

ОЧИСТКА ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ ОТ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ОКРАСОЧНЫХ КАМЕРАХ

¹Р.Я. Биккулов, ²О.С. Дмитриева, ¹А.В. Дмитриев,
¹Г.Р. Бадретдинова

¹Казанский государственный энергетический университет,

²Казанский национальный исследовательский технологический университет

С целью повышения эффективности очистки отработанного воздуха окрасочных камер от мелкодисперсных частиц авторами разработано сепарационное устройство с элементами квадратной формы и прямоугольными щелями, описан принцип его работы. Представлена методика расчета конструктивных размеров разработанного сепарационного устройства. Рассмотрены разные варианты исполнения высоты сепарационной зоны в зависимости от размера дисперсных частиц, изменялись скорость потока и размер конструкции квадратного элемента. Показано, что устройство способно улавливать частицы размером менее 10 мкм с эффективностью, близкой к 100 %, при условии их прилипания к стенкам. Особенность конструкции сепарационного устройства в том, что создается множество вихрей малого диаметра, в которых режим течения близок к ламинарному, а для достижения больших значений центробежной силы не требуется создания высоких скоростей в щелях.

Ключевые слова: окраска, камера, очистка воздуха, сепарационная зона, дисперсные частицы

Статья поступила в редакцию 25.06.2021, доработана 12.07.2021, принята к публикации 13.09.2021

Cleaning Air Streams from Fine Particles in Paint Booths

¹R.Ya. Bikkulov, ²O.S. Dmitrieva, ¹A.V. Dmitriev, ¹G.R. Badretdinova

¹Kazan State Power Engineering University, 420066 Kazan, Russia,

²Kazan National Research Technological University, 420015 Kazan, Russia

To solve the problem of increasing the efficiency of cleaning the exhaust air of painting chambers from fine particles, a separation device with elements of a square and rectangular shape has been developed and described by the principles of its operation. A method for calculating the design dimensions of the developed separation device is presented. Different versions of the height of the separation zone are considered, depending on the size of dispersed particles. It is shown that the device is able to capture particles smaller than 10 microns with an efficiency close to 100 %, provided they adhere to the walls. The peculiarity of the design of the separation device is that a set of small-diameter vortices is created, in which the flow regime is close to laminar, and to achieve large values of centrifugal force, it is not necessary to create high speeds in the crevices.

Keywords: paint, booth, air cleaning, separation zone, dispersed particles

Received 25.06.2021, revised 12.07.2021, accepted for publication 13.09.2021

DOI: 10.18412/1816-0395-2021-12-10-14

Мировое производство автотранспортных средств значительно увеличилось с 54 млн в 1997 г. до 91 млн в 2019 г., по статистическим данным Международной организации автопроизводителей OICA [1]. Снижение производства в 2020 г. на 16 % до менее 78 млн автомобилей связано с остановкой

значительной части автомобильной промышленности и ее многочисленных поставщиков по всему миру из-за пандемии COVID. При этом последние несколько месяцев 2021 г. во всем мире показали постепенное восстановление производства до уровней 2019 г. В частности, по оценке Министерства экономического развития

Российской Федерации, объем производства в 2025 г. составит 2,21 млн штук [2]. Вследствие этого расширяется и бизнес по ремонту автомобилей, как правило, требующий после полученных повреждений корпуса автомобиля восстановления его поверхностного покрытия [3]. В России и мире эксплуатируется множество окрасоч-

ных камер различного размера и производительности. Надежные и функциональные окрасочные камеры необходимы для обеспечения качественного выпуска продукции. Все они имеют достаточно схожую конструкцию: помещение с устройством для окраски, фильтры на входе в окрасочную камеру и выходе из нее. Более 70 % используемых органических растворителей, на базе которых изготавливаются краски, превращаются в газобразные выбросы загрязняющих веществ, что приводит к серьезному загрязнению атмосферы летучими органическими соединениями и угрозе для здоровья человека [4].

Приточной воздух окрасочной камеры фильтруется для удаления твердых загрязнений и обеспечения равномерного воздушного потока по всему окрашиваемому изделию [5]. Отрицательное воздействие избыточных твердых частиц оказывают включения в краску, которые нарушают ее поверхность и внешний вид. Многие из этих включений вызваны частицами размером более 10 мкм. Равномерный воздушный поток важен для полного покрытия изделия краской, минимального чрезмерного распыления и оптимального удаления краски выхлопными фильтрами [5]. Выбросы твердых частиц от лакокрасочных веществ в процессе окрашивания автомобильных изделий также способствуют возникновению негативных последствий, вызванных оказываемым вредом здоровью персонала, загрязнением окружающей среды и поломкой элементов вытяжной системы (воздуховоды, вентилятор) из-за имеющихся в воздухе молекул краски, не попавших на изделие, и паров органических растворителей, содержащихся в ее основе [6]. С целью улучшения условий труда рабочего персонала и снижения больших выбросов лакокрасочного осадка в окружающую среду в окрасочных камерах требуется

очистка воздуха от аэрозолей и пыли, а также применение средств индивидуальной защиты [7–9]. Для этого используется многоступенчатая система очистки воздуха, включающая в себя фильтр грубой очистки воздуха, фильтр тонкой очистки воздуха, а также на потолок окрасочной камеры укладывается фильтрующий материал класса М5 по ГОСТ Р EN 779–2014 [10–12]. На практике очистка воздуха от паров растворителя применяется крайне редко ввиду высокой стоимости [11]. При этом фильтры имеют достаточно большую площадь, для достижения качественного покрытия на окрашиваемых элементах требуется частая их замена. Цена самих фильтров высокая, а после эксплуатации требуется их утилизация [13]. Ситуация осложняется еще и тем, что фильтры инерционного типа изготавливаются из полимерных материалов, которые долго разлагаются. Установка классических сепарационных устройств, например циклонов, невозможна, так как газоходы имеют сечение большой площади, а большое сопротивление сепарационных устройств недопустимо [14–19].

В связи с этим с целью обезвреживания выбросов пыли и окрасочного аэрозоля, образующихся при пневматическом распылении лакокрасочных материалов, авторы разработали устройство (рис. 1), которое может быть установлено в работающем воздуховоде. Устройство создает гидравлическое сопротивление, допустимое для окрасочных камер, может быть изготовлено из листового металла.

Поток отработанного запыленного воздуха поступает через вход 3 в элементы 1, далее проходит через прямоугольные щели 2, расположенные таким образом, что в пространстве между элементами 1 создается множество вихрей. В месте контакта вихрей друг с другом направление потока одинаковое, поэтому они помогают

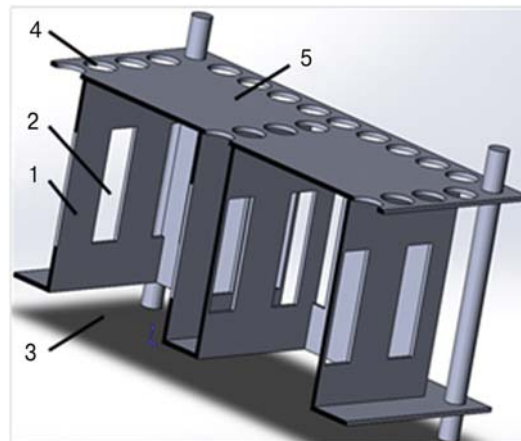


Рис. 1. Трехмерная модель сепарационного устройства:

1 – элементы квадратной формы; 2 – прямоугольные щели; 3 – вход загрязненного воздуха; 4 – выход очищенного воздуха; 5 – крышка

Fig. 1. Three-dimensional model of a separation device:
1 – square-shaped elements; 2 – rectangular slots; 3 – inlet of polluted air; 4 – purified air outlet; 5 – cover

вращаться друг другу, а их движение похоже на вращение колес, находящихся в зацеплении друг с другом. В этих вихрях частицы отбрасываются к стенкам, а очищенный поток удаляется через отверстия 4 в крышке 5 (см. рис. 1). Следует также отметить, что предлагаемое устройство улавливает только твердые частицы, так как капли, достигая его стенок, полностью испаряются.

Особенность конструкции сепарационного устройства в том, что создается множество вихрей малого диаметра, в которых режим течения близок к ламинарному, а для достижения больших значений центробежной силы не требуется создания высоких скоростей в щелях. Это, в свою очередь, позволяет улавливать частицы из воздушного потока при низких значениях гидравлического сопротивления, например при скорости на входе в элементы 7 м/с сопротивление не превышает 250 Па. Следует также отметить, что при проведении промышленных испытаний было выявлено, что частицы, достигая стенки, прилипают друг к другу, образуются комки достаточно больших размеров 3–6 мм, которые падают в нижнюю часть сепаратора под действием силы тяжести. Этот эффект выгоден при эксплуа-

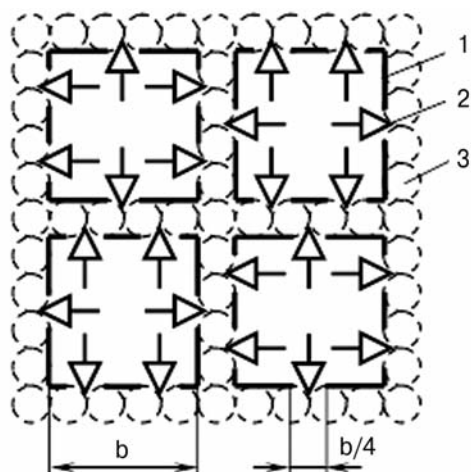


Рис. 2. Схема устройства с указанием направления потоков воздуха через щели:
1 – элементы квадратной формы; 2 – прямоугольные щели для выхода воздуха; 3 – вихри
Fig. 2. Diagram of the device showing the direction of air flows through the slots:
1 – square-shaped elements; 2 – rectangular slots for air outlet; 3 – vortices

тации данного устройства, так как позволяет продлевать его межремонтный ресурс. Во время промышленных испытаний в компании ООО "КАМАТЕК" были установлены фильтр грубой очистки (напольный фильтр Volz filter MRGrun3-20-75 Paint stop G3), фильтр средней очистки (фильтр потолочный Zauber Air 500M класса M5). При испытаниях оно было установлено после фильтра грубой очистки и до фильтра

тонкой очистки. Ориентировочно предлагаемое устройство может продлить период замены фильтров тонкой очистки в два раза. Начальная концентрация практически не влияет на эффективность улавливания частиц в предлагаемом устройстве, так как частицы образуют комки, которые падают вниз и работоспособность устройства восстанавливается. Существует вероятность забивки устройства в случае, когда осадок перекроет каналы, но это не рабочий режим устройства. В этом случае его необходимо извлечь из канала и удалить осадок.

Трехмерное моделирование процесса при использовании наиболее распространенных моделей турбулентности дает сведения о структуре потока, а также позволяет получить значения эффективности улавливания частиц с достаточной точностью. Однако, для построения модели, необходимо знать конструктивные размеры сепарационного устройства. Этой цели и служит представленная оценочная методика расчета некоторых элементов конструкции сепаратора.

По основному принципу динамики сумма всех сил равна произведению массы на ускорение. С целью упрощения будем полагать, что частица движется равномерно вдоль радиуса, следовательно, можно записать равенство центробежной силы и силы аэродинамического сопротивления, действующих на частицу $F_c = F_a$. Мелкодисперсные частицы распределены равномерно в потоке, их концентрация мала, поэтому взаимодействием между частицами можно пренебречь.

Предлагаемое устройство предназначено для улавливания частиц размером менее 10 мкм, следовательно будет логично предположить их безотрывное обтекание потоком воздуха. В потоке эти частицы движутся со скоростью менее 1 м/с. Значение числа Рей-

нольдса составляет менее 1. В этом случае значение силы аэродинамического сопротивления может быть найдено по зависимости:

$$F_a = 3\pi\mu_g a U_r, \quad (1)$$

где μ_g — коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с; a — диаметр частиц, м; U_r — радиальная скорость движения частиц, м/с.

Центробежная сила, действующая на частицу:

$$F_c = \rho_a (\pi a^3 / 6) (W_{sl}^2 / r), \quad (2)$$

где ρ_a — плотность частиц, кг/м³; W_{sl} — скорость воздуха в щелях, м/с; r — радиус вращения частицы, м.

После преобразования (1) и (2) получим скорость частицы:

$$U_r = \rho_a W_{sl}^2 a^2 / (18\mu_g r). \quad (3)$$

Максимальным значением перемещения частицы в радиальном направлении является половина диаметра вихря. Поскольку диаметры вихрей, образующихся между плоскими стенками квадратных элементов сепаратора, равны $b/4$ (рис. 2), то можно записать:

$$U_r = 4/9 (\rho_a W_{sl}^2 a^2 / (\mu_g b)), \quad (4)$$

где b — размер стороны квадратного элемента, м.

Время прохождения частицей расстояния от центра вихря до его края:

$$\tau_r = b/8 U_r. \quad (5)$$

Время прохождения частицей высоты z , т.е. расстояния от самой верхней точки щели до крышки сепарационного устройства:

$$\tau_z = z/W_z, \quad (6)$$

где W_z — осевая составляющая скорости воздушного потока, м/с.

Одно из условий достижения значения 100 %-ной эффективности осаждения частицы — ее достаточное время пребывания в устройстве. Предположение 100 %-ной эффективности является допущением для получения уравнения определения высоты сепарационного устройства в зависимости от диаметра осаждаемых частиц, технологических и конструктивных параметров устройства. Математически это как равенство уравнений (5) и (6).

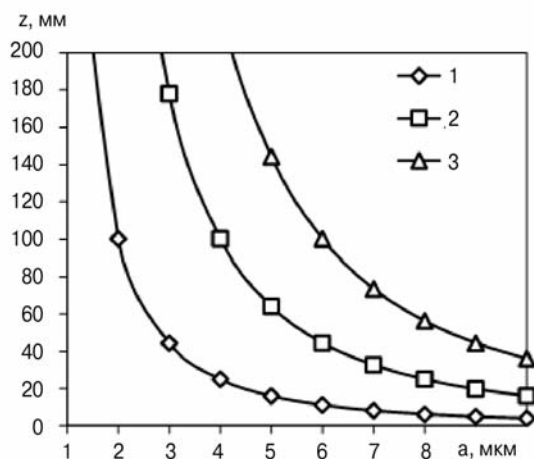


Рис. 3. Зависимость высоты сепарационной зоны z от диаметра частиц a и коэффициента крутки A при $b = 80$ мм, $W_{sl} = 5$ м/с:
1 – 0,25; 2 – 0,5; 3 – 0,75

Fig. 3. Dependence of the height of the separation zone z on the particle diameter a and the twist coefficient A at $b = 80$ mm, $W_{sl} = 5$ m/s:
1 – 0.25; 2 – 0.5; 3 – 0.75

Таким образом

$$z = bW_{bx}/8U_r \quad (7)$$

Суммарная площадь входа в элементы в устройстве с количеством элементов $n \times n$:

$$F_{bx} = n^2(b - 2\delta)^2, \quad (8)$$

где n — число квадратных элементов; δ — толщина стенок элементов, м.

Площадь прохода воздуха в устройстве между элементами:

$$F_z = [((5n + 1)/4)b]^2 - n^2(b - 2\delta)^2. \quad (9)$$

Условие постоянства расхода при постоянстве плотности газа записывается в виде:

$$W_{bx}F_{bx} = W_zF_z, \quad (10)$$

где W_{bx} — скорость входа воздуха в элементы, м/с.

Тогда скорость воздуха в сепарационном пространстве с учетом уравнений (8)–(10) можно определить по формуле:

$$W_z = \frac{1}{\left(\frac{5n+1}{4n(b-2\delta)}b\right)^2 - 1} W_{bx}. \quad (11)$$

Скорость газа в щелях можно определить из условия постоянства расхода:

$$W_{sl} = W_{bx}/A, \quad (12)$$

где $A = F_{bx}/F_{sl}$ — коэффициент крутки, определяемый как отношение площади входа в элемент к площади щелей в стенках элемента.

Подставляя полученные зависимости в уравнение (7) получаем

$$z = \frac{9}{32} \frac{b^2 A^2 \mu_G}{\rho_a W_{bx} a^2} \frac{1}{\left(\frac{5n+1}{4n(b-2\delta)}b\right)^2 - 1}. \quad (13)$$

Данное устройство разрабатывалось для воздухопроводов размером более 300×300 мм. В этом случае число n оказывается достаточно большим. Кроме того, в реальных условиях $b \gg \delta$, поэтому без существенного снижения точности расчетов уравнение (13) можно записать:

$$z = 9/16 [\mu_G/(\rho_a W_{bx})] (bA/a)^2. \quad (14)$$

Полученная зависимость (14) позволяет оценить влияние конструктивных и технологических параметров, а

также получить размеры некоторых конструктивных элементов, необходимых для расчета сепарационного устройства.

Расчеты по полученной зависимости (14) проводились при следующих параметрах: коэффициент динамической вязкости μ_G был равен 0,0000178 Па·с, плотность улавливаемых частиц $\rho_a = 2000$ кг/м³. Результаты расчетов представлены в графическом виде на рис. 3–5.

Степень крутки существенно влияет на высоту сепарационной зоны, так как определяет тангенциальную скорость, которая, в свою очередь, зависит от скорости в щелях. При степени крутки 0,25 устройство способно улавливать частицы размером 2 мкм при приемлемой высоте сепарационной зоны (см. рис. 3).

Снижение скорости движения запыленного газа через устройство приводит к увеличению высоты сепарационной зоны. Это объясняется снижением центробежной силы. В тоже время эта зависимость несущественная (см. рис. 4).

Ожидаемо, существенное влияние оказывает размер стороны квадратного элемента, так как он определяет диаметр образующихся вихрей. Для улавливания частиц размером менее 2 мкм необходимо создавать устройства с размером стороны квадратного элемента менее 40 мм (рис. 5).

В заключение следует отметить, что частицы размером менее 2 мкм улавливаться с высокой эффективностью не будут, так как высота сепарационной зоны в этом случае будет иметь недопустимые значения. Следовательно полный отказ от фильтров тонкой очистки невозможен, но их срок службы может быть существенно продлен. После внедрения сепарационных устройств в систему вентиляции при наличии работающих очистных устройств для улавливания загрязняющих веществ, выделяющихся при окраске, доля уловленного валового выброса загрязняющих веществ и нагрузка на окружающую среду снизятся.

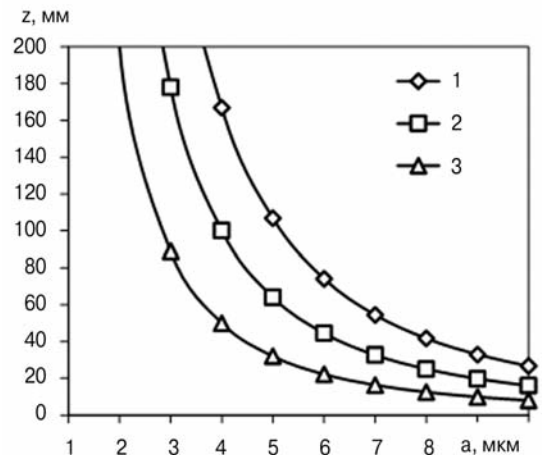


Рис. 4. Зависимость высоты сепарационной зоны z от диаметра частиц a и скорости входа воздуха в элементы W_{bx} при $b = 80$ мм, $A = 0,5$: 1 – 3 м/с; 2 – 5 м/с; 3 – 10 м/с

Fig. 4. Dependence of the height of the separation zone z on the diameter of the particles a and the speed of air entry into the elements W_{bx} at $b = 80$ mm, $A = 0.5$: 1 – 3 m/s; 2 – 5 m/s; 3 – 10 m/s

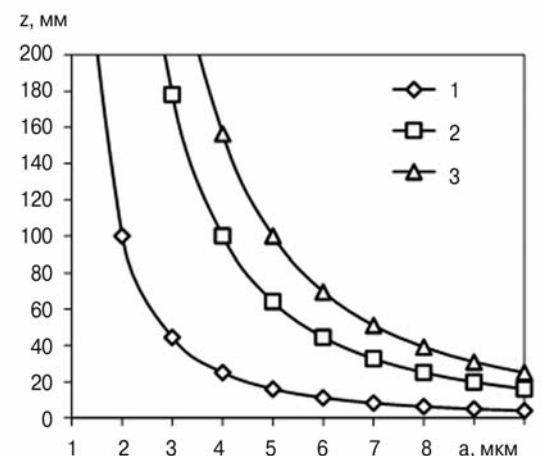


Рис. 5. Зависимость высоты сепарационной зоны z от диаметра частиц a и размера стороны квадратного элемента b при $W_{bx} = 5$ м/с, $A = 0,5$: 1 – 40 мм; 2 – 80 мм; 3 – 100 мм

Fig. 5. Dependence of the height of the separation zone z on the diameter of the particles a and the width of the side of the square element b at $W_{bx} = 5$ m/s, $A = 0.5$: 1 – 40 mm; 2 – 80 mm; 3 – 100 mm

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-616.2020.8.

The study was carried out with the financial support of the grant of the President of the Russian Federation No. MK-616.2020.8.

Литература

1. World Motor Vehicle Production. <https://www.oica.net/production-statistics/>.
2. Распоряжение Правительства РФ от 28.04.2018 № 831-р "Об утверждении Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2025 года".
3. Chen J., Liu R., Gao Y., Li G., An T. Preferential purification of oxygenated volatile organic compounds than monoaromatics emitted from paint spray booth and risk attenuation by the integrated decontamination technique. *Journal of Cleaner Production*. 2017. V. 148. P. 268–275.
4. Pierucci S., Del Rosso R., Bombardi D., Concu A., Lugli G. An innovative sustainable process for VOCs recovery from spray paint booths. *Energy*. 2005. V. 30. № 8. P. 1377–1386.
5. Sparks T., Chase G. Section 3 — Air and Gas Filtration. *Filters and Filtration Handbook (Sixth Edition)*, Butterworth-Heinemann, 2016. P. 117–198.
6. Jones K., Cocker J., Piney M. Isocyanate exposure control in motor vehicle paint spraying: evidence from biological monitoring. *The Annals of Occupational Hygiene*. 2013. V. 57. № 2. P. 200–209.
7. Bolsover J., Rajan-Sithamparanadarajah B., Vaughan N. Workplace protection of air-fed visors used in paint spraying operations. *The Annals of Occupational Hygiene*. 2006. V. 50. № 3. P. 219–229.
8. Clayton M., Baxter N. Air-fed visors used for isocyanate paint spraying—potential exposure when the visor is lifted. *The Annals of Occupational Hygiene*. 2015. V. 59. № 9. P. 1179–1189.
9. Мельникова К.С., Бешапошникова К.М. Мероприятия по защите атмосферного воздуха от промышленных выбросов. *Образование и наука в современном мире. Инновации*. 2016. № 6-1. С. 167–173.
10. The NAFA Guide to Air Filtration, published by the National Air Filtration Association 5th Edition, 2014. https://netforum.avectra.com/eweb/shopping/shopping.aspx?site=nafa&webcode=shopping&prd_key=869ba7ba-c155-4525-a7a2-ce56acbbead6.
11. Hall R. Air filtration: Is air filter recycling for you? *Filtration & Separation*. 2009. V. 46. № 4. P. 34–36.
12. Папко Ю.О. Способы очистки воздуха в окрасочных камерах. *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2017. Т. 2. С. 373–381.
13. Joseph R. Ventilation and paint filtration requirements for spray booths. *Metal Finishing*. 2007. V. 105. № 7-8. P. 82–84.
14. Ларионов Н.М., Рыбышенков А.С. *Промышленная экология*. М., Издательство Юрайт, 2012. 495 с.
15. Гавриленков А.М., Каргашилов Д.В., Потапова С.О. Повышение взрывобезопасности окрасочных камер. *Современные проблемы гражданской защиты*. 2017. № 4 (25). С. 117–120.
16. Merentsov N.A., Balashov V.A., Golovanchikov A.B., Topilin M.V., Persidskiy A.V. Approximation of the filtration flow curve through the layers of sorbents and ionites in petrochemical and environmental mass transfer equipment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1889. P. 032022.
17. Мишнева Г.С., Папко Ю.О. Экологические аспекты очистки воздуха в окрасочных камерах. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2016. № 4 (24). С. 62–74.
18. Афанасенко В.Г., Боев Е.В. Разработка конструкции и методики расчета вихревого устройства для очистки газов. *Бултеровские сообщения*. 2015. Т. 43. № 7. С. 135–139.
19. Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Данг С.В., Нгуен В.Л. Сепаратор для улавливания мелкодисперсных капель из газовых потоков промышленных предприятий. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2019. № 4. С. 37–39.

References

1. World Motor Vehicle Production. <https://www.oica.net/production-statistics/>.
2. *Rasporyazhenie* Pravitel'stva RF ot 28.04.2018 № 831-r "Ob utverzhdenii Strategii razvitiya avtomobil'noi promyshlennosti Rossiiskoi Federatsii na period do 2025 goda".
3. Chen J., Liu R., Gao Y., Li G., An T. Preferential purification of oxygenated volatile organic compounds than monoaromatics emitted from paint spray booth and risk attenuation by the integrated decontamination technique. *Journal of Cleaner Production*. 2017. V. 148. P. 268–275.
4. Pierucci S., Del Rosso R., Bombardi D., Concu A., Lugli G. An innovative sustainable process for VOCs recovery from spray paint booths. *Energy*. 2005. V. 30. № 8. P. 1377–1386.
5. Sparks T., Chase G. Section 3 — Air and Gas Filtration. *Filters and Filtration Handbook (Sixth Edition)*, Butterworth-Heinemann, 2016. P. 117–198.
6. Jones K., Cocker J., Piney M. Isocyanate exposure control in motor vehicle paint spraying: evidence from biological monitoring. *The Annals of Occupational Hygiene*. 2013. V. 57. № 2. P. 200–209.
7. Bolsover J., Rajan-Sithamparanadarajah B., Vaughan N. Workplace protection of air-fed visors used in paint spraying operations. *The Annals of Occupational Hygiene*. 2006. V. 50. № 3. P. 219–229.
8. Clayton M., Baxter N. Air-fed visors used for isocyanate paint spraying—potential exposure when the visor is lifted. *The Annals of Occupational Hygiene*. 2015. V. 59. № 9. P. 1179–1189.
9. Mel'nikova K.S., Besshaposhnikova K.M. Meropriyatiya po zashchite atmosfernogo vozdukhа ot promyshlennykh vybrosov. *Obrazovanie i nauka v sovremennom mire. Innovatsii*. 2016. № 6-1. S. 167–173.
10. The NAFA Guide to Air Filtration, published by the National Air Filtration Association 5th Edition, 2014. https://netforum.avectra.com/eweb/shopping/shopping.aspx?site=nafa&webcode=shopping&prd_key=869ba7ba-c155-4525-a7a2-ce56acbbead6.
11. Hall R. Air filtration: Is air filter recycling for you? *Filtration & Separation*. 2009. V. 46. № 4. P. 34–36.
12. Papko Yu.O. *Sposoby ochildki vozdukhа v okrasochnykh kamerakh. Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*. 2017. T. 2. S. 373–381.
13. Joseph R. Ventilation and paint filtration requirements for spray booths. *Metal Finishing*. 2007. V. 105. № 7-8. P. 82–84.
14. Larionov N.M., Ryabyshnikov A.S. *Promyshlennaya ekologiya*. M., Izdatel'stvo Yurait, 2012. 495 s.
15. Gavrilencov A.M., Kargashilov D.V., Potapova S.O. Povyshenie vzryvobezopasnosti okrasochnykh kamer. *Sovremennye problemy grazhdanskoi zashchity*. 2017. № 4 (25). S. 117–120.
16. Merentsov N.A., Balashov V.A., Golovanchikov A.B., Topilin M.V., Persidskiy A.V. Approximation of the filtration flow curve through the layers of sorbents and ionites in petrochemical and environmental mass transfer equipment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1889. P. 032022.
17. Mishneva G.S., Papko Yu.O. *Ekologicheskie aspekty ochildki vozdukhа v okrasochnykh kamerakh. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*. 2016. № 4 (24). S. 62–74.
18. Afanasenko V.G., Boev E.V. *Razrabotka konstruktssii i metodiki rascheta vikhrevogo ustroistva dlya ochildki gazov. Butlerovskie soobshcheniya*. 2015. T. 43. № 7. S. 135–139.
19. Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Dang S.V., Nguen V.L. *Separator dlya ulavlivaniya melkodispersnykh kapel' iz gazovykh potokov promyshlennykh predpriyatii. Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2019. № 4. S. 37–39.

Р.Я. Биккулов – ассистент, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), e-mail: bikkulov-ry@mail.ru • О.С. Дмитриева – канд. техн. наук, доцент, Казанский национальный исследовательский технологический университет, e-mail: ja_deva@mail.ru • А.В. Дмитриев – д-р техн. наук, доцент, КГЭУ, e-mail: ieremiada@gmail.com • Г.Р. Бадретдинова – инженер, КГЭУ, e-mail: nice.badretdinova@mail.ru

R.Ya. Bikkulov – assistant, Kazan State Power Engineering University (KSPEU), e-mail: bikkulov-ry@mail.ru • O.S. Dmitrieva – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Kazan National Research Technological University, e-mail: ja_deva@mail.ru • A.V. Dmitriev – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, KSPEU, e-mail: ieremiada@gmail.com • G.R. Badretdinova – Engineer, KSPEU, e-mail: nice.badretdinova@mail.ru