

УДК 621.928.99

Р. Я. Биккулов, О. С. Дмитриева, А. В. Дмитриев,  
Г. Р. Бадретдинова, Д. Н. Латыпов

## ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ РАБОТЫ СЕПАРАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА С ЭЛЕМЕНТАМИ КВАДРАТНОЙ ФОРМЫ ПРИ ОЧИСТКЕ ЗАПЫЛЕННОГО ПОТОКА ПОКРАСОЧНОЙ КАМЕРЫ

*Ключевые слова:* покрасочные камеры, мелкодисперсные частицы, квадратный сепаратор, время работы.

Увеличение спроса на продукцию автомобильной промышленности отражается на росте спроса в сегменте технического обслуживания автомобилей. Большой объем работ отводится на нанесение лакокрасочных покрытий, которые проводятся с использованием специального окрасочного оборудования. Для выполнения окрасочных работ предусмотрены покрасочно-сушильные камеры. Необходимо правильно организовать работу вентиляционной системы камеры. Замена фильтров очистки воздуха в покрасочно-сушильной камере является актуальным и важным вопросом при ее эксплуатации и обслуживании. Необходимо следить за состоянием используемых в камере фильтров, т.к. их чрезмерное загрязнение приводит к увеличению нагрузки на вытяжную систему и росту сопротивления. При этом очистка воздуха от твердых частиц вредных веществ ухудшается, что несомненно сказывается на качестве покрытия при распылении краски, т.к. покрасочный туман и пары растворителей оседают на поверхности изделия. Регламентация сроков замены фильтров осуществляется несколькими способами – по наработке и по оценке контроля перепада давления по обе стороны фильтров. Для замены разных типов фильтрующих материалов устанавливаются определенные рекомендации по срокам их эксплуатации. В статье предлагается замена напольных фильтров на разработанные сепарационные устройства с элементами квадратной формы. Схема движения потоков в квадратном элементе сепаратора позволяет оценить характер образования осадка в устройстве. Представлены результаты расчетов по продлению времени работы фильтрующего элемента. Приводится методика расчета времени работы сепарационного устройства. Исследованы разные варианты работы устройства по эффективности, изменению концентрации частиц в потоке и влиянию данных факторов на время его работы. С увеличением эффективности работы устройства и концентрации частиц в потоке время его работы снижается. Время работы сепарационного устройства с квадратными элементами составило более 30 дней при наибольшей запыленности воздуха. В реальных условиях эксплуатации сепарационное устройство сможет проработать 50-150 дней. Предлагаемая методика анализа времени работы позволяет исключить вероятность нереконструированных режимов работы камеры из-за несвоевременной замены сепарационных элементов.

R. Ya. Bikkulov, O. S. Dmitrieva, A. V. Dmitriev,  
G. R. Badretdinova, D. N. Latypov

## ESTIMATION OF THE OPERATING TIME OF THE SEPARATION DEVICE WITH SQUARE ELEMENTS WHEN CLEANING THE DUSTED FLOW OF THE PAINT BOOTH

*Keywords:* paint booths, fine particles, square separator, operating time.

The increase in demand for automotive products is reflected in the growth in demand in the automotive maintenance segment. A large amount of work is devoted to the application of paint and varnish coatings, which are carried out using special painting equipment. For painting works, painting and drying booths are provided. It is necessary to properly organize the operation of the ventilation system of the booth. Replacing the air purification filters in the painting and drying booth is an urgent and important issue during its operation and maintenance. It is necessary to monitor the condition of the filters used in the booth, because their excessive contamination leads to an increase in the load on the exhaust system and an increase in resistance. At the same time, air purification from solid particles of harmful substances deteriorates, which undoubtedly affects the quality of the coating when spraying paint, because paint mist and solvent vapors settle on the surface of the product. The regulation of the timing of filter replacement is carried out in several ways: by operating time and by assessing the control of the pressure drop on both sides of the filters. To replace different types of filter materials, certain recommendations are set for their service life. The article proposes replacing floor filters with the developed separation devices with square-shaped elements. The flow pattern in a square separator element makes it possible to assess the character of sludge formation in the device. The results of calculations to extend the operating time of the filter element are presented. The method of calculating the operating time of the separation device is presented. Various variants of the device operation have been investigated in terms of efficiency, changes in the concentration of particles in the flow and the influence of these factors on the time of its operation. With an increase in the efficiency of the device and the concentration of particles in the stream, its operation time decreases. The operating time of the separating device with square elements was more than 30 days with the highest dust content of the air. In real operating conditions, the separation device can work for 50-150 days. The proposed method for analyzing the operating time makes it possible to exclude the possibility of non-recommended operating modes of the booth due to untimely replacement of the separation elements.

Согласно статистическим данным [1] наблюдается рост продаж автомобилей. Наряду с этим будет расти спрос на услуги автомастерских, станций технического обслуживания и покрасочных цехов. Большую часть занимают окрасочные работы авто-

мобиля, необходимые для восстановления его поверхностного покрытия после полученных повреждений корпуса [2]. К тому же потребителями окрасочного оборудования являются не только предприятия в сфере автомобилестроения, машиностроения и

металлообработки, но и все предприятия в процессе которых существует необходимость окрашивания изделий или их составных частей. Для этих целей используют покрасочно-сушильные камеры, оснащенные системой вентиляции. При этом важной частью является система фильтров, для обеспечения качественной окраски изделий она требует ежедневного внимания при эксплуатации [3, 4].

Проектирование системы очистки воздуха, в частности системы фильтрации является сложной задачей [5-7]. В обслуживании покрасочных камер большое внимание уделяется вопросам регулярной замены фильтров. Такое обслуживание снижает вероятность отказа оборудования, помогает обеспечить эффективную работу покрасочной камеры, повысить качество окрашивания изделий и уменьшить производственные расходы. Производители фильтров дают рекомендации по замене фильтров на основе показаний манометра для контроля состояния перепада давления [8, 9]. Если камера не оборудована дифференциальным манометром, то лучше установить жесткий график проведения технического обслуживания, как правило, исходя из объема окрасочных работ, ежедневно производимых в камере [10, 11].

Периодичность замены фильтров очистки воздуха в покрасочно-сушильной камере остается актуальным вопросом. Срок фильтров составляет около 150 часов окраски, что зависит от интенсивности окраски [12]. Произведем оценочные расчеты эффективности способа продления работы покрасочных камер при установке устройств улавливания частиц. Предлагаемая методика анализа времени работы позволяет исключить вероятность нереконструированных режимов работы камеры из-за несвоевременной замены сепарационных элементов.

Массовый расход частиц в потоке можно определить по формуле:

$$G_{ma} = \frac{G_m c_0}{\rho_G}, \quad (1)$$

где  $G_m$  – массовый расход запыленного воздуха, кг/с;  $c_0$  – концентрация частиц в потоке, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_G$  – плотность потока, кг/м<sup>3</sup>.

Массовый расход частиц, уловленных устройством, определяется:

$$G_{mdev} = \frac{G_{ma} E}{\rho_G}, \quad (2)$$

где  $E$  – эффективность работы устройства.

Следовательно, расход частиц, поступающих на фильтр:

$$G_{mf} = G_{ma} - G_{mdev}. \quad (3)$$

После преобразования получается

$$G_{mf} = \frac{G_m c_0}{\rho_G} (1 - E). \quad (4)$$

Время работы фильтра можно определить по формуле:

$$T_f = \frac{m_{af}}{G_{mf}}, \quad (5)$$

где  $m_{af}$  – масса осадка на фильтре, кг.

Окончательное выражение для расчета времени работы фильтра запишется:

$$T_f = \frac{m_{af} \rho_G}{G_m c_0 (1 - E)}. \quad (6)$$

Для определения массы частиц, уловленных наполными фильтрами Volz filter MRGrun3-20-75 Paint stop G3 покрасочной камеры на предприятии ООО «Каматек», проведены промышленные испытания, во время осуществления которых были взяты по три образца чистого фильтра и отработавшего максимальный период. Диаметр образцов составляет  $100 \pm 1$  мм. Фильтры взвешивались весами Gagin JS3 с диапазоном массы взвешивания 0,01-500 г., ценой деления 0,01 г. Масса чистых образцов составила соответственно: 1,47 г., 1,5 г., 1,47 г. Масса отработанных образцов: 57,37 г., 51,38 г., 51,64 г. Следовательно, значения массы осадка изменялись в диапазоне от 49,91 до 55,87 граммов.

Скорость движения воздуха через фильтры в покрасочно-сушильных камерах, как правило составляет 0,2-0,5 м/с, в зависимости от степени загрязнения фильтров. Этот параметр является важным для обеспечения допустимых условий труда маляра [13]. Расход воздуха варьируется в диапазоне от 10 до 20 кг/с. Концентрация частиц в среднем составляет 5 мг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, фильтры необходимо менять через 35-60 дней, в зависимости от интенсивности работы производства.

Далее необходимо определить максимальную массу частиц, которую может уловить предлагаемое сепарационное устройство [14]. Принцип работы заключается в том, что загрязненный воздух попадает в сепарационные элементы квадратной формы, направляясь к круглым отверстиям и разделяясь на две равные части с образованием вихрей (рис. 1).

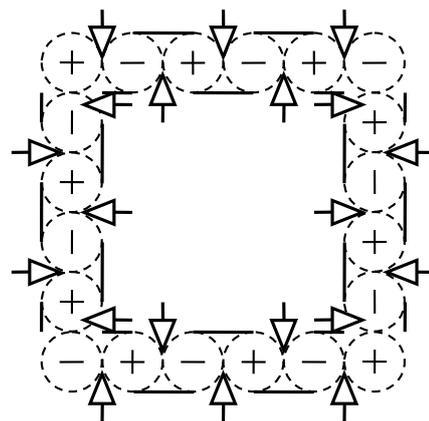


Рис. 1 – Схема образования вихрей в предлагаемом устройстве: «+» вихри, вращающиеся по часовой стрелке, «-» вихри, вращающиеся против часовой стрелки

Под действием центробежной силы твердые частицы покрасочного тумана оседают в зонах сепарационных элементов, образованных в пространстве между стенкой и вихревым столбом (рис. 2).

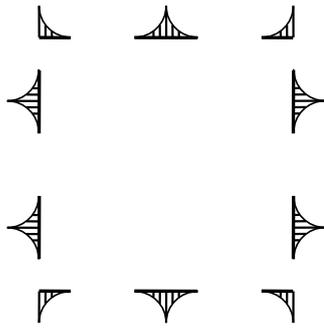


Рис. 2 – Схема образования осадка в предлагаемом устройстве

На одном сепарационном элементе шириной  $b$  и высотой  $h_b$  образуется осадок объемом:

$$V_{s1} = 4d_v^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) h_b, \quad (7)$$

или, с учетом того, что диаметр вихрей связан с шириной сепарационных элементов соотношением  $d_v = b/4$  (рис. 1):

$$V_{s1} = \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \frac{b^2}{4} h_b. \quad (8)$$

Для  $n$  элементов можно записать:

$$V_{sn} = n \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \frac{b^2}{4} h_b. \quad (9)$$

Если предположить, что частицы имеют сферическую форму равного диаметра и высокую плотность частиц внутри слоя, то масса слоя определится по формуле:

$$m_{sn} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} V_{sn} \rho_a = n \frac{\pi b^2 h_b \rho_a}{12\sqrt{2}} \left(1 - \frac{\pi}{4}\right). \quad (10)$$

Время работы сепарационного устройства определится:

$$T_{dev} = \frac{m_{sn} \rho_G}{G_m c_0 E}. \quad (11)$$

Результаты оценки времени работы сепарационного устройства представлены графически на рис. 3 и 4.

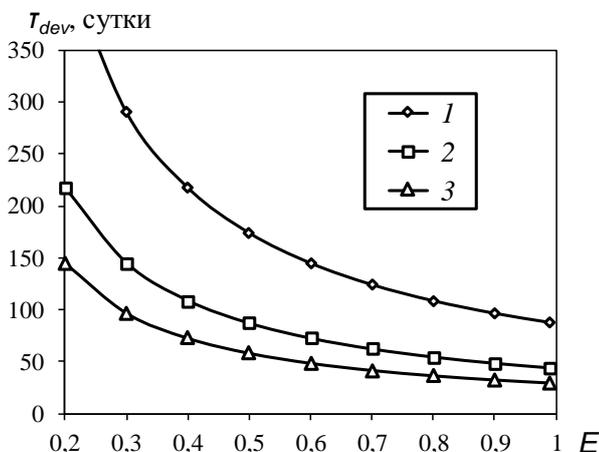


Рис. 3 – Зависимость времени работы устройства от его эффективности и концентрации частиц в потоке.  $c_0, \text{кг/м}^3$ : 1 –  $5 \cdot 10^{-6}$ , 2 –  $10 \cdot 10^{-6}$ , 3 –  $15 \cdot 10^{-6}$

С увеличением эффективности работы устройства

и концентрации частиц в потоке время его работы снижается. Время работы сепарационного устройства составило более 30 дней при наибольшей запыленности воздуха. В реальных условиях данная конструкция сможет проработать 50-150 дней. Кроме того, как показали эксперименты, под воздействием потока воздуха осадок отваливается от поверхности и падает в виде крупных комков, которые легко уловить. Следовательно, время работы можно существенно увеличить, предусмотрев емкость для сбора осадка (рис. 3).

Таким образом, время работы фильтра может быть увеличено на значение:

$$\Delta T = \frac{m_{af} \rho_G}{G_m c_0} \frac{E}{1-E}. \quad (12)$$

Исследования показали, что время работы фильтров может быть увеличено на 22-65 дней при эффективности устройства 0,6 (рис. 4).

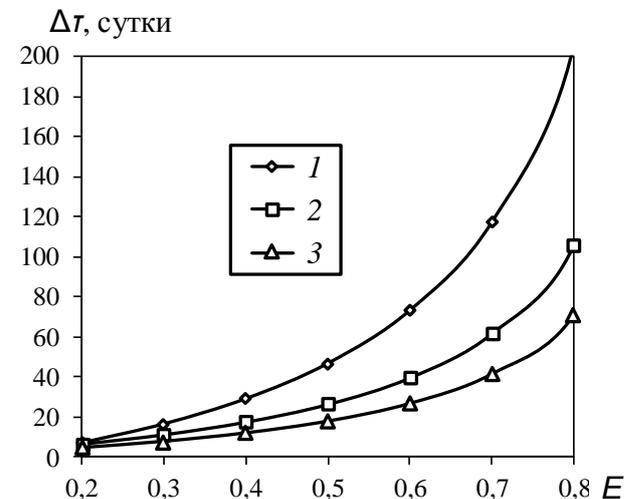


Рис. 4 – Зависимость увеличения времени работы фильтра в зависимости от эффективности работы сепарационного устройства и концентрации частиц в потоке.  $c_0, \text{кг/м}^3$ : 1 –  $5 \cdot 10^{-6}$ , 2 –  $10 \cdot 10^{-6}$ , 3 –  $15 \cdot 10^{-6}$

Результаты исследований показали, что ширина сепарационных элементов квадратной формы не влияет на предельное значение массы слоя частиц. Скорость прохождения запыленного потока через устройство равна скорости прохождения через фильтр, следовательно, сопротивление будет минимальным и практически не увеличит нагрузку на вентилятор.

Таким образом, мониторинг текущего состояния напольных фильтров с использованием сепарационных устройств позволит увеличить срок эксплуатации и момент их замены, что позволит сократить ресурсозатраты при эксплуатации покрасочно-сушильной камеры.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № 2710.2021.4.

### Литература

1. Распоряжение Правительства РФ от 28.04.2018 № 831-р «Об утверждении Стратегии развития автомобильной

- промышленности Российской Федерации на период до 2025 года».
2. J. Chen, R. Liu, Y. Gao, G. Li, T., *Journal of Cleaner Production*, **148**, 268-275 (2017).
  3. Г.Ф. Сточник, *Технология окрасочных работ*. Высшая школа, Москва, 1981. 238 с.
  4. A. Giampieri, J. Ling-Chin, Z. Ma, A. Smallbone, A.P. Roskilly, *Applied Energy*, **261**, 114074 (2020).
  5. Р.С. Фаскиев, *Вестник ОГУ*, **129**, 10, 211-215 (2011).
  6. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, В.В. Харьков, Т.С. Петрова, *Вестник технологического университета*, **23**, 2, 82-85 (2020).
  7. М.Р. Вахитов, Г.П. Шуваева, А.Н. Николаев, *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 1, 187-189 (2013).
  8. А.М. Гавриленков, Л.С. Бредихин, Р.Р. Сафаралиев, *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*, **6**, 1-1, 76-78 (2015).
  9. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, Т.С. Петрова, О.С. Дмитриева, *Вестник Иркутского государственного технического университета*, **24**, 3, 606-615 (2020).
  10. Р.С. Фаскиев, *Вестник Оренбургского государственного университета*, **171**, 10, 206-212 (2014).
  11. M. Powell, *Metal Finishing*, **108**, 9, 18-19 (2010).
  12. R. Thelen, *Metal Finishing*, **104**, 5, 47-49 (2006).
  13. R. Joseph, *Metal Finishing*, **107**, 2, 53-54 (2009).
  14. А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, В.Э. Зинуров, И.Н. Мадышев. Заявка на полезную модель № 2021120725 от 14.07.2021. *Мультивихревой сепаратор для очистки газов*.

---

© **Р. Я. Биккулов** – ассистент ФГБОУ ВО «КГЭУ», **О. С. Дмитриева** – к.т.н., доцент кафедры ОПП ФГБОУ ВО «КНИТУ», ja\_deva@mail.ru, bikkulov-ry@mail.ru, **А. В. Дмитриев** – д.т.н., зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com, **Г. Р. Бадретдинова** – аспирант ФГБОУ ВО «КГЭУ», nice.badretdinova@mail.ru, **Д. Н. Латыпов** – к.т.н., доцент кафедры ПАХТ НХТИ ФГБОУ ВО «КНИТУ», dlatypov@yandex.ru.

© **R. Ya. Bikkulov** – assistant, Kazan State Power Engineering University (KSPEU), bikkulov-ry@mail.ru, **O. S. Dmitrieva** – candidate of technical sciences, assistant professor of FPE Dep., KSTU, ja\_deva@mail.ru, **A. V. Dmitriev** – Doctor of Engineering, Head of Department «Theoretical Basis of Thermotechnics», KSPEU, ieremiada@gmail.com, **G. R. Badretdinova** – postgraduate student, KSPEU, nice.badretdinova@mail.ru, **D. N. Latypov** – candidate of technical sciences, assistant professor of ChTPA Dep., NChTU branch of KSTU, dlatypov@yandex.ru.