



Научная статья
2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
УДК 66.074.2:697.94

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.024

 EDN: GVPTZQ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МУЛЬТИВИХРЕВОГО СЕПАРАТОРА

Вадим Эдуардович Зинуров ¹, Рустем Ядкарович Биккулов ²,
Оксана Сергеевна Дмитриева ³, Ильнур Наилович Мадышев ⁴,
Азалия Айратовна Абдуллина ⁵

^{1, 2, 5} Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

^{3, 4} Казанский национальный исследовательский технологический институт, Казань, Россия

¹ vadd_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>

² bikkulov-ry@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4783-147X>

³ ja_deva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6221-0167>

⁴ ilnyr_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-894X>

⁵ azalkaabdullina69826@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4047-4919>

Аннотация. Химическая промышленность является одним из основных источников выбросов мелкодисперсных частиц в окружающую среду. Они представляют угрозу для здоровья человека, негативно влияют на окружающую среду и изменение климата. Частицы трудно улавливаются с помощью традиционных технологий сепарации. С целью решения проблемы авторами работы предлагается конструкция мультिवихревого сепаратора. В статье представлен принцип его действия. Целью данной работы является экспериментальное определение гидравлического сопротивления мультिवихревого сепаратора. В работе рассматривается влияние двух вариантов конструктивного оформления сепаратора на его гидравлическое сопротивление. В первом варианте очищенный поток воздуха выходит непосредственно через сепарационные каналы. Во втором варианте на заднюю часть сепаратора устанавливалась крышка с круглыми отверстиями для выхода воздуха, которые позволяли формировать более устойчивую вихревую структуру в сепарационных каналах. Для определения гидравлического сопротивления мультिवихревого сепаратора была создана экспериментальная установка, распечатанная поэлементно на 3D принтере, включающая воздухоподушку, ресивер, трубу Вентури, мультिवихревой сепаратор и дифференциальные манометры. В ходе проведения экспериментальных исследований получены зависимости потери давления мультिवихревого сепаратора от скорости воздуха на входе в устройство для обоих конструктивных оформлений устройства. На основе проведенных исследований сделаны выводы: гидравлическое сопротивление мультिवихревого сепаратора с открытыми сепарационными каналами Δp_{op} составляет 14 до 204 Па при скорости воздуха на входе в устройство от 1,4 до 7,7 м/с, гидравлическое сопротивление мультिवихревого сепаратора с установленной крышкой с отверстиями для выхода потока воздуха Δp_{cl} составляет от 42 до 1833 Па при скорости воздуха на входе в устройство от 0,8 до 4,9 м/с, усложнение конструкции приводит к увеличению гидравлического сопротивления и, вероятнее всего, повышению эффективности, вследствие формирования более устойчивой вихревой структуры.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, мультिवихревой сепаратор, вихревая структура, сепарационное устройство, мелкодисперсные частицы, сепарация, потери давления, вихревое устройство, вихреобразование, труба Вентури, фильтр.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП – 3577.2022.1.

Для цитирования: Экспериментальное определение гидравлического сопротивления мультिवихревого сепаратора / В. Э. Зинуров [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 191–199. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.024. EDN: <https://elibrary.ru/GVPTZQ>.

Original article

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF HYDRAULIC RESISTANCE OF A MULTI VORTEX SEPARATOR

Vadim E. Zinurov ¹, Rustem Ya. Bikkulov ², Oksana S. Dmitrieva ³,
Ilnur N. Madyshev ⁴, Azaliya A. Abdullina ⁵

^{1, 2, 5} Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

^{3, 4} Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

¹ vadd_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>

² bikkulov-ry@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4783-147X>

³ ja_deva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6221-0167>

⁴ ilnyr_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-894X>

⁵ azalkaabdullina69826@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4047-4919>

Abstract. *The chemical industry is one of the main sources of fine particle emissions into the environment. They pose a threat to human health, adversely affect the environment and climate change. Particles are difficult to capture with conventional separation technologies. In order to solve the problem, the authors of the work propose the design of a multi-vortex separator. The article presents the principle of its operation. The purpose of this work is to experimentally determine the hydraulic resistance of a multi-vortex separator. The paper considers the influence of two variants of the design of the separator on its hydraulic resistance. In the first version, the purified gas flow exits directly through the separation channels. In the second variant, they installed a cover with round holes for the gas outlet on the back of the separator, which made it possible to form a more stable vortex structure on the separation channels. To determine the hydraulic resistance of a multi-vortex separator, it created an experimental setup, printed element by element on a 3D printer, including a blower, a receiver, a Venturi tube, a multi-vortex separator, and differential pressure gauges. In experimental studies, the dependences of the pressure loss of a multi-vortex separator on the air velocity at the inlet to the device were obtained for both design designs of the device. Based on the studies carried out, the following conclusions were drawn: the hydraulic resistance of a multi-vortex separator with open separation channels Δp_{op} is 14 to 204 Pa at an air velocity at the inlet to the device from 1.4 to 7.7 m/s, the hydraulic resistance of a multi-vortex separator with an installed cover with holes for gas flow outlet Δp_{cl} is from 42 to 1833 Pa at an air velocity at the inlet to the device from 0.8 to 4.9 m/s, the complication of the design leads to an increase in hydraulic resistance and, most likely, an increase in efficiency because of the formation of a more stable vortex structure.*

Keywords: hydraulic resistance, multi-vortex separator, vortex structure, separation device, fine particles, separation, pressure loss, vortex device, vortex formation, venturi pipe, filter.

Acknowledgements: the study was carried out with the financial support of the scholarship of the President of the Russian Federation to young scientists and postgraduate's SP – 3577.2022. 1.

For citation: Zinurov, V.E., Bikkulov, R.Ya., Dmitrieva, O.S., Madyshev, I.N. & Abdullina, A.A. (2023). Experimental determination of hydraulic resistance of a multi-vortex separator. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 191-199. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.024. EDN: <https://elibrary.ru/GVPTZQ>.

ВВЕДЕНИЕ

Многие технологические процессы современной химической, нефтехимической промышленности сопряжены с образованием мелкодисперсных маслянистых частиц диаметром менее 20–30 мкм, например, такие как процессы нанесения и отверждения краски на изделиях готовой продукции. Отсутствие систем вентиляции липких паров и туманов краски приводит к быстрому загрязнению всего производственного помещения, что

абсолютно не допустимо, т.к. мелкие и очень липкие частицы оказывают серьезный вред дыхательной и иммунной системе работников [1], а также окружающей среде [2]. Очистка поверхностей оборудования, вспомогательных и других конструкций в случае их загрязнения требует серьезных затрат, а в некоторых случаях просто невозможна. В настоящее время широко используемые способы обработки лакокрасочного тумана можно разделить на сухие и влажные. Сухие спо-

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МУЛЬТИВИХРЕВОГО СЕПАРАТОРА

собы представляются собой многоступенчатую систему очистки воздуха, и в основном состоят из применения фильтровального материала разных классов очистки [3]. Мокрые способы основаны на применении в основном распылительных колонн, водяной завесы и т.д. [4]. Такие способы по сравнению с сухими отличаются простотой в эксплуатации и экономичностью, однако трудности возникают с удалением микронных частиц и возникновением вторичных загрязнений в виде сточных вод [5]. При этом проведено много работ по изучению удаления лакокрасочного тумана и очистки отработанных газов от летучих органических веществ, поскольку их трудно уловить с помощью традиционных технологий сепарации из-за малого аэродинамического диаметра и легкого веса [6–8]. Таким образом, несмотря на то, что существует несколько вариантов очистки и оснащения окрасочных камер, модернизация их систем вентиляции с целью повышения эффективности и экологичности процесса является актуальной задачей. Стоит отметить, что одним из важных параметров системы фильтрации воздуха является значение скорости потока в камере для организации равномерного и правильного отвода лакокрасочного тумана, не допуская ухудшения очистки воздуха в зоне окраски, увеличения нагрузки на вытяжную систему и оседания избыточной краски на уже окрашенные детали. Перепад скоростей воздуха в камере может вызвать турбулентность воздушного потока и ухудшить производительность фильтрующих материалов, что неблагоприятным образом скажется на качестве покрытия изделий и чистоте воздуха покрасочной камеры [9].

Авторами работы предлагается мультивихревой сепаратор в качестве второй ступени очистки воздуха от мелкодисперсных частиц после фильтров грубой очистки, что является вариантом модернизации окрасочной камеры при увеличении срока службы фильтров тонкой очистки. Принцип действия мультивихревого сепаратора описан в работах [10, 11]. Загрязненный поток воздуха входит в мультивихревой сепаратор через квадратные входные отверстия 2 (рис. 1, а), далее поток распределяется по круглым отверстиям 3 и 4, которые проделаны в стенках элементов квадратной формы 5. Причем в отверстия 3 идет большая часть воздуха, а в отверстия 4 – соответственно меньшая. Элементы квадратной формы 5, дно которых образуется за счет установки крышек 7 в специальные пазы, или же крышки с круглыми отверстиями 8, образуют сепарационные каналы 6. За счет

конструктивных особенностей сепарационного устройства и геометрического расположения отверстий 3 и 4 при прохождении потока с частицами через них в сепарационных каналах 6 образуется множество маленьких завихрений по всей высоте устройства. Ключевыми отверстиями для образования завихрений в сепарационных каналах 6 являются большие 3: при выходе струйки воздуха из каждого отверстия она распадается на 2 составляющие, инерционнодвигающиеся в разные стороны – левую и правую, образуя завихрения. Малые отверстия 4 предназначены для добавочного эффекта вращения вихрей, т.к. в угловых зонах вихри в большей степени подвержены разрушению. Каждый вихрь имеет точки соприкосновения с соседними вихрями, в которых векторы скорости сонаправлены, что дает эффект взаимоподдержания вихревой структуры. Вследствие того, что вихри имеют малый радиус, создаются центробежные силы высоких значений, позволяющие осуществлять сепарацию мелкодисперсных частиц из загрязненного потока воздуха, под действием которых частицы выбиваются в направлении стенок мультивихревого сепаратора. При контакте частиц со стенками они к ним прилипают. Конструкция мультивихревого сепаратора защищена патентом РФ [12] и предполагает несколько вариантов компоновки: 1) очищенный поток воздуха выходит через сепарационные каналы 6 (рис.1б) и 2) очищенный поток воздуха выходит через круглые выходные отверстия 9 крышки 8 (рис.1, в).

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью является экспериментальное определение гидравлического сопротивления мультивихревого сепаратора. В непосредственные задачи входит анализ влияния конструктивного оформления мультивихревого сепаратора на его гидравлическое сопротивление. В первом варианте исследований очищенный поток воздуха выходит непосредственно через сепарационные каналы 6 (рис. 1, б). Во втором варианте – крышки 7 вынимаются из элементов квадратной формы 5 и устанавливается крышка с круглыми отверстиями 8, которая, в свою очередь, является дном квадратных элементов 5. За счет имеющихся выходных отверстий 9 формируется более устойчивая вихревая структура в сепарационных каналах 6 (рис. 1, в).



Рисунок 1 – Мультивихревой сепаратор с элементами квадратной формы (а – вид спереди; б, в – вид сзади): 1 – корпус; 2 – входные отверстия в устройство; 3 – большие круглые отверстия; 4 – малые круглые отверстия; 5 – элементы квадратной формы; 6 – сепарационные каналы; 7 – крышки элементов квадратной формы; 8 – крышка с круглыми отверстиями; 9 – круглые отверстия в крышке; б – первый вариант компоновки устройства; в – второй вариант компоновки устройства

Figure 1 - A multi-vortex separator with square-shaped elements (a - frontview; b, c - rearview): 1 - casing; 2 - inlet holes in the device; 3 - large round holes; 4 - small round holes; 5 - square-shaped elements; 6 - separation channels; 7 - covers of square-shaped elements; 8 - cover with round holes; 9 - round holes in the cover; b - first arrangement of the device; c - second arrangement of the device

МЕТОДЫ

Проведение исследований по определению гидравлического сопротивления мультивихревого сепаратора осуществлялось на экспериментальной установке (рис. 2). Необходимо отметить, что экспериментальная установка поэлементно была распечатана на 3D принтере из PLA пластика. Основными элементами установки являются воздуходувка 1, ресивер 2, труба Вентури 3 и мультивихревой сепаратор 4. Для измерения перепада давления в трубе Вентури 3 применялся

дифференциальный манометр 5. Определение гидравлического сопротивления мультивихревого сепаратора осуществлялось дифференциальным манометром 6. В качестве измерительных устройств использовались сертифицированные дифференциальные манометры testo 510i. Их погрешность составляет ± 5 Па при измерении давления в диапазоне от 0 до 100 Па и $\pm (2 \text{ Па} + 1,5 \% \text{ от измеренного значения})$ при измерении давления в диапазоне от 100 до 15000 Па. Ресивер 2 представлял собой участок прямо-

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МУЛЬТИВИХРЕВОГО СЕПАРАТОРА

угольного сечения с двумя закрытыми отверстиями на каждой стороне. В ходе проведения исследований каждое из восьми отверстий поэтапно открывалось для сброса воздуха, т.е. снижения расхода воздуха в установке и получения более обширной экспериментальной выборки данных. Труба Вентури 3 создавалась по ГОСТу 8.586.4-2005 ГСИ. «Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств» [13]. Ее предназначение в экспериментальной установке – создание перепада давления в широкой и узкой частях, которое фиксировалось дифференциальным манометром 5, что позволяло по формуле (1) рассчитать среднерасходную скорость воздуха [14].

Формула для определения среднерасходной скорости воздуха W_1 , м/с через широкую часть трубы Вентури:

$$W_1 = \frac{\sqrt{2(p_1 - p_2)}}{\sqrt{\rho \left[\left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 - 1 \right]}}, \quad (1)$$

где p_1 – статическое давление в широкой части трубы Вентури, Па; p_2 – статическое да-

вление в узкой части трубы Вентури, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³; F_1 и F_2 – площадь широкой и узкой части трубы Вентури соответственно, м².

Последовательность проведения исследований на экспериментальной установке следующая. Поток воздуха подавался в экспериментальную установку воздуходувкой 1. Далее он проходил через ресивер 2, имеющий восемь закрытых отверстий с возможностью их открывания с целью снижения скорости воздуха на входе в мультивихревой сепаратор 4. После ресивера 2 воздух проходит через трубу Вентури 3, которая создает перепад давления, что впоследствии позволяет с помощью расчетных формул вычислить среднерасходную скорость текучей среды в экспериментальной установке. Для точного измерения статического давления в широкой и узкой частях трубы Вентури 3 были созданы кольцевые камеры, имеющие снизу и сверху отверстия для отбора давления. При необходимости одно из отверстий закрывалось. С помощью дифференциального манометра 5 измерялся перепад давлений в трубе Вентури 3 (разница статических давлений между широкой и узкой частями).

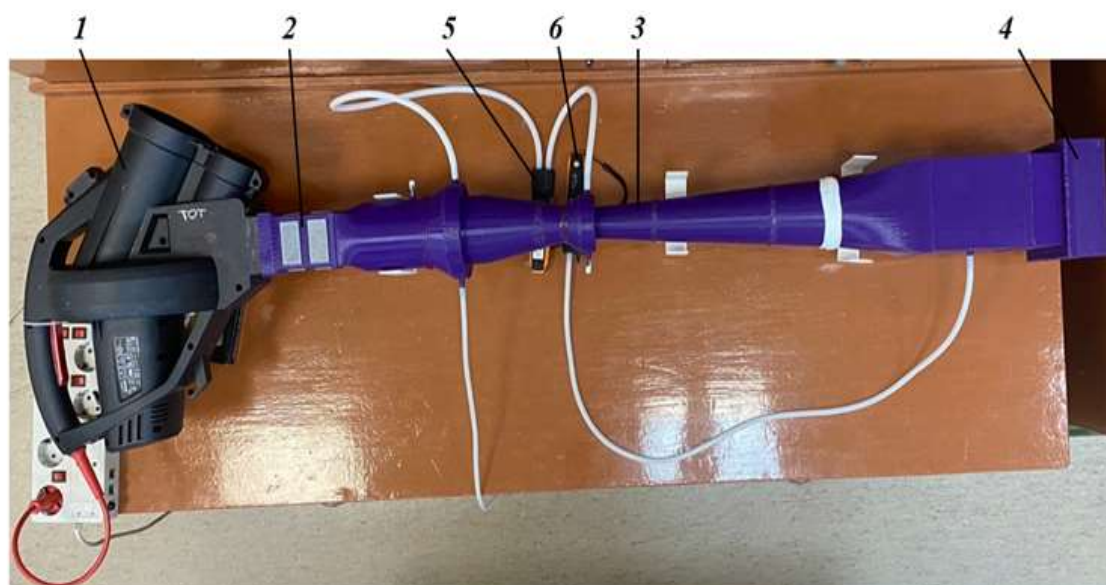


Рисунок 2 – Экспериментальная установка по определению гидравлического сопротивления мультивихревого сепаратора: 1 – воздуходувка; 2 – ресивер; 3 – труба Вентури; 4 – мультивихревой сепаратор; 5 – дифференциальный манометр для определения перепада давления в трубе Вентури; 6 – дифференциальный манометр для определения потери давления в мультивихревом сепараторе

Figure 2 - Experimental installation for determining the hydraulic resistance of a multi-vortexseparator: 1 - blower; 2 - receiver; 3 - Vent pipe; 4 - multi-vortex separator; 5 - differential pressure gauge for determining the pressure drop in the vent pipe; 6 - differential pressure gauge for determining the pressure loss in the multi-vortex separator

Также была возможность измерить суммарные потери давления в трубе Вентури 3 и мультивихревом сепараторе 4 при подключении дифференциального манометра только к одному отверстию для отбора давлений кольцевой камеры в широкой части трубы Вентури 3. После этого воздух проходил через переходник кругло-прямоугольного сечения и поступал в мультивихревой сепаратор 4. Измерение потери давления в сепараторе осуществлялось непосредственно перед ним дифференциальным манометром 6 (рис. 2) [15].

Размеры экспериментальной установки следующие (рис. 2): общая длина установки 1100 мм, длина ресивера 96 мм, длина трубы Вентури 550 мм, радиус широкой и узкой части трубы Вентури 40 и 18 мм соответственно. Ресивер имеет в сечении прямоугольник размером 58×69 мм, с восьмью отверстиями, сделанными в ресивере, каждое размером 22×48 мм. Размеры корпуса мультивихревого сепаратора 134×49×134 мм (высота×ширина×длина), размер элементов квадратной формы 45×45 мм, толщина стенок 1,2 мм, диаметр больших и малых круглых отверстий в элементах квадратной формы 12 и 6 мм соответственно, диаметр отверстий в дополнительной крышке сепаратора 3 мм (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определение скорости воздуха W на входе в мультивихревой сепаратор осуществлялось расчетным путем. Согласно уравнению сплошности среды расход воздуха в установке остается постоянным:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (2)$$

где t – время, с.

При условии, что процесс стационарный, т.е. первое слагаемое в уравнении (2) равно 0, и допущении, что плотность воздуха ρ остается постоянной, получим равенство объемных расходов в широком сечении трубы Вентури и в сечении перед входом в мультивихревой сепаратор, где установлен патрубок для измерения давления, (рис. 2):

$$W_1 F_1 = W F, \quad (3)$$

где F – площадь поперечного квадратного сечения перед входом в сепаратор, м².

Подставив в уравнение (3) скорость W_1 , рассчитанную по уравнению (1), и формулы для определения площадей круга и квадрата, получим выражение для определения скорости воздуха на входе в мультивихревой сепаратор W , м/с:

$$W = \frac{\pi d_1^2}{4} \frac{1}{b^2} \sqrt{\frac{2(\rho_1 - \rho_2)}{\rho \left[\left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 - 1 \right]}}, \quad (4)$$

где d_1 – диаметр широкой части трубы Вентури, м; b – размер стороны квадратного сечения экспериментальной установки в локальном месте, где установлен патрубок для измерения статического давления перед мультивихревом сепаратором, м.

Результаты исследований показали, что гидравлическое сопротивление мультивихревого сепаратора зависит как от конструктивных особенностей устройства, так и от устойчивости вихревой структуры. При первом варианте компоновки конструкции (рис. 1, б) гидравлическое сопротивление существенно меньше, чем при втором варианте изготовления устройства (рис. 1, в) в среднем в 9–30 раз при скорости воздуха на входе в устройство от 1,4 до 4,9 м/с.

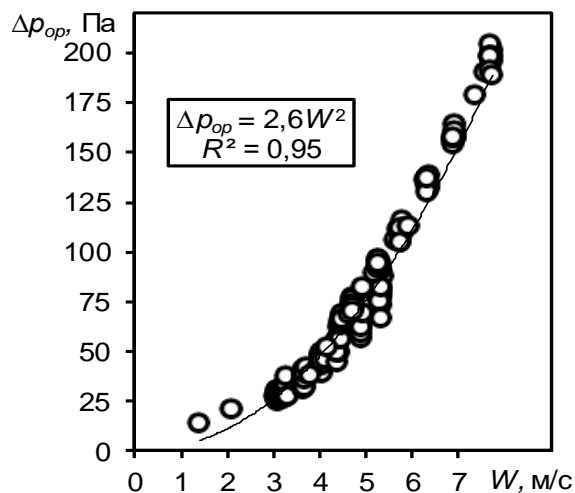


Рисунок 3 – Зависимость потери давления Δp_{op} в мультивихревом сепараторе при первом варианте конструктивного оформления устройства с открытыми сепарационными каналами от скорости воздуха W на входе в устройство

Figure 3 - The dependence of the pressure loss in a multi-vortex separator with open separation channels Δp_{op} on the air velocity W at the inlet to the device

С другой стороны, полученные значения среднеквадратических отклонений для обоих случаев (рис. 3 и 4) и анализ разброса экспериментальных точек, например, представленных на рисунке 3, показывает, что при первом конструктивном оформлении мультивихревого сепаратора вихревая структура может быть нестабильной. Вероятнее всего

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МУЛЬТИВИХРЕВОГО СЕПАРАТОРА

это вызвано тем, что в некоторых локальных областях при выходе струй воздуха из круглых щелей, сделанных в стенках элементов квадратной формы сепаратора, образующиеся вихри разрушаются, создавая хаотичный поток на определенной высоте сепарационных каналов. Данное явление носит нестабильный характер, т.к. одной скорости могут соответствовать несколько значений потери давления в мультिवихревом сепараторе Δp_{op} . При этом среднеквадратическое отклонение R составляет 0,95 (рис. 3).

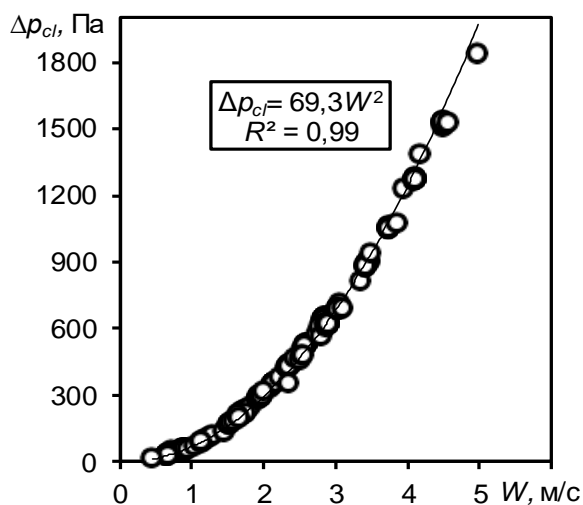


Рисунок 4 – Зависимость потери давления Δp_{cl} в мультिवихревом сепараторе при втором варианте конструктивного оформления (с крышкой с отверстиями для выхода воздуха) от скорости воздуха W на входе в устройство

Figure 4 -The dependence of the pressure loss in a multi-vortex separator with an installed cover, in which holes are made for the outlet of the air flow, Δp_{cl} on the gas velocity W at the inlet to the device

При втором варианте конструктивного оформления мультिवихревого сепаратора среднеквадратическое отклонение R составляет 0,99 (рис. 4). Полученная степенная зависимость с высокой точностью описывает значения экспериментальных точек, что указывает на отсутствие значимых хаотичных колебаний потока в сепарационных каналах. Иными словами, установка крышки 8 (рис. 1, в) с сделанными в ней отверстиями для выхода воздуха способствует формированию устойчивой вихревой структуры в сепарационных каналах мультिवихревого сепаратора.

В ходе исследований установлено, что гидравлическое сопротивление мультिवихревого сепаратора с открытыми сепарационными каналами Δp_{op} составляет 14 до 204 Па

при скорости воздуха на входе в устройство от 1,4 до 7,7 м/с (рис. 3). Также получена зависимость потери давления Δp_{op} в сепараторе от входной скорости воздуха W для данного варианта компоновки устройства:

$$\Delta p_{op} = 2,6W^2. \quad (5)$$

Гидравлическое сопротивление мультिवихревого сепаратора с установленной крышкой Δp_{cl} , в которой сделаны отверстия для выхода потока воздуха составляет от 42 до 1833 Па при скорости воздуха на входе в устройство от 0,8 до 4,9 м/с (рис. 4). Для второго варианта компоновки устройства получена степенная зависимость потери давления Δp_{cl} в мультिवихревом сепараторе от входной скорости воздуха W :

$$\Delta p_{cl} = 69,3W^2. \quad (6)$$

Таким образом, проведенные исследования показали, что усложнение конструкции мультिवихревого сепаратора приводит к увеличению гидравлического сопротивления устройства. Однако создание строго расположенных выходных отверстий 9 в определенных местах крышки 8 (рис. 1, в) позволяет предотвращать разрушение вихревой структуры в сепарационных каналах, которая прежде происходила вследствие хаотичного выхода потока воздуха из устройства при открытых сепарационных каналах (рис. 1, б). Необходимо отметить, что важной составляющей принятия той или иной конструкции устройства является его эффективность. Вероятнее всего, при втором варианте конструктивного оформления устройства (рис. 1, в) эффективность мультिवихревого сепаратора будет выше относительно первого варианта (рис. 1, б), т.к. при устойчивой вихревой структуре создается центробежное поле более высоких значений и снижается вероятность повторного подхватывания частиц хаотичным восходящим потоком при их сепарации. В данной работе сепарация частиц из загрязненного потока не исследовалась, т.к. экспериментально определить эффективность улавливания мелкодисперсных частиц затруднительно.

ВЫВОДЫ

1. Гидравлическое сопротивление мультिवихревого сепаратора с открытыми сепарационными каналами Δp_{op} составляет 14 до 204 Па при скорости воздуха на входе в устройство от 1,4 до 7,7 м/с.

2. Гидравлическое сопротивление мультिवихревого сепаратора с установленной крышкой Δp_{cl} , в которой сделаны отверстия для выхода потока, составляет от 42 до

1833 Па при его скорости на входе в устройство от 0,8 до 4,9 м/с.

3. Усложнение конструкции приводит к увеличению гидравлического сопротивления и, вероятнее всего, повышению эффективности, вследствие формирования более устойчивой вихревой структуры.

4. Для оценки текущего состояния мультивихревого сепарационного устройства необходимо производить контроль скорости потока воздуха в окрасочной камере.

В последующих исследованиях планируется создание трехмерной модели мультивихревого сепаратора и проведение верификации численного моделирования и результатов физического эксперимента, представленных в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bennett A. Automotive: Innovative filtration applications in the auto industry // *Filtr. Sep.* 2010. V. 47 № 1. P. 28–31. DOI 10.1016/S0015-1882(10)70035-5.

2. Research progress in treatment technology for exhaust gas from spray paint process / N. Sheng [et al.] // *Chem. Indust. Eng. Prog.* 2017. V. 36. № 4. P. 1434–1447.

3. Anand S., Howarth J. Automotive finishing: Improving filtration in the automotive paint shop // *Filtr. Sep.* 2013. V. 50. № 1. P. 22–26. DOI 10.1016/S0015-1882(13)70032-6.

4. Mohan B.R., Jain R.K., Meikap B.C. Comprehensive analysis for prediction of dust removal efficiency using twin-fluid atomization in a spray scrubber // *Sep. Purif. Technol.* 2008. V. 63. № 2. P. 269–277. DOI 10.1016/j.seppur.2008.05.006.

5. Experimental study on the synergetic removal of fine particles by wet flue gas desulfurization tower with a flow pattern control device / Z. Chen [et al.] // *Powder Technol.* 2019. V. 343. P. 122–128. DOI 10.1016/j.powtec.2018.11.017.

6. Effect of particle hydrophilicity on the separation performance of a novel cyclone / Y. Zhang [et al.] // *Sep. Purif. Technol.* 2020. V. 237. P. 116315. DOI 10.1016/j.seppur.2019.116315.

7. Папко Ю.О. Способы очистки воздуха в окрасочных камерах // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика.* 2017. Т. 2. С. 373–381.

8. Гавриленков А.М., Бредихин Л.С., Сафаралиев Р.Р. Совершенствование конструкции узла очистки воздуха, удаляемого из окрасочной камеры // *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.* 2015. № 1–1 (6). С. 76–78.

9. Фаскиев Р.С. Мониторинг режимов вентиляции окрасочно-сушильных камер для ремонтной окраски автомобилей // *Вестник Оренбургского государственного университета.* 2014. Т. 171. № 10. С. 206–212.

10. Определение расчетной скорости газовой

потока в фильтрах грубой и тонкой очистки при различной степени загрязненности в окрасочных камерах / В.Э. Зинуров [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* 2022. Т. 24. № 5. С. 3–12. DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-5-3-12.

11. Separation of Fine Particles from Gas in Paint-Spraying Booths / R.Y. Bikkulov [et al.] // *MATEC Web of Conferences.* 2021. V. 346. P. 03070. DOI 10.1051/mateconf/202134603070.

12. Мультивихревой сепаратор для очистки газов: пат. 208304 Рос. Федерация № 2021120725 / И.Н. Мадышев [и др.]; заявл. 14.07.2021; опубл. 13.12.2021, Бюл. № 35.

13. ГОСТ 8.586.4-2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Трубы Вентури. Дата введения 2007-01-01. Москва : Стандартинформ.

14. Численное и экспериментальное исследование сужающего устройства на основе трубы Вентури / В.Э. Зинуров [и др.] // *Вестник технологического университета.* 2022. Т. 25. № 7. С. 106–111. DOI 10.55421/1998-7072_2022_25_7_106.

15. Экспериментальное определение гидравлического сопротивления упрощенной модели мультивихревого классификатора с соосно расположенными трубами / В.Э. Зинуров [и др.] // *Ползуновский вестник.* 2022. № 2. С. 108–116. DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.015.

Информация об авторах

В. Э. Зинуров – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета.

Р. Я. Биккулов – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета.

О. С. Дмитриева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование пищевых производств» Казанского национального исследовательского технологического университета.

И. Н. Мадышев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Оборудование пищевых производств» Казанского национального исследовательского технологического университета.

А. А. Абдуллина – студент кафедры «Экономика и организация производства» Казанского государственного энергетического университета.

REFERENCES

1. Bennett, A. (2010). Automotive: Innovative filtration applications in the auto industry. *Filtr. Sep.*, 47(1), 28–31. DOI 10.1016/S0015-1882(10)70035-5.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МУЛЬТИВИХРЕВОГО СЕПАРАТОРА

2. Sheng, N., Weizhou, H.S., Chen, M.G., Sun, Y.M. & Han, X. (2017). Research progress in treatment technology for exhaust gas from spray paint process. *Chem. Indust. Eng. Prog.*, 36(4), 1434-1447.
3. Anand, S. & Howarth, J. (2013). Automotive finishing: Improving filtration in the automotive paint shop. *Filtr. Sep.*, 50(1), 22-26. DOI 10.1016/S0015-1882(13)70032-6.
4. Mohan, B.R., Jain, R.K. & Meikap, B.C. (2008). Comprehensive analysis for prediction of dust removal efficiency using twin-fluid atomization in a spray scrubber. *Sep. Purif. Technol.*, 63(2), 269-277. DOI 10.1016/j.seppur.2008.05.006.
5. Chen, Z., You, C., Wang, H. & Liu, Q. (2019). Experimental study on the synergetic removal of fine particles by wet flue gas desulfurization tower with a flow pattern control device. *Powder Technol.*, 343, 122-128. DOI 10.1016/j.powtec.2018.11.017.
6. Zhang, Y., Jiang, Y., Xin, R., Yu, G., Jin, R., Dong, K. & Wang, B. (2020). Effect of particle hydrophilicity on the separation performance of a novel cyclone. *Sep. Purif. Technol.*, 237, 116315. DOI 10.1016/j.seppur.2019.116315
7. Papko, Yu.O. (2017). Ways to clean air in spray cabinets. *Modern technologies in construction. Theory and practice*, 2, 373-381. (In Russ.).
8. Gavrilin, A.M., Bredikhin, L.S. & Safaraliev, R.R. (2015). Improving the design of the air purification unit removed from the spray booth. *Modern technologies for civil defense and emergency response*, 6(1-1), 76-78. (In Russ.).
9. Faskiev, R.S. (2014). Monitoring of ventilation modes of painting and drying chambers for repair painting of cars. *Bulletin of the Orenburg State University*, 171(10), 206-212. (In Russ.).
10. Zinurov, V.E., Bikkulov, R.Ya., Dmitriev, A.V., Dmitrieva, O.S. & Nikolaev, A.N. (2022). Determination of the design velocity of the gas flow in coarse and fine filters with varying degrees of contamination in the paint booths. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2022. T. 24. № 5. С. 3-12. (In Russ.). DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-5-3-12.
11. Bikkulov, R.Ya., Dmitriev, A.V., Zinurov, V.E. & Badretdinova, G.R. (2021). Separation of Fine Particles from Gas in Paint-Spraying Booths. *MATEC Web of Conferences*, 346, 03070. DOI 10.1051/mateconf/202134603070.
12. Madyshev, I.N., Dmitriev, A.V., Dmitrieva, O.S., Kharkov, V.V. & Zinurov, V.E. (2021). Multivortex separator for gas cleaning. *Pat. 208304. Russian Federation, published on 13.12.2021. Bull. No. 35. (In Russ.)*.
13. State system for ensuring the uniformity of measurements. Measurements of liquids and gases flow rate and quantity by means of orifice instruments. Part 4. Venturi tubes. Technical requirements (2007). HOST 8.586.4-2005 from 1 Jan. 2007. Moscow : Standartinform. (In Russ.).
14. Zinurov, V.E., Nasyrova, I.I., V'yugova, K.D. & Madyshev, I.N. (2022). Numerical and experimental study of a narrowing device based on a Venturi tube. *Bulletin of the Technological University*, 25(7), 106-111. (In Russ.). DOI 10.55421/1998-7072_2022_25_7_106.
15. Zinurov, V.E., Madyshev, I.N., Kayumova, A.A. & Moiseeva, K.S. (2022). Experimental determination of hydraulic resistance of a simplified model of a multi vortex classifier with coaxially arranged pipes. *Polzunovskiy vestnik*, 2, 108-116. (In Russ.). DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.015.

Information about the authors

V.E. Zinurov - assistant of the Department "Theoretical foundations of heat engineering" of Kazan State Power Engineering University.

R.Ya. Bikkulov - assistant of the Department "Theoretical foundations of heat engineering" of Kazan State Power Engineering University.

O.S. Dmitrieva - candidate of technical Sciences, Assistant Professor of the Department "Equipment for food industry" of Kazan National Research Technological University.

I.N. Madyshev - candidate of technical Sciences, senior researcher of the Department "Equipment for food industry" of Kazan National Research Technological University.

A.A. Abdullina - student of the Department "Economics and organization of production" of Kazan State Power Engineering University.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 17.01.2023; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 21.03.2023.

The article was received by the editorial board on 17 Jan 2023; approved after editing on 13 Mar 2023; accepted for publication on 21 Mar 2023.