляторами, суммарные характеристики 1 или 2 которых пересекают кривую I в точке A и теоретически располагаются в пределах треугольника ACD, не совпадая при этом с линиями AC и AD. Положенные характеристики вентилятора относительно характеристики сети можно задать углом α . При малых углах α мы имеем дело с круто падающими характеристиками вентиляторов, обеспечивающих относительно стабильные режимы вентиляции или $\Delta Q > \min$. Работа вентиляторного агрегата по мере роста сопротивления сети сопровождается ростом потребляемой мощности и, соответственно, электроэнергии.

При больших углах α (пологая характеристика вентилятора) – изменение сопротивления фильтров в большую сторону приводит к значительному уменьшению производительности вентиляции $\Delta Q > \max$. При этом наблюдается уменьшение потребляемой мощности вентиляторными установками. Дальнейший рост сопротивления сети, в случае несвоевременной замены фильтров, приводит к подъему кривой II до положения II' с соответствующим изменением значений ΔQ_i до $\Delta Q_i'$ и может привести рабочую точку в область не рекомендованных режимов работы вентиляторов или к полному прекращению вентиляции.

В существующих ОСК форма и размеры рабочей камеры, воздухопроводов, теплогенератора являются величинами постоянными. Постоянными можно считать и характеристики вентиляторов. Изменению по времени подвержены только характеристики фильтровальных материалов. Учитывая, что производительность вентиляции вкуче с размером рабочей камеры формирует один из основных технологических параметров ОСК – скорость потока воздуха в рабочей камере, можно сделать следующий вывод. При заданных геометрических параметрах рабочей камеры и характеристиках вентиляторных установок, аэродинамические характеристики фильтров определяют ширину технологически допустимой зоны, при которой ОСК обеспечивает приемлемые технологические режимы вентиляции. Выход на установленный температурный режим ОСК, при заданных тех-

нических характеристиках теплогенератора, также зависит от режима вентиляции.

Замена фильтров при достижении ими предельного состояния позволяет вернуть систему в начальное положение. Сроки замены фильтров для современных ОСК установлены в руководствах по эксплуатации, и предусматривают замену в зависимости от времени наработки или по перепаду давления. Время наработки для фильтров в большинстве случаев установлены следующие: предварительный фильтр – 120 часов; потолочный фильтр – 1000 часов; напольный фильтр – 120 часов.

При внешней простоте подхода по регламентации сроков замены фильтров по наработке, у него есть серьезные недостатки. Во-первых: необходимо вести постоянный достоверный учет фактического времени эксплуатации ОСК и каждого из фильтров в частности. Это требует от эксплуатационного персонала (маляров) аккуратности и педантичности при ведении учета. Во-вторых: регламентация смены фильтров по времени наработки не учитывает условий эксплуатации ОСК. Выход на предельное состояние предварительного и потолочного фильтров зависит от производительности системы вентиляции и запыленности окружающего воздуха, которая в свою очередь зависит от времени года и места расположения СТО. Ресурс напольных фильтров находится в прямой зависимости от производительности процесса нанесения ЛКМ, типа и технического состояния краскораспылителей (коэффициента переноса) и квалификации маляра. При замене фильтров по времени наработки всегда имеется вероятность недоиспользования ресурса фильтра или эксплуатация ОСК с отработавшими ресурсом фильтрами с выходом рабочей точки в область не рекомендованных значений характеристики вентиляторов. В-третьих: аэродинамические характеристики фильтров из различных материалов имеют различные значения. Поэтому в случае использования фильтровальных материалов другого производителя, предыдущие рекомендации могут оказаться неактуальными.

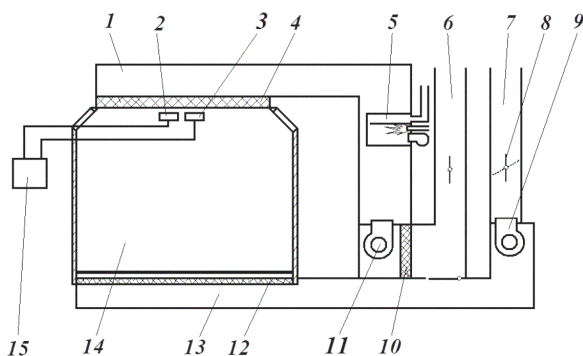
Оценка текущего и предельного состояния фильтров посредством контроля перепада давления является общепринятой практикой. Для этого ОСК должен быть оснащен системой датчиков давлений, находящихся по обе стороны фильтров или специальными переходниками для подключения манометров для проведения

периодических замеров. Данный подход позволяет реализовать ресурс фильтров полностью и не допустить эксплуатации ОСК, с исчерпавшими свой ресурс фильтрами. Однако данный способ является, по сравнению с первым, более затратным – требует установки системы контроля состояния фильтров.

Однако для рассматриваемого случая этот подход является не совсем обоснованным. Это обусловлено, прежде всего, назначением ОСК, и задачами, которые решаются в структуре ОСК посредством вентиляции. Необходимо не просто обеспечить прохождение определенного объема воздуха через рабочую камеру. Не менее важным является стабильность технологического режима или постоянство производительности вентиляции по времени. В связи с этим обсуждение подходов по регламентации срока службы фильтров без его увязки с технологическими режимами ОСК не будет являться полным. Более обоснованным является первоочередной инструментальный контроль соблюдения технологических режимов ОСК. А решение о замене того или иного фильтра необходимо принимать по мере смещения технологических режимов к своим крайним допустимым значениям, оговоренным в технической документации.

В целях реализации указанного подхода предлагается оснащать ОСК системой датчиков, согласно рисунку 3.

Для трехступенчатой системы фильтрации в предлагаемой системе достаточно одного ма-



1 – надпотолочное пространство; 2 – датчик давления в рабочей камере; 3 – датчик скорости потока в рабочей камере (термоанемометр); 4 – потолочный фильтр; 5 – теплогенератор; 6 – канал поступления воздуха; 7 – канал удаления воздуха; 8 – заслонка; 9 – вентилятор вытяжной вентиляции; 10 – предварительный фильтр; 11 – вентилятор приточной вентиляции; 12 – напольный фильтр; 13 – подпольное пространство; 14 – рабочая камера; 15 – блок обработки и индикации информации датчиков

Рисунок 3. Схема окрасочно-сушильной камеры

нометра 2 для измерения давления и термоанемометра 3 для измерения скорости воздушного потока в рабочей камере.

Предлагаемая система датчиков позволит производить:

- мониторинг режима вентиляции в рабочей камере (скорость потока воздуха и величина избыточного давления);
- оценку состояния фильтров.

Величина избыточного давления (положительного статического) в рабочей камере, регистрируемого датчиком 2, будет зависеть от положения плоскости перехода значений статического давления от положительных в отрицательные. Если принять положение этой плоскости в объеме напольного фильтра, то датчик должен фиксировать значение давления p_2 , которая формируется: размером рабочей камеры, размером и формой объекта окраски, установленному в рабочей камере, и характеристикой напольного фильтра. Формулу для расчета p_2 можно представить следующим образом:

$$p_2 = \xi_{\text{аэрт}} v(t)^2 \frac{\rho}{2} + \frac{P_{\text{нф}}}{2}, \quad (1)$$

где $\xi_{\text{аэрт}}$ – коэффициент местного сопротивления, создаваемого объектом окраски, расположенного в рабочей камере, при обдувании воздухом сверху вниз;

$v(t)$ – текущее значение скорости потока воздуха в рабочей камере (по показаниям датчика 3), м/с;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

$P_{\text{нф}}$ – паспортное значение перепада давления на напольном фильтре, Н/м².

Коэффициент местного сопротивления, создаваемого объектом окраски, расположенного в рабочей камере, можно определить по следующей зависимости [2]:

$$\xi_{\text{аэрт}} = \frac{C_x S_m}{S_{\text{рк}} \frac{v(t)_{\text{суж}}}{v(t)}}, \quad (2)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления объекта окраски (в зависимости от формы объектов $C_x = 0,4 \dots 1,05$ [2]);

S_m – миделева площадь сечения объекта окраски, м²;

$S_{\text{рк}}$ – площадь пола рабочей камеры ОКС, м²;

$v(t)_{\text{суж}}$ – текущее значение скорости потока воздуха в живом сечении, м/с.

Значение p_2 должно быть постоянным, положительным и минимальным в течение всего времени эксплуатации. Это достигается путем дросселирования вытяжного вентилятора при помощи заслонки 8 (рисунок 3), установленный в канале удаления воздуха 7. Текущее значение сопротивления $p_{засл}(t)$, создаваемое заслонкой 8, можно описать следующей формулой:

$$p_{засл}(t) = \Delta p_{н.ф} - \Delta p_{н.ф}(t)_2 + \Delta p_{в.в}, \quad (3)$$

где $\Delta p_{н.ф}$ – максимальное значение перепада давления на напольном фильтре, Н/м²;

$\Delta p_{н.ф}(t)$ – текущее значение перепада давления на напольном фильтре, Н/м²;

$\Delta p_{в.в}$ – избыток давления, создаваемого вытяжным вентилятором, Н/м².

Если аэродинамические характеристики вентиляторов подобраны с учетом характеристики воздушной сети ОСК и фильтров, то $\Delta p_{в.в} = 0$ [3]. Обычно в существующих комплектах ОСК характеристики вытяжного вентилятора подбираются с некоторым запасом, поэтому почти всегда $\Delta p_{в.в} > 0$.

Из представленной зависимости видно, что в ОСК со сбалансированными характеристиками вентиляторов ($\Delta p_{в.в} = 0$) предельному состоянию напольного фильтра будет соответствовать полностью открытое положение заслонки 9, или $p_{засл}(t) = 0$.

В целях оценки состояния предварительного и потолочного фильтров посредством анализа показаний датчика скорости потока

в рабочей камере необходимо построить зависимость изменения производительности вентиляции $Q(t)$ от времени работы ОСК. Для этого вначале необходимо оценить степень влияния индивидуальных характеристик фильтров на изменение производительности вентиляции по схеме, представленной на рисунке 4.

При работе 2-х вентиляторов с суммарной характеристикой 1 навоздушную сеть ОСК с начальной I и конечной характеристиками II начальное положение системы при чистых фильтрах должен быть находиться в точке А. При этом должна обеспечиваться производительность вентиляции $Q_{н.т}$. Однако, с учетом (3), фактически начальная рабочая точка будет находиться выше точки А по оси p на величину $\Delta p_{н.ф}$ смещаясь к точке С. Фактическая начальная производительность вентиляции будет составлять $Q_{н.ф}$. Характеристика сети ОСК в этом случае будет смещена в положение I_{ϕ} .

Текущее положение рабочей точки будет находиться между точками С и Е, например в точке Д (кривая I(t)). Для этого положения соответствует производительность $Q(t)$ и суммарное сопротивление предварительного и потолочного фильтров $\Delta p(t)$. Падение производительности, соответствующая точке Д относительно начального рабочего значения будет составлять $\Delta Q(t)$. Смещение характеристики сети к точке Е означает окончательную выработку ресурса обеими фильтрами (предварительным и потолочным). Система вентиляции при этом будет иметь производительность $Q_{к}$.

Ресурс предварительного фильтра много меньше ресурса потолочного (примерно в 10 раз). Поэтому в течение срока службы потолочного фильтра предварительный фильтр подвергается замене несколько раз. При каждой замене сопротивление нового предварительного фильтра будет равно его начальному значению, что способствует смещению кривой I(t) обратно от точки Д в направлении точки С. Благодаря этому рост общего сопротивления сети ОСК до значения Δp_{Σ} происходит не постоянно, а циклически – увеличиваясь до некоторого промежуточного значения $\Delta p(t)$, затем уменьшаясь на величину перепада давления на предварительном фильтре $\Delta p_{пр.ф}$. Далее цикл повторяется до достижения общего сопротивления предварительного и потолочного фильтров значения $\Delta p_{\Sigma} - \Delta p_{н.ф}$.

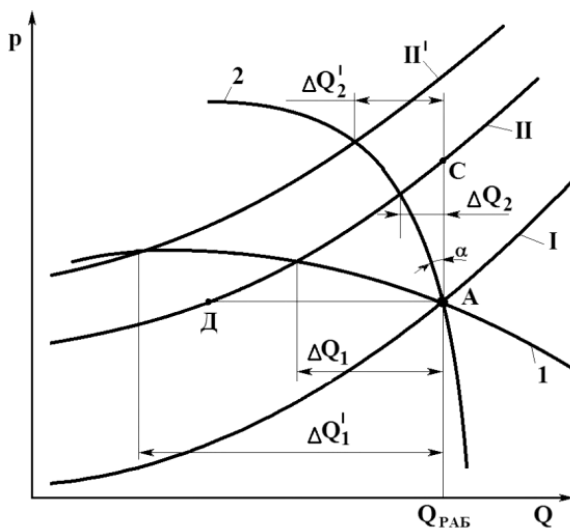


Рисунок 4. Схема оценки степени влияния индивидуальных характеристик фильтров на изменение производительности вентиляции

Если рабочую часть характеристики вентилятора 1 на рисунке 4, в целях упрощения рассуждений, представить в виде линейной функции, то анализируя рабочие характеристики сети и вентиляторов, можно расписать для каждого промежуточного значения рабочей точки D изменение сопротивления сети $p(t)$ и соответствующие этому изменению фактическую производительность сети $Q(t)$ и падение производительности $\Delta Q(t)$ относительно его начального значения $Q_{н.ф.}$.

Выше обозначенные рассуждения можно наглядно продемонстрировать при помощи зависимости производительности вентиляции Q ОСК по времени t , представленной на рисунке 5.

Полужирная зигзагообразная кривая – это фактические значения производительности вентиляции $Q(t)$ по времени. Первоначально система находится в точке C . Далее по мере роста сопротивления фильтров рабочая точка смещается к точке K . Этой точке соответствует промежуточное значение ресурса потолочного фильтра и конечное – для предварительного. В точке K производится замена предварительного фильтра, что приводит к смещению системы в положение B . Точке B соответствует начальное сопротивление предварительного фильтра и промежуточного для потолочного фильтра $\Delta Q(t)_{п.ф.}$. Далее цикл повторяется, смещаясь вниз до точки G , где производится смена предварительного фильтра второй раз. Когда рабочая точка достигнет точки E – это будет означать предельное состояние предварительного и потолочного фильтров, после замены которых система возвращается в исходную точку C .

На рисунке 5 изображена теоретическая схема. Однако такую схему можно составить и для реального случая. Для этого необходимо иметь суммарную аэродинамическую характеристику вентиляторов и совместить его с аэродинамической характеристикой воздушной сети ОСК. Исходными данными для построения графика на рисунке 5 должны будут предельные значения сопротивления предварительного и потолочного фильтров и соответствующие этим сопротивлениям изменение производительности вентиляции.

Текущее значение скорости потока воздуха $v(t)$ в рабочей камере находится в прямой связи с производительностью вентиляции и размером

рабочей камеры, и определяется по следующей зависимости:

$$v(t) = \frac{Q(t)}{S_{рк}}, \quad (4)$$

где $S_{рк}$ – площадь пола рабочей камеры, м².

Тогда зависимость на рисунке 5 может быть перестроена, где соответствующие состояния системы по времени будут заданы не производительностью, а скоростью воздушного потока в рабочей камере. Полученную кривую можно будет называть эталонной зависимостью для оценки состояния системы вентиляции конкретной ОСК, оснащенной конкретными вентиляторными установками. Для оценки текущего состояния системы необходимо производить контроль скорости потока в рабочей камере и сопоставляя полученные измеренные значения скорости по эталонной кривой выносить заключение о состоянии фильтров, их текущего ресурса и определять момент их замены.

Предлагаемая в статье система и методика анализа реализуемых параметров вентиляции в рабочей камере позволяют повысить параметры энергоэффективности эксплуатации ОСК за счет исключения вероятности работы вентиляторов в области нерекондованных режимов из-за несвоевременной замены фильтров. Возможность в режиме реального времени контролировать текущее состояние фильтров позволяет реализовать их ресурс полностью, уменьшая тем самым затраты на материалы при эксплуатации ОСК. Мониторинг текущего состояния режима вентиляции и состояния фильтров позволяет производить управ-

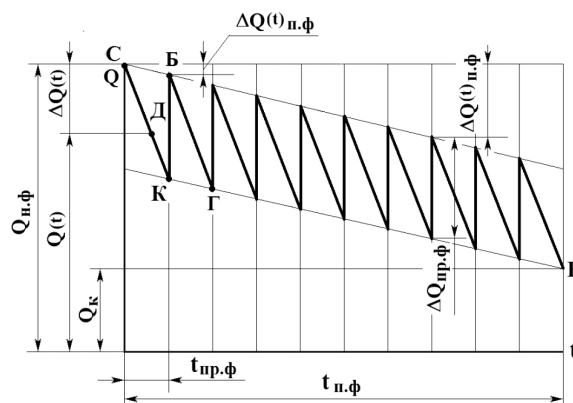


Рисунок 5. Зависимость производительности системы вентиляции ОСК от времени эксплуатации фильтров

ление реализуемыми технологическими режимами посредством изменения сроков и момента замены фильтров с целью стабилизации технологических режимов и соответствующе-

го повышения качества производимых работ или минимизации энерго- и ресурсозатрат при эксплуатации ОСК.

24.08.2014

Список литературы:

1. Вахвахов, Г.Г. Работа вентиляторов в сети / Г.Г. Вахвахов. – М.: Стройиздат, 1975. – 104 с.
2. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ под ред. М.О.Штейнберга. – М.:Машиностроение, 1992. – 672 с.
3. Фаскиев, Р.С. Расчет системы вентиляции окрасочно-сушильных камер для ремонтной окраски автомобилей / Р.С.Фаскиев // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – №10(129). – С. 211–215.

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, 149, ауд. 10302, тел. (3532) 912224,
e-mail: rif@house.osu.ru