

УДК 697.9

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

## **ПРИМЕНЕНИЕ СЕПАРАЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КВАДРАТНОЙ ФОРМЫ В ПОКРАСОЧНЫХ КАМЕРАХ**

*Ключевые слова: покрасочные камеры, мелкодисперсные частицы, квадратный сепаратор, гидравлическое сопротивление.*

*Большое количество покрасочных камер используется в промышленности, как следствие перед предприятием стоят задачи правильного обслуживания оборудования. Образующиеся вредные выбросы при нанесении покрытий на поверхности рабочих изделий являются результатом испарения органических растворителей в покрытиях и состоят в основном из летучих органических соединений. Химические вещества и твердые частицы металлов, входящих в состав красок, вызывают обеспокоенность при утилизации опасных отходов. В настоящее время ведутся исследования по минимизации вредных факторов, влияющих на экологическую нагрузку, общие маршруты утилизации полученных отходов в ходе производственных процессов, связанных с применением лакокрасочных покрытий. При этом важными вопросами остаются снижение экономических издержек. В работе представлено обоснование применимости устройства для улавливания мелкодисперсных частиц в покрасочных камерах. Представлено технологическое решение для снижения экономических затрат предприятия при обслуживании покрасочных камер. Авторами была внедрена модель сепаратора с квадратными элементами на предприятии ООО «КАМАТЕК», занимающимся производством изделий из стеклонаполненного композиционного материала. Важными особенностями сепаратора с квадратными элементами являются простота конструкции и высокая эффективность улавливания мелкодисперсных частиц из газовых потоков. Улавливание мелкодисперсных частиц происходит за счет возникновения вихревой структуры внутри устройства. Описан принцип процесса улавливания мелкодисперсных частиц из газовых потоков. Несомненным достоинством устройства является возможность изменения конструктивных размеров сепаратора от размеров проходного сечения воздуховода. Был проведен анализ экономических затрат на закупку фильтров и их утилизацию. Было установлено, что применение сепаратора с квадратными элементами позволит уменьшить экономические затраты производства, связанные с частой заменой фильтрующих материалов и налогом на выбросы в окружающую среду, снизить неблагоприятное воздействие на здоровье человека и окружающую среду летучих органических соединений. Представлены результаты оценки влияния конструктивных размеров разработанного сепаратора на работу в системе фильтрации.*

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

## **INSTALLATION OF SQUARE-SHAPED SEPARATION ELEMENTS IN PAINT BOOTHS**

*Keywords: paint booths, fine particles, square separator, hydraulic resistance.*

*A large number of spray booths are used in industry, as a result, the enterprise faces the task of proper equipment maintenance. The resulting emissions from the coating of workpieces are the result of the evaporation of organic solvents in the coatings and are composed primarily of volatile organic compounds. Chemicals and metal particulates in paints are of concern when disposing of hazardous waste. Currently, research is underway to minimize harmful factors affecting the environmental load, general routes for the disposal of the resulting waste in the course of production processes associated with the use of paint and varnish coatings. At the same time, reducing economic costs remains an important issue. The paper presents the substantiation of the applicability of the device for capturing fine particles in paint booths. A technological solution is presented to reduce the economic costs of an enterprise when servicing spray booths. The authors introduced a model of a separator with square elements at the KAMATEK LLC enterprise, which produces products from glass-filled composite material. Important features of a separator with square elements are simplicity of design and high efficiency of capturing fine particles from gas streams. Fine particles are captured due to the appearance of a vortex structure inside the device. The principle of the process of capturing fine particles from gas streams is described. The undoubted advantage of the device is the ability to change the structural dimensions of the separator from the dimensions of the flow section of the air duct. An analysis was made of the economic costs of filter procurement and disposal. It was found that the use of a separator with square elements will reduce the economic costs of production associated with frequent replacement of filter materials and tax on environmental emissions, and reduce the adverse effects on human health and the environment of volatile organic compounds. The results of assessing the influence of the design dimensions of the developed separator on the operation in the filtration system are presented.*

Покрасочные камеры широко используются в таких отраслях, как машиностроение, судостроение, авиастроение и т.п. Современными производителями предлагается много различных вариантов исполнения камер для покраски, выбор зависит от цели использования производством, особенностей климата, места расположения и технических параметров, общими вопросами остаются – правильное обслуживание специализированного оборудования камеры, его надеж-

ность и срок эксплуатации, подбор и регулярная замена фильтрующего материала. Правильное обслуживание покрасочной камеры в целом обеспечивает выпуск качественной продукции производства, способствует снижению потерь ценного материала, а также увеличивает свой срок эксплуатации [1].

При этом, качество выпускаемой продукции зависит не только от используемого оборудования, но и, от состава краски. Лакокрасочные покрытия, кото-

рые необходимо применять при окрашивании изделий, представляют собой суспензию, т.е. смесь жидкости с твердыми частицами дорогих металлов, таких как титан (около 50%), свинец (около 30%), хром (около 10%), кремний (около 3%) и др. Для получения глянцевых покрытий размер частиц должен составлять 0,5-5 мкм, для матовых – 1-10 мкм. Использование дорогих металлов необходимо в лакокрасочных покрытиях, так как они обеспечивают защиту от коррозии и агрессивного внешнего воздействия, а также продлевают срок службы изделия [2, 3].

Однако, зачастую, в камерах в процессе окрашивания изделий происходит унос частиц краски системой фильтрации для нежелательного избыточного распыления, предотвращения загрязнения воздуха в целях организации стабильности технологии и уменьшения неблагоприятного воздействия на здоровье человека летучих органических соединений. Оснащение камер потолочными и напольными фильтрами позволяет улавливать частицы красок и пыли, минимизировать загрязнение покрасочной камеры и время ее простоя, затрачиваемое на поддержание камеры в чистоте [4].

Обслуживание покрасочной камеры предполагает закупку большого объема фильтрующих материалов. Далее в ходе отработки фильтрующим элементом своего ресурса возникает сложность с утилизацией производственных отходов, это влияет на экономические затраты, в том числе связанные со снижением экологической нагрузки, возникающей в результате производственных процессов. Фильтры мокрой и твердой очистки, используемые в покрасочных камерах для улавливания частиц пыли, состоят из дорогих полимеров, которые долго разлагаются в природе, нанося ей существенный вред. В результате, производство обязано выплачивать огромный налог за негативное воздействие на окружающую среду в зависимости от объема утилизируемых отходов. В случае с покрасочными камерами, выбросы только от массы металлов без учета фильтрующего материала на одном производстве составляют 10 т, а, как известно, подобных производств в России и мире десятки тысяч [5-7].

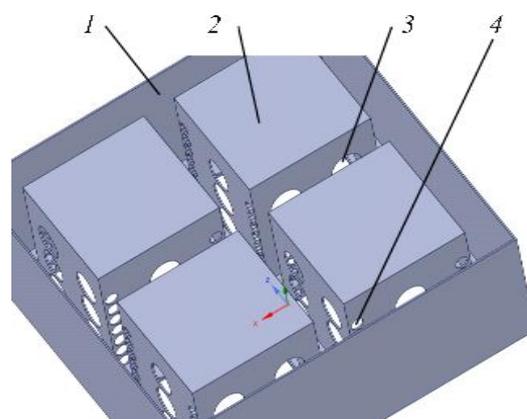
Для решения подобных проблем активно разрабатываются технологические устройства, перед которыми стоит ряд таких задач, как:

1. уменьшение производственных отходов, существенно влияющих на окружающую среду и здоровье человека;
2. увеличение срока службы используемого оборудования производства покраски;
3. выпуск качественной продукции;
4. уменьшение экономических затрат [8, 9].

Среди существующих устройств, предназначенных для улавливания мелкодисперсных частиц пыли, можно выделить циклоны, фильтры мокрой и тонкой очистки, пылесосительные камеры, пылеуловители (скрубберы), электрофильтры. Однако, часто, данные устройства не удовлетворяют требованиям производства. К примеру, в покрасочных камерах, сечение воздухопроводов имеет квадратную или прямоугольную форму с размерами более 0,5×0,5 м. При эксплуата-

ции в них возникает большое гидравлическое сопротивление [10, 11].

Авторами статьи был разработан и внедрен сепаратор с квадратными элементами для повышения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц из воздуха в покрасочных камерах (рис.1) [12], который состоит из корпуса 1, четырех сепарационных элементов 2 в виде квадратных труб с круглыми отверстиями 3, 4 на боковых гранях и пространство для осаждения осадка. В данном устройстве на сепарационных элементах прилегающие к углам отверстия в 2 раза меньше отверстий, расположенных на некотором расстоянии от них. Такое расположение отверстий позволяет создавать в сепараторе устойчивую вихревую структуру.



**Рис. 1 – Трехмерная модель сепаратора с квадратными элементами для улавливания мелкодисперсных частиц из газового потока: 1 – корпус, 2 – сепарационные элементы, 3, 4 – отверстия**

Процесс улавливания мелкодисперсных частиц в сепараторе с квадратными элементами происходит следующим образом – отработанный поток воздуха входит в сепаратор через квадратные элементы 2. По мере своего прямолинейного движения поток в равных долях постепенно отклоняется в сторону круглых отверстий 3, как правило, он становится перпендикулярен основному направлению. При приближении потока к круглым отверстиям 3, меньшая часть потока направляется к боковым отверстиям 4, необходимым для исключения застойных зон в угловых областях сепарационных элементов 2.

Причем поток, проходя через отверстия сепарационных элементов 3, разделяется на две равные части и начинает закручиваться (где «+» отмечены вихри, вращающиеся по часовой стрелке, «-» отмечены вихри, вращающиеся против часовой стрелки), при этом образуя по всей площади устройства вихри в определенном количестве (рис. 2). При завихрении маленьких вихрей возникают большие значения центробежных сил. Под действием возникающей центробежной силы мелкие твердые частицы начинают выбиваться из структуры потока и оседают в «мертвых» зонах сепаратора, т.е. осадок образуется между вихрями и стенками устройства. Накопление происходит в пространстве для осаждения до определенного момента.

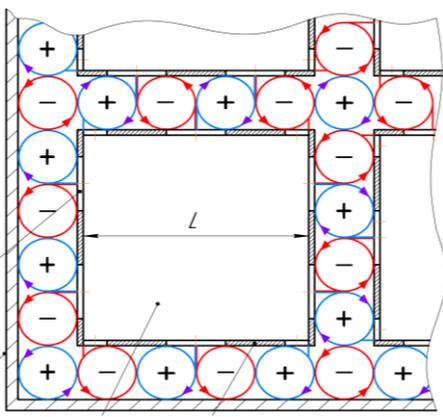


Рис. 2 – Схема взаимного расположения вихрей в устройстве,  $L$  – ширина сепарационного элемента

Разработанный сепаратор с квадратными элементами был внедрен в 2021 году на предприятии ООО «КАМАТЕК». Данное устройство прошло промышленное испытание. На рис. 3 наглядно показан отработанный сепаратор с квадратными элементами после извлечения из вентиляционного канала. Как видно, заполняемость устройства частицами краски и пыли составляет 100%. Анализ работы устройства на предприятии показывает хорошие результаты, высокое содержание мелкодисперсных частиц, загрязнение носит эпизодический характер.



Рис. 3 – Отработанный сепаратор с квадратными элементами после извлечения из вентиляционного канала

Предприятием ООО «КАМАТЕК» был проведен экономический расчет расходов на закупку напольных и потолочных фильтров для улавливания мелкодисперсных частиц, а также на их утилизацию. По данным, предоставленным предприятием, известно, что стоимость потолочного фильтра размером  $2 \times 20$  м составляет 18565,57 рублей. Однако расход потолочного фильтра, который необходим на одну мойку (их замену) в месяц –  $2 \times 24$  м. Следовательно, закупка потолочного фильтра требуемого размера для предприятия составляет 22278,69 рублей на 1 мойку в месяц.

Стоимость закупаемых напольных фильтров размером  $0,75 \times 20$  м составляет 3311,61 рублей, а его необходимый расход на 1 мойку –  $0,75 \times 105$  м. В ме-

сяц предприятие осуществляет 5 моек напольных фильтров. Таким образом, на закупку напольных фильтров требуемого размера предприятие расходует 86929,8 рублей в месяц.

По итогу, предприятие ООО «КАМАТЕК» на закупку потолочных и напольных фильтров в месяц расходует 109208,5 рублей.

Известно, что отработанные фильтры собирают в контейнер с нескольких моек и утилизируют общим количеством. Стоимость утилизации без их транспортировки в 2019 году за 16,6 т по цене 8643,87 руб./т составила 143488,2 рублей, в 2020 году 10,9 т по цене 9250 руб./т – 100825 рублей, а в 2021 году за 9,74 т по цене 9713 руб./т – 94604,62 рублей.

В результате проведенного расчета можно сделать вывод, что на эксплуатацию фильтров и их утилизацию предприятие осуществило расходы:

1. в 2019 году - 252696,7 рублей,
2. в 2020 году - 210033,5 рублей,
3. в 2021 году - 203813,12 рублей.

Оценка влияния конструктивных размеров на работу устройства проводилась при коэффициенте динамической вязкости среды  $0,0000178$  Па·с, плотность улавливаемых частиц  $1900$  кг/м<sup>3</sup> [13, 14]. Для улавливания частиц размером менее 2 мкм необходимо создавать устройства с шириной сепарационного элемента менее 40 мм и высотой от 100 мм. Снижение скорости движения запыленного газа через устройство приводит к увеличению высоты сепарационной зоны (рис. 4).

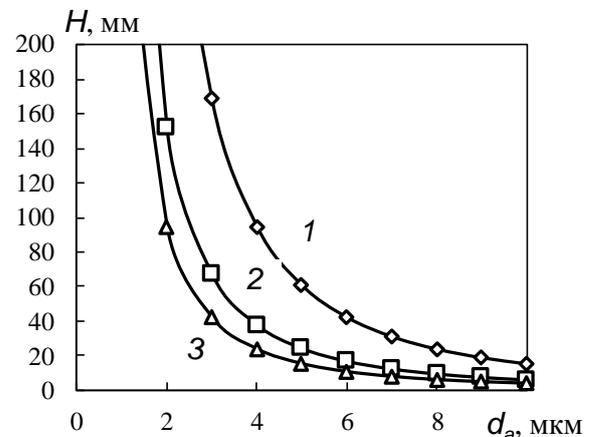


Рис. 4 – Высота сепарационной зоны  $H$  в зависимости от диаметра частиц  $d_a$ , скорость воздуха на входе, м/с: 1 – 2; 2 – 5; 3 – 8, коэффициент крутки 0,4,  $L = 60$  мм

Таким образом, применение сепараторов позволяет продлить эффективную работу покрасочной камеры, обеспечить высокую защиту от вредных загрязнений, снизить издержки на замену фильтров, обеспечить более длительную работу элементов камеры, уменьшив время простоя оборудования.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-616.2020.8.

### Литература

1. L. Middendorf, *Metal Finishing*, **100**, 10, 47-52 (2002).

2. R. Joseph, *Metal Finishing*, **105**, 7-8, 82-84 (2007).
3. R. Joseph, *Metal Finishing*, **101**, 6, 123-125 (2003).
4. S. Pierucci, D. Bombardi, A. Concu, G. Lugli, *Computer Aided Chemical Engineering*, **14**, 251-256 (2003).
5. G. Salihoglu, N.K. Salihoglu, *Journal of Environmental Management*, **169**, 223-235 (2016).
6. J. Chen, R. Liu, Y. Gao, G. Li, T. An, *Journal of Cleaner Production*, 148, 268-275 (2017).
7. Ю.О. Папк, *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*, **2**, 373-381 (2017).
8. Г.С. Мишнева, Ю.О. Папко, *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*, **24**, 4, 62-74 (2016).
9. M. Clayton, N. Baxter, *The Annals of Occupational Hygiene*, **59**, 9, 1179-1189 (2015).
10. Н.М. Ларионов, А.С. Рябышенков, *Промышленная экология*. Юрайт, Москва, 2012. 495 с.
11. А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, С.В. Данг, В.Л. Нгуен, *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 4, 37-39 (2019).
12. А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, В.Э. Зинуров, И.Н. Мадьшев. Заявка на полезную модель № 2021120725 от 14.07.2021. *Мультивихревой сепаратор для очистки газов*.
13. В.В. Харьков, А.В. Дмитриев, А.Р. Галимова, О.С. Дмитриева, *Вестник технологического университета*, **24**, 7, 64-67 (2021).
14. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, *Вестник технологического университета*, **23**, 3, 85-88 (2020).

---

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

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