

**Р. Я. Биккулов, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев,  
О. С. Дмитриева, Т. М. Тахавиев**

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МУЛЬТИВИХРЕВОГО СЕПАРАТОРА ПРИ УЛАВЛИВАНИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ В СИСТЕМЕ ПОДГОТОВКИ ВОЗДУХА В ОКРАСОЧНЫХ КАМЕРАХ**

*Ключевые слова:* мультिवихревой сепаратор, окрасочная камера, улавливание частиц, очистка воздуха, эффективность.

*Окрасочные камеры используются во многих отраслях промышленности. При этом технологии окрашивания сопряжены с использованием вредных в санитарно-гигиеническом и экологическом отношении лакокрасочных материалов. Загрязнения образуются в процессе эксплуатации окрасочных камер при нанесении краски на окрашиваемые поверхности. Системы очистки воздуха в окрасочных камерах содержат фильтрующие элементы, их эффективность работы зависит от своевременного технического обслуживания и совершенства используемых технологий и материалов. Для решения проблемы очистки воздуха от мелкодисперсных частиц, содержащихся в окрасочном тумане, и повышения эффективности реализации этого процесса разработана конструкция мультिवихревого сепаратора. Конструкция устройства содержит несколько сепарационных элементов квадратной формы. Причем в области между корпусом и стенкой таких элементов образуется вихревая структура отработанного газового потока, в котором происходит удаление мелкодисперсных частиц. С учетом полученного ранее уравнения по определению высоты сепарационной зоны найдены геометрические размеры области, находясь в которой частицы будут прилипать к стенкам и эффективность улавливания достигнет 100%. Получены соотношения по определению эффективности сепарации мультिवихревым устройством с корректировкой на величину критического диаметра уловленных частиц. Показано, что эффективность разработанного мультिवихревого сепарационного устройства увеличивается с ростом диаметра и плотности частиц. Это обусловлено тем, что при увеличении размера частиц и их веса, они легче поддаются выбиванию из структурированного потока за счет инерции. Также было обнаружено, что эффективность сепаратора возрастает при уменьшении степени крутки. При степени крутки равной 0,25 эффективность улавливания мультिवихревого сепаратора для частиц размером 2 мкм в диаметре составляет более 91%. Определено число Стокса, характеризующее поведение частиц, взвешенных в потоке. Доказано, что при числах Стокса более 3 достигается 100%-ая эффективность улавливания мелкодисперсных частиц мультिवихревым сепаратором. Результаты исследований показали, что установка мультिवихревого сепаратора в воздухопровод окрасочных камер имеет потенциал для промышленного применения.*

**R. J. Bikkulov, V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev,  
O. S. Dmitrieva, T. M. Takhaviev**

## **EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF A MULTIVORTEX SEPARATOR FOR CAPTURING FINE PARTICLES FROM GAS FLOWS IN THE AIR PREPARATION SYSTEM IN PAINT BOOTHS**

*Keywords:* multivortex separator, spray booth, particle trapping, air purification, efficiency.

*Paint spraying booths are used in many industries. At the same time, the painting technologies involve the use of paint materials that are harmful in terms of hygiene and ecology. Pollutants are formed in the process of operation of paint booths when applying paint to the painted surfaces. Air cleaning systems in paint shops contain filter elements and their efficiency depends on timely maintenance and perfection of technologies and materials used. To solve the problem of removal of fine particles from the air contained in the spray mist and to increase the efficiency of this process the construction of a multi-vortex separator was developed. Device design comprises several square-shaped separating elements. In the area between the body and the wall of these elements there is a vortex structure of worked-out gas flow where fine particles are being removed. Considering the obtained earlier equation for determining the height of the separation zone the geometric sizes of the area where the particles will stick to the walls and the efficiency of trapping will reach 100% are found. The relations for determining the efficiency of separation by multivortex device with correction for the value of the critical diameter of trapped particles were obtained. It is shown that the efficiency of the developed multivortex separation device increases with the increase of particle diameter and density. This is due to the fact that with increasing particle size and weight, the particles are more easily knocked out of the structured flow due to inertia. It was also found that the efficiency of the separator increases when the degree of twist decreases. At a degree of twist equal to 0.25 the efficiency of the multi-vortex separator trapping for particles of 2 microns in diameter is more than 91%. Stokes number, which characterizes the behavior of particles suspended in the flow, was determined. It was proved that at Stokes number greater than 3 the multi-vortex separator achieves 100% efficiency of fine particles trapping. The results of the research showed that installation of the multi-vortex separator in the air ducts of paint shops has a potential for industrial application.*

Окрасочные камеры используются во многих отраслях промышленности, однако всех их объединяет

необходимость надлежащего обслуживания. Своевременное техническое обслуживание не только сохранит красивый внешний вид окрашенного изделия, но

и обеспечит высокое качество нанесения краски и продлит срок службы оборудования камеры. Основная задача заключается в том, чтобы свести к минимуму образующиеся загрязнения при распылении краски и поддерживать требуемый воздухообмен камеры с помощью системы вентиляции, обеспечить персоналу безопасность выполнения работ по покраске, предотвращая создание опасных концентраций растворителей в воздухе [1].

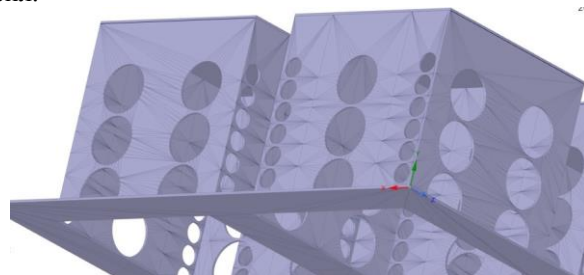
Распыл краски является распространенным загрязняющим веществом в процессе окрашивания. Он состоит из частиц тумана краски, таких как красители, органические растворители, пигменты, связующие и другие летучие органические соединения. Между тем, летучие компоненты краски состоят из толуола, ксилола, сложных эфиров, кетонов, олефинов и т. д., и большинство из них трудно растворимы в воде [2, 3]. Частицы мелкие и обладают высокой адгезией, нанося серьезный вред дыхательной и иммунной системе рабочего персонала [4, 5] и окружающей среде [6]. При очистке распыляемых отработанных газов аэрозоль краски сначала подвергается подготовке, чтобы уменьшить содержание липких частиц, летучие соединения разлагаются до  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  или других относительно менее вредных компонентов [7] путем адсорбции [8] и каталитического окисления [9-11]. Поскольку липкие частицы могут отравлять каталитическую активность или снижать адсорбционную способность, то перед очисткой летучих органических соединений необходимо удалить туман краски, что является сложным и ключевым моментом в очистке отработанных газов распыления.

В настоящее время широко используемые способы очистки воздуха от окрасочного тумана можно разделить на сухие и мокрые (влажные). В окрасочных камерах с сухим способом очистки воздуха используются фильтрующие материалы на линиях подачи приточного воздуха и отвода выбрасываемого потока для удаления нежелательных избытков краски, которая не попадает после распыла на окрашиваемую деталь, т.е. окрасочного тумана [12, 13]. Такие материалы должны регулярно меняться, чтобы обеспечить требуемый воздушный поток в камере. Как только начинается покраска, фильтрующий материал начинает загрязняться. Это загрязнение замедляет поток воздуха и сводит к минимуму эффективность окрашивания. Другими словами, вы начинаете с высокой эффективности, позволяющей правильно наносить краску, а уже потом по мере накопления загрязняющих веществ, этот процесс становится менее эффективным, что отражается на качестве окрашенной детали. В процессе регулярного технического обслуживания фильтр должен быть заменен и утилизирован в установленном производителем порядке. Фактический срок службы будет варьироваться в зависимости от объема подаваемой краски, эффективности переноса краски на деталь, т.е. то количество краски, которое становится частью окрашиваемого изделия, от количества твердых частиц в используемой краске и типов используемых фильтров. Лучшим индикатором замены фильтра является манометр (датчик перепада давления). Как только поры фильтра забиваются, перепад давления увеличивается [14].

Окрасочные камеры с системой мокрой очистки воздуха от тумана краски (например, с помощью распылительной колонны) отличаются простотой эксплуатации и экономичностью [15], однако с микронными частицами трудно иметь дело, также дополнительной проблемой является вторичное загрязнение [16, 17]. Хотя процесс очистки от окрасочного тумана сухим способом не приводит к образованию сточных вод, однако он сопровождается образованием большого количества опасных отходов. Важно отметить, что отработанные фильтры должны утилизироваться как опасные отходы. Также отходы образуются за счет того, что не все излишки краски будут улавливаться фильтрами. Некоторые из них прилипнут к полу, стенам и потолку. Чтобы помочь в очистке этих областей, рекомендуется покрывать склонные к загрязнению участки камеры специальным защитным покрытием, при контакте загрязнителей воздуха с которым они будут улавливаться [18].

Таким образом, учитывая вышесказанное, актуальность проблемы очистки отработанных газов от окрасочного тумана не вызывает сомнений, работ, посвященных удалению из туманов краски мелкодисперсных частиц, выполнено мало.

Авторами [19] для удаления из газовых потоков мелкодисперсных частиц предлагается конструкция мультивихревого сепаратора. Корпус устройства имеет квадратную форму, внутри него проделано 4 квадратных отверстия, образуя сепарационные элементы квадратной формы (рис. 1). Для наглядности корпус устройства на рис. 1 не показан. В стенках данных элементов проделано несколько рядов круглых отверстий, служащих для отвода газа в пространство между наружными стенками сепарационных элементов и внутренними стенками устройства. Это пространство является сепарационной зоной, в которой при движении загрязненной среды создается вихревая структура и происходит сепарация частиц из отработанного газа за счет возникновения центробежных сил.



**Рис. 1 – Сепарационные элементы квадратной формы**

**Fig. 1 – Square-shaped separating elements**

Процесс улавливания мелкодисперсных частиц из газов можно представить следующим образом. Газовая среда с мелкодисперсными частицами входит в устройство через проделанные квадратные отверстия. Постепенно поток в равных долях распределяется по круглым отверстиям, которые проделаны в стенках сепарационных элементов. Круглые отверстия конструктивно расположены таким образом, что при выходе каждой струйки газа с мелкодисперсными частицами из них, они распадаются на два. При этом каждая

новая струйка газа движется в противоположную друг от друга сторону, образуя отдельный вихрь в сепарационной зоне мультивихревого сепаратора. Данный эффект проиллюстрирован и в других работах [20, 21]. При быстром вращении вихрей в сепарационной зоне устройства возникают центробежные силы высоких значений вследствие того, что радиус вихрей относительно мал. Под действием центробежного поля мелкодисперсные частицы отбрасываются к стенкам устройства и прилипают к ним. Далее газовый поток выходит из мультивихревого сепаратора.

В ранее проведенных исследованиях [22] была получена формула, которая позволяет определить необходимую высоту сепарационной зоны мультивихревого сепаратора в зависимости от технологических, конструктивных и теплофизических параметров:

$$z = \frac{9}{16} \frac{\mu_G}{\rho_a W_{bx}} \left( \frac{bA}{a} \right)^2, \quad (1)$$

где  $\mu_G$  – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с;  $\rho_a$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $W_{bx}$  – скорость газа на входе в устройство, м/с;  $b$  – ширина квадратного элемента мультивихревого сепаратора, м;  $A$  – коэффициент крутки;  $a$  – диаметр частиц, м.

Следует отметить, что коэффициент крутки  $A$  вычисляется по формуле (2):

$$A = \frac{W_{bx}}{W_{sl}}, \quad (2)$$

где  $W_{sl}$  – скорость газа в сепарационной зоне, м/с.

Если выразить радиус вихря через ширину квадратного элемента мультивихревого сепаратора, то он будет равен  $b/8$ . В приведенной формуле (1) предполагается, что для улавливания мелкодисперсной частицы мультивихревым сепаратором с эффективностью 100%, она должна успеть пройти расстояние  $b/8$  по мере своего движения вверх по сепарационной зоне. В ином случае частицы покинут мультивихревое сепарационное устройство. Также можно предположить, что при прохождении высоты  $z$  будут уловлены те мелкодисперсные частицы, которые на уровне выхода газа через круглые отверстия находились на некотором расстоянии от  $b/8$ . Это является условием улавливания частиц с эффективностью 100%. Чтобы охарактеризовать это расстояние, введем параметр  $b_r$ .

Преобразовав формулу (1), можно получить следующее выражение:

$$b_r = \frac{1}{6} \frac{a}{A} \sqrt{\frac{z \rho_a W_{bx}}{\mu_G}}. \quad (3)$$

Следуя вышеизложенному тезису, что частицы осядут на поверхности внутренней стенки корпуса мультивихревого сепарационного устройства при условии их нахождения в области вихря с расстоянием  $b_r$ , то из соотношения площадей области с расстоянием  $b_r$  и общей области с радиусом  $b/8$  можно найти эффективность устройства:

$$E = \frac{16b_r(b-b_r)}{b^2}. \quad (4)$$

Подставим (3) и (4) в формулу (1):

$$E = \frac{8}{3} \frac{a}{Ab} \sqrt{\frac{z \rho_a W_{bx}}{\mu_G}} \left( 1 - \frac{2}{3} \frac{a}{Ab} \sqrt{\frac{z \rho_a W_{bx}}{\mu_G}} \right). \quad (5)$$

Анализ формулы (5) показывает, что существует критическое значение диаметра частицы  $a_{cr}$  при достижении которого, эффективность сепарации частиц из газового потока, равная единице, начинает снижаться:

$$a_{cr} = \frac{3}{4} Ab \sqrt{\frac{\mu_G}{z \rho_a W_{bx}}}. \quad (6)$$

Вследствие этого введем ограничение, используя критическое значение диаметра частицы  $a_{cr}$ :

$$\begin{cases} E = \frac{8}{3} \frac{a}{Ab} \sqrt{\frac{z \rho_a W_{bx}}{\mu_G}} \left( 1 - \frac{2}{3} \frac{a}{Ab} \sqrt{\frac{z \rho_a W_{bx}}{\mu_G}} \right) & \text{при } a < a_{cr}; \\ E = 1 & \text{при } a > a_{cr}. \end{cases}$$

Целью данной работы является оценить эффективность мультивихревого сепаратора при улавливании частиц разного диаметра и плотности.

В ходе исследований рассчитывалось число Стокса по выражению:

$$Stk = \frac{4\rho_a a^2 W_{bx}}{\mu_G Ab}.$$

Для получения выборки данных в ходе расчетов часть параметров принималась постоянной, а другие варьировались в определенном интервале значений. В качестве постоянных параметров принимались следующие: динамическая вязкость среды 0,0000178 Па·с, ширина сепарационного элемента квадратной формы 80 мм, коэффициент крутки 0,5, плотность частиц 2000 кг/м<sup>3</sup>, входная скорость газового потока 5 м/с, высота сепарационной зоны 50 мм, критическое значение диаметра частицы 5,66 мкм. Параметры, которые изменялись в определенных интервалах: степень крутки  $A$  от 0,25 до 0,75, плотность частиц  $\rho_a$  от 1000 до 4000 кг/м<sup>3</sup> и диаметр частиц от 0,5 до 10 мкм.

Анализ полученных данных показал, что эффективность предлагаемого мультивихревого сепарационного устройства увеличивается с ростом диаметра и плотности частиц. Это обусловлено тем, что при увеличении размера частиц и их веса, они легче поддаются выбиванию из структурированного потока за счет сил инерции. Также было обнаружено, что эффективность сепаратора возрастает при уменьшении степени крутки, т.к. к определенному значению начинает проявляться все более значимо эффект равнопроточности расхода газа между входными отверстиями в мультивихревой сепаратор и круглыми отверстиями, которые проделаны в сепарационных элементах. Выполнение условия равнопроточности влияет на структуру вихрей. Это связано с тем, что в зависимости от значения коэффициента крутки варьируется тангенциальная скорость, как было отмечено ранее, которая зависит от скорости в круглых отверстиях. Из уравнения (2) и уравнения неразрывности видно, что коэффициент крутки при необходимости может быть получен, равный определенному значению путем изменения входной скорости, площади входа или площади круглых отверстий (рис. 2).

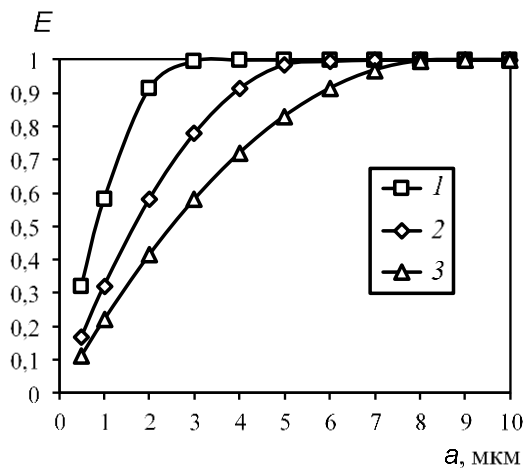


Рис. 2 – Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц сепарационным устройством с элементами квадратной формы от размера частиц при степени крутки  $A$ : 1 – 0,25; 2 – 0,5; 3 – 0,75

Fig. 2 – Efficiency of trapping fine-dispersed particles by separating device with square-shaped elements depending on particle size at degree of twist  $A$ : 1 - 0,25; 2 - 0,5; 3 - 0,75

Иными словами, чем больше соотношение между скоростью на входе в сепарационное устройство и скоростью в круглых отверстиях, тем ниже его эффективность. Это объясняется тем, что структура газового потока в сепарационной зоне при увеличении коэффициента крутки становится менее стабильной. Следует отметить, что эффективность сепарационного устройства с элементами квадратной формы достигает 100 % при коэффициенте крутки равном 0,25, 0,5 и 0,75 при сепарации частиц из газа размером более 4, 7 и 9 мкм соответственно. Для фракций мелкодисперсных частиц, эффективность улавливания которых составляет менее 100 % при коэффициенте крутки равном 0,25, 0,5 и 0,75 эффективность устройства в среднем составляет 70,3, 67,4 и 64,1 % соответственно. При обеспечении низкого значения коэффициента крутки равном, например, 0,25 достигается высокая эффективность сепарационного устройства при улавливании частиц размером 2 мкм. Так, эффективность сепарации частиц из газа размером 2 мкм составляет 91,4, 58,1 и 41,6 % при коэффициенте крутки равном 0,25, 0,5 и 0,75 соответственно (рис. 2).

Анализ расчетных данных при изменении коэффициента крутки от 0,25 до 0,75 показал, что при числах Стокса равных значениям больше 3 достигается 100 % эффективность сепарации мелкодисперсных частиц из газового потока в сепарационном устройстве с элементами квадратной формы. В частности, для достижения 100 % эффективности сепарационного устройства числа Стокса должны быть больше значения 1,79, 2,8 и 3,0 при коэффициенте крутки равном 0,25, 0,5 и 0,75 соответственно. При относительно малых числах Стокса (менее 0,1) эффективность сепарационного устройства составляет менее 50 % (рис. 3).

Очевидно, что частицы с высокими значениями плотности  $\rho_a$  сепарируются из газового потока в сепарационной зоне устройства быстрее и легче относительно частиц с меньшей плотностью, вследствие более высокой массы данных частиц, т.е. необходимости создания небольших значений центробежных сил.

рациональной зоне устройства быстрее и легче относительно частиц с меньшей плотностью, вследствие более высокой массы данных частиц, т.е. необходимости создания небольших значений центробежных сил.

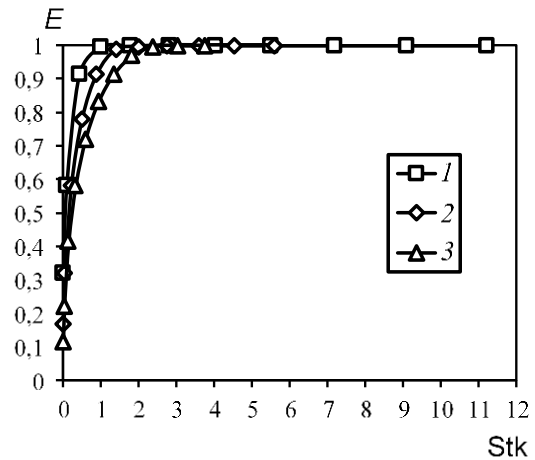


Рис. 3 – Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц сепарационным устройством с элементами квадратной формы от чисел Стокса при степени крутки  $A$ : 1 – 0,25; 2 – 0,5; 3 – 0,75

Fig. 3 – Efficiency of trapping fine-dispersed particles by separating device with square-shaped elements from Stokes number at degree of twist  $A$ : 1 - 0,25; 2 - 0,5; 3 - 0,75

На основе оценочной расчетной методики было получено, что эффективность сепарационного устройства с элементами квадратной формы достигает 100 % для частиц размером более 8, 7 и 4 мкм при их плотности равной 1000, 2000 и 4000 кг/м<sup>3</sup> соответственно. При этом эффективность сепарации мелкодисперсных частиц из газа в среднем составляет 61,6, 67,8 и 58,9 % при их плотности 1000 ( $a = 0,5 - 7$  мкм), 2000 ( $a = 0,5 - 6$  мкм) и 4000 кг/м<sup>3</sup> ( $a = 0,5 - 3$  мкм) соответственно. Следует отметить, что эффективность сепарационного устройства составляет более 60 % для 2 и 3 мкм частиц при их различной плотности. Например, эффективность устройства составляет 60,9 % при размере частиц 3 мкм и плотности 1000 кг/м<sup>3</sup>, 77,9 % при размере частиц 3 мкм и плотности 2000 кг/м<sup>3</sup> и 74,9 % при размере частиц 2 мкм и плотности 4000 кг/м<sup>3</sup> (рис. 4).

При значении плотности мелкодисперсных частиц в диапазоне от 1000 до 4000 кг/м<sup>3</sup> эффективность их сепарации из газа достигается равной 100 % при числах Стокса более 2,8. При этом для достижения 100 % эффективности сепарационного устройства с элементами квадратной формы числа Стокса должны быть равны значению, которое больше 1,79, 2,81 и 1,79 при плотности частиц равной 1000, 2000 и 4000 кг/м<sup>3</sup> соответственно. Значение эффективности сепарационного устройства составляет менее 60 % при значениях чисел Стокса менее 0,2 (рис. 5).

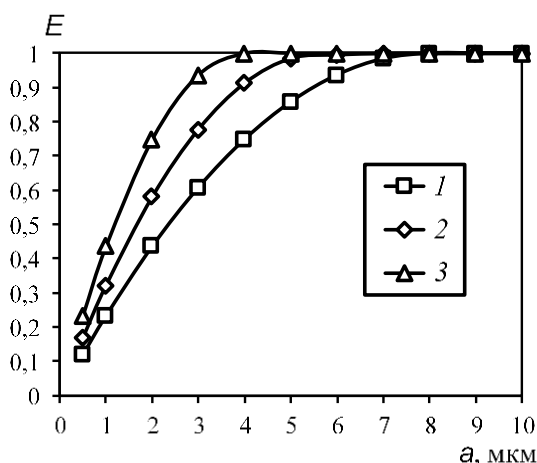


Рис. 4 – Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц сепарационным устройством с элементами квадратной формы от размера частиц при их плотности  $\rho_a$ , кг/м<sup>3</sup>: 1 – 1000; 2 – 2000; 3 – 4000

Fig. 4 – Efficiency of trapping fine-dispersed particles by separating device with square-shaped elements depending on particle size at their density  $\rho_a$ , kg/m<sup>3</sup>: 1 - 1000; 2 - 2000; 3 - 4000

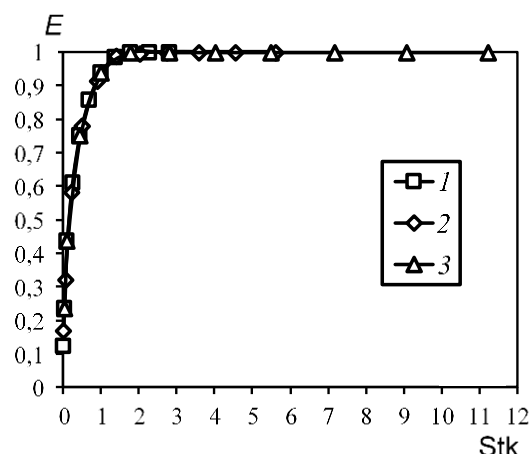


Рис. 5 – Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц сепарационным устройством с элементами квадратной формы от чисел Стокса при плотности частиц  $\rho_a$ , кг/м<sup>3</sup>: 1 – 1000; 2 – 2000; 3 – 4000

Fig. 5 – Efficiency of trapping fine-dispersed particles by separating device with square-shaped elements from Stokes number at particle density  $\rho_a$ , kg/m<sup>3</sup>: 1 - 1000; 2 - 2000; 3 - 4000

Таким образом, в ходе проведенных исследований было установлено, что применение мультивихревых сепараторов в окрасочных камерах может быть решением повышения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц. При этом эффективность может быть повышена увеличением количества сепарационных элементов в мультивихревом сепараторе. Исследования также позволили установить, что важный эффект на сепарацию мелкодисперсных частиц из газового потока оказывает размер квадратных и круглых

отверстий, т.к. за счет размера данных отверстий корректируется вихревая структура потока в сепарационной зоне устройства.

На основе проведенной работы были сделаны следующие выводы:

1. при наименьших значениях коэффициента крутки  $A$  в интервале от 0,25 до 0,75 достигается максимальная эффективность сепарации мелкодисперсных частиц из газовых потоков. При  $A = 0,25$  эффективность мультивихревого сепаратора для 2 мкм частиц составляет более 91 %;

2. эффективность мультивихревого сепаратора увеличивается с ростом диаметра и плотности частиц. Это обусловлено тем, что при увеличении размера частиц и их веса, они легче поддаются выбиванию из структурированного потока за счет инерции;

3. при числах Стокса  $Stk$  более 3 достигается 100 % эффективность улавливания мелкодисперсных частиц мультивихревым сепаратором.

*Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ СП – 3577.2022.1.*

*This work was supported by the scholarship of the President of the Russian Federation SP - 3577.2022.1.*

### Литература

1. L. Middendorf, *Metal Finishing*, 100, 10, 47-52 (2002).
2. J. Chen, R. Liu, Y. Gao, G. Li, T. An, *Journal of Cleaner Production*, **148**, 268-275 (2017).
3. C. Lafita, J.M.P. Roja, C. Gabaldon, V.M.I. Soria, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **87**, 732-738 (2012).
4. A. Bennett, *Filtration+Separation*, **47**, 1, 28-31 (2010).
5. G.N. Carlton, M.R. Flynn, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, **12**, 5, 375-382 (1997).
6. N. Sheng, H.S. Weizhou, M.G. Chen, Y.M. Sun, X. Han, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **36**, 4, 1434-1447 (2017).
7. Y. Zhan, J. Ji, H. Huang, M. He, D.Y.C. Leung, S. Liu, Y. Shu, Q. Feng, R. Xie, R. Fang, et al., *Chemical Engineering Journal*, **334**, 1422-1429 (2018).
8. R.R. Gil, B. Ruiz, M.S. Lozano, M.J. Martín, E. Fuente, *Chemical Engineering Journal*, **245**, 80-88 (2014).
9. K.M. Shahzad, S.A. Razzak, M.M. Hossain, *Atmospheric Environment*, **140**, 117-134 (2016).
10. Z. Ye, J.M. Giraudon, N. Nuns, P. Simon, N. De Geyter, R. Morent, J.F. Lamonier, *Applied Catalysis, B: Environmental*, **223**, 154-166 (2018).
11. Z. Ye, C. Wang, Z. Shao, Q. Ye, Y. He, Y. Shi, *Journal of Hazardous Materials*, **241-242**, 216-223 (2012).
12. S. Anand, J. Howarth, *Filtration+Separation*, **50**, 1, 22-26 (2013).
13. Z. Ye, Q. Zhou, J. Hua, Z. Ye, J. Meng, J. Chen, J. Wang, *Journal of the Air & Waste Management Association*, **71**, 3, 366-377 (2021).
14. B. Thomas, *Metal Finishing*, **97**, 5, 296-298, 300-317 (1999).
15. B.R. Mohan, R.K. Jain, B.C. Meikap, *Separation and Purification Technology*, **63**, 2, 269-277 (2008).
16. Z. Chen, C. You, H. Wang, Q. Liu, *Powder Technology*, **343**, 122-128 (2019).
17. R. Liu, J. Chen, G. Li, T. An, *Chemical Engineering Journal*, **318**, 57-63 (2017).
18. Y. Zhang, H. Yang, Q. Cai, S. Xia, *Desalination and Water Treatment*, 100-107 (2022).
19. Р.Я. Биккулов, О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев, Г.Р. Бадретдинова, Д.Н. Латыпов, *Вестник технологического университета*, **25**, 1, 32-35 (2022).

20. Р.Я. Биккулов, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, Г.Р. Бадретдинова, *Вестник технологического университета*, **24**, 11, 39-42 (2021).
21. В.Э. Зинуров, И.Н. Мадьшев, А.Р. Ивахненко, И.В. Петрова, *Ползуновский вестник*, 2, 205-211 (2021).
22. Р.Я. Биккулов, О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев, Г.Р. Бадретдинова, *Экология и промышленность России*, **25**, 12, 10-14 (2021).

### References

1. L. Middendorf, *Metal Finishing*, 100, 10, 47-52 (2002).
2. J. Chen, R. Liu, Y. Gao, G. Li, T. An, *Journal of Cleaner Production*, 148, 268-275 (2017).
3. C. Lafita, J.M.P. Roja, C. Gabaldon, V.M.I. Soria, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 87, 732-738 (2012).
4. A. Bennett, *Filtration+Separation*, 47, 1, 28-31 (2010).
5. G.N. Carlton, M.R. Flynn, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 12, 5, 375-382 (1997).
6. N. Sheng, H.S. Weizhou, M.G. Chen, Y.M. Sun, X. Han, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 36, 4, 1434-1447 (2017).
7. Y. Zhan, J. Ji, H. Huang, M. He, D.Y.C. Leung, S. Liu, Y. Shu, Q. Feng, R. Xie, R. Fang, et al., *Chemical Engineering Journal*, 334, 1422-1429 (2018).
8. R.R. Gil, B. Ruiz, M.S. Lozano, M.J. Martín, E. Fuente, *Chemical Engineering Journal*, 245, 80-88 (2014).
9. K.M. Shahzad, S.A. Razzak, M.M. Hossain, *Atmospheric Environment*, 140, 117-134 (2016).
10. Z. Ye, J.M. Giraudon, N. Nuns, P. Simon, N. De Geyter, R. Morent, J.F. Lamonier, *Applied Catalysis, B: Environmental*, 223, 154-166 (2018).
11. Z. Ye, C. Wang, Z. Shao, Q. Ye, Y. He, Y. Shi, *Journal of Hazardous Materials*, 241-242, 216-223 (2012).
12. S. Anand, J. Howarth, *Filtration+Separation*, 50, 1, 22-26 (2013).
13. Z. Ye, Q. Zhou, J. Hua, Z. Ye, J. Meng, J. Chen, J. Wang, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 71, 3, 366-377 (2021).
14. B. Thomas, *Metal Finishing*, 97, 5, 296-298, 300-317 (1999).
15. B.R. Mohan, R.K. Jain, B.C. Meikap, *Separation and Purification Technology*, 63, 2, 269-277 (2008).
16. Z. Chen, C. You, H. Wang, Q. Liu, *Powder Technology*, 343, 122-128 (2019).
17. R. Liu, J. Chen, G. Li, T. An, *Chemical Engineering Journal*, 318, 57-63 (2017).
18. Y. Zhang, H. Yang, Q. Cai, S. Xia, *Desalination and Water Treatment*, 100-107 (2022).
19. R.Y. Bikkulov, O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitriev, G.R. Badretdinova, D.N. Latypov, *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 25, 1, 32-35 (2022).
20. R.Y. Bikkulov, A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, G.R. Badretdinova, *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 24, 11, 39-42 (2021).
21. V.E. Zinurov, I.N. Madyshev, A.R. Ivakhnenko, I.V. Petrova, *Polzunovskii vestnik*, 2, 205-211 (2021).
22. R.Y. Bikkulov, O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitriev, G.R. Badretdinova, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 25, 12, 10-14 (2021).

© **Р. Я. Биккулов** – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) ФГБОУ ВО «КГЭУ», bikkulov-ry@mail.ru, **В. Э. Зинуров** – ассистент кафедры ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd\_93@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, **Т. М. Тахавиев** – магистрант кафедры ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», Tahaviev2000@gmail.com.

© **R. Ya. Bikkulov** – Assistant of the Theoretical Basis of Thermotechnics (TBT) department, Kazan State Power Engineering University (KSPEU), bikkulov-ry@mail.ru, **V. E. Zinurov** – Assistant of the TBT department, KSPEU, vadd\_93@mail.ru, **A. V. Dmitriev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Head of the TBT department, KSPEU, ieremiada@gmail.com, **O. S. Dmitrieva** – PhD (Technical Sci.), Assistant Professor of Food Processing Equipment department, Kazan National Research Technological University, ja\_deva@mail.ru, **T. M. Tahaviev** – Master-student of the TBT department, KSPEU, Tahaviev2000@gmail.com.