

УДК 66.074.2

**В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева,
М. О. Уткин**

ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧИСТКИ ГАЗОВОГО ПОТОКА ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЙ ПЫЛЕВИДНЫХ ЧАСТИЦ СЕПАРАТОРОМ ТРАПЕЦИЕВИДНОЙ ФОРМЫ

Ключевые слова: частицы пыли, сепаратор, циклон, улавливание частиц, фильтр.

Очистка газового потока от мелкодисперсных частиц является актуальной задачей для промышленных предприятий. Рост промышленных секторов приводит к увеличению выбросов вредных веществ в воздушный бассейн. Такие вещества негативно сказываются на жизнедеятельности людей, нанося вред их органам дыхания и по сути являются главной причиной появления многих тяжелых заболеваний дыхательных путей. Поэтому проблема очистки газового потока от пылевидных частиц является чрезвычайно актуальной. В работе представлен разработанный авторами сепаратор. Предложенный аппарат имеет корпус трапециевидной формы внутри которого расположено несколько рядов дугообразных элементов. Дугообразные элементы располагаются на встречу газовому потоку и крепятся по высоте к корпусу устройства. Аппарат имеет с правой и левой сторон входной и выходной патрубки соответственно. Разработанный аппарат предлагается устанавливать в систему очистки газового потока от пылевидных частиц последней ступенью, после одиночных и батарейных циклонов. Очистка газового потока от мелкодисперсных твердотельных частиц в сепараторе производится в основном за счет центробежных и инерционных сил. Дугообразные элементы расположены относительно друг друга таким образом, что при движении запыленной газовой среды между элементами возникают центробежные силы, которые воздействуют на структуру потока, вследствие чего частицы пыли выбиваются из структурированного потока и оседают на стенках или дне аппарата. Для расчета процессов очистки газового потока от мелкодисперсных частиц использовался метод конечных элементов в программном комплексе ANSYS Fluent. В ходе исследования использовалась модель турбулентности – SST. Проведенные исследования показали, что эффективность очистки газового потока от мелкодисперсных частиц сепаратором составляют более 50% для частиц размером менее 10 мкм и не менее 99% для частиц размером более 10 мкм при входной скорости газового потока более 5 м/с. Проведенные исследования показали, что наиболее эффективными входными скоростями газовых потоков являются в диапазоне 10–12 м/с.

**V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva,
M. O. Utkin**

RESEARCH IN GAS STREAM PURIFICATION OF VARIOUS FRACTIONS OF FLOUR PARTICLES, USING A TRAPEZOIDAL SEPARATOR

Keywords: dust particles, separator, cyclone, particulate control, filter.

Purifying a gas stream from fine particles is a relevant task for industrial enterprises. Growth of industrial sectors leads to increasing the emission of hazardous substances into air. Such substances provide adverse effects on human life, causing harm to respiratory organs, and in fact, they are the main reason for the occurrence of many severe respiratory diseases. Therefore, the problem of purifying a gas stream of flour particles is extremely topical. This paper presents the separator developed by its authors. The device proposed has a trapezoidal casing, inside of which there are several rows of arc-shaped elements. The arc-shaped elements are located up the gas stream and fixed along the height of the device casing. The device has inlet and outlet fittings on the right and on the left side, respectively. We propose to install the device developed in the system purifying the gas stream from flour particles to be its final stage, after single and multi-cyclones. Gas stream is purified of fine solid particles in the separator mainly due to centrifugal and inertia forces. Arc-shaped elements are arranged in such a manner that dusty gas medium movements among the elements induce centrifugal forces that affect the stream structure, so that the dust particles come out of the structured stream and precipitate on the walls or on the bottom of the device. To analyze the processes of purifying the gas stream of fine particles, we used the finite element method within the ANSYS Fluent software package. SST, the turbulence model, was used in our studies. The research performed has shown that the efficiency of purifying the gas stream of fine particles are over 50 % for the particles sized less than 10 μm and at least 99 % for the particles sized more than 10 μm at the inlet gas flow rate of more than 5 m/s. The studies performed have shown that the most efficient inlet gas flow rates range within 10-12 m/s.

Очистка многофазных газовых потоков от твердых мелкодисперсных частиц является достаточно актуальной проблемой в настоящее время. Рост промышленных секторов (нефтехимического, энергетического, металлургического и др.) приводит к увеличению выбросов вредных веществ в воздушный бассейн. В результате в зоне риска в первую очередь оказываются сотрудники данных предприятий и наиболее близко расположенные к предприятиям населенные пункты [1–5]. Вредные вещества нега-

тивно сказываются на жизнедеятельности людей. В связи с этим проблема очистки газового потока от пылевидных частиц является чрезвычайно актуальной [6–11].

В настоящий момент времени очистка газового потока от твердых мелкодисперсных частиц происходит с помощью специальных аппаратов. К таким аппаратам относятся осадительные камеры, жалюзийные и спиральные пылеуловители, циклоны и различные их модификации, мокрые аппараты, ру-

кавные фильтры, электростатические фильтры и пр. Однако эффективность данных аппаратов крайне мала, или по истечению определенного эксплуатационного срока службы она существенно падает. Осадительные камеры, жалюзийные и спиральные пылеуловители, циклоны являются высокоэффективными аппаратами для грубой очистки пыли, то есть от частиц, размер которых больше 30–40 мкм. Циклоны и различные их модификации способны очищать эффективно газовые потоки от частиц размером более 15 мкм. Мокрые аппараты, электростатические и рукавные фильтры используются достаточно редко по сравнению с вышерассмотренными вследствие высокой стоимости [12–22]. Поэтому, обычно используют систему очистки газового потока от пылевидных частиц, которая состоит из нескольких аппаратов: на первой ступени происходит очистка от грубой пыли, затем происходит очистка от средне и мелкодисперсной пыли в батарейных циклонах. Однако существует необходимость в очистке газового потока от частиц размером менее 10 мкм [23–31].

Для решения поставленной задачи авторами работы был разработан сепаратор для очистки газового потока от мелкодисперсных частиц размером до 10 мкм. Данное устройство имеет корпус трапециевидной формы, внутри которого навстречу движению газа расположено несколько рядов дугообразных элементов, прикрепленных по высоте к корпусу устройства. Стоит отметить то, что дугообразные элементы расположены внутри аппарата под углом 30°, что позволяет обеспечить принцип равнопроточности. Аппарат имеет с правой и левой сторон входной и выходной патрубки соответственно. (рис. 1).

Целью данной работы является исследование процесса очистки газового потока от мелкодисперсных частиц в разработанном аппарате, который предлагается устанавливать в систему очистки газового потока от частиц пыли последней ступенью, после одиночных и батарейных циклонов.

Так как очистка газового потока от мелкодисперсных твердотельных частиц в сепараторе производится в основном за счет центробежных и инерционных сил, дугообразные элементы расположены относительно друг друга таким образом, чтобы при движении запыленной газовой среды между элементами возникали центробежные силы. Последние воздействуют на структуру потока, вследствие чего частицы пыли выбиваются из структурированного потока и оседают на стенках и дне аппарата. Следует отметить, что центробежные силы начинают действовать на запыленный газ после первого ряда дугообразных элементов, когда происходит огибание элементов газом. При движении газа через первый ряд его очистка от мелкодисперсных частиц производится в основном за счет инерционных сил. Также инерционные силы являются основными очистительными механизмами при движении газа через последний ряд дугообразных элементов, где газ очищается вследствие резкого изменения направления своего движения. Таким образом, принцип действия сепаратора заключается в следующем: запыленный газ входит в аппарат через входной патрубок и при движении через несколько рядов дугообразных

элементов очищается от пылевидных частиц преимущественно за счет центробежных и инерционных сил, после чего очищенная газовая среда выходит из устройства через выходной патрубок. Следует отметить, что осаждение мелкодисперсных частиц на поверхностях дугообразных элементов может происходить также за счет электростатических сил, броуновского движения и совокупности всех этих факторов. Уловленные пылевидные частицы удаляются из устройства через продельные отверстия в днище аппарата. Также через определенные промежутки времени сепаратор разбирается и дугообразные элементы очищаются от осажженной пыли.

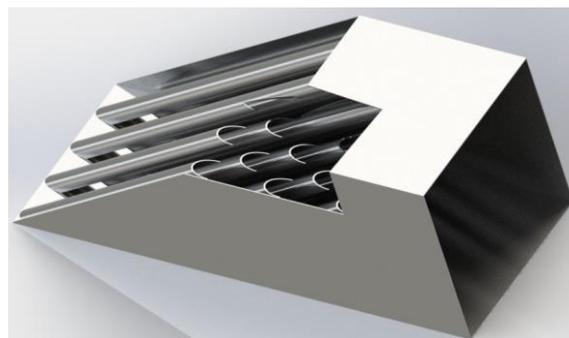


Рис. 1 – Трехмерная модель прямоугольного сепаратора (вид с разрезом)

Для расчета процессов очистки газового потока от мелкодисперсных частиц использовался метод конечных элементов в программном комплексе ANSYS Fluent, модель турбулентности – SST. Для упрощения численного расчета принимались следующие допущения: толщины дугообразных элементов и стенок корпуса задавались бесконечно малыми величинами, процесс течения газового потока стационарен, концентрация пыли исключает взаимодействие между частицами, влияние частиц на движение несущей среды не учитывается. В ходе расчета изменялись габариты трапециевидного сепаратора, а именно площадь входного сечения в диапазоне 0,01 – 0,16 м², входная скорость газового потока W , м/с варьировалась в диапазоне 1–15; диаметр частиц пыли a , мкм принимался равным из диапазона 1 – 15. Постоянными параметрами являлись: атмосферное давление на выходе из аппарата 10⁵ Па, начальная скорость частиц в газовом потоке 0 м/с, число частиц, находящихся в газе n , принималось равным 1000, плотность газового потока ρ задавалась равной 1,22 кг/м³, коэффициент кинематической ν и динамической μ вязкости газа принимался равным 1·10⁻⁶ м²/с и 18,1·10⁻⁶ Па·с соответственно.

Эффективность очистки газового потока от мелкодисперсных частиц сепаратором рассчитывалась по следующей формуле:

$$E = \frac{n - n_k}{n},$$

где n_k – число частиц в газе, которые остались в нем после его очистки в трапециевидном сепараторе.

Результаты исследований были представлены на рис. 2–5. Проведенные исследования показали, что эффективность очистки газового потока от мелко-

дисперсных частиц сепаратором составляют более 50% для частиц размером менее 10 мкм, для частиц размером более 10 мкм при входной скорости газового потока более 5 м/с эффективность не менее 99%. При повышении производительности сепаратора от 0,01 до 2,4 м³/с потери давления увеличивались с 11 до 2277 Па.

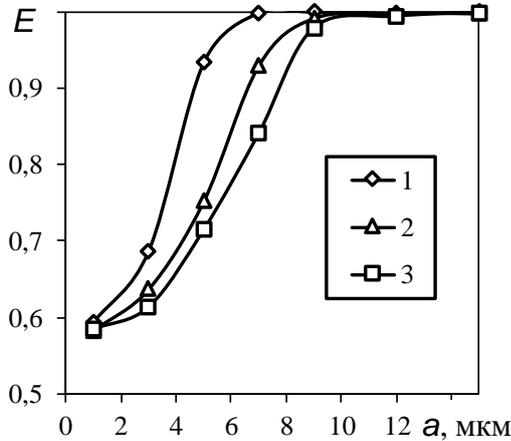


Рис. 2 – Изменение эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц разного диаметра при входной скорости газа 10 м/с и площади входного сечения патрубка сепаратора, м²: 1 - 0,01; 2 - 0,04; 3 - 0,16

При скорости газового потока на входе в сепаратор 10 м/с эффективности очистки газа от пылевидных частиц в среднем составила 88,7%, 84,1% и 81,8% для аппаратов с площадью входных патрубков 0,01 м², 0,04 м² и 0,16 м² соответственно. Следует отметить, что увеличение габаритных размеров сепаратора приведет к уменьшению эффективности его работы. Однако, это справедливо только для частиц размером менее 10 мкм. Особенно это заметно при диаметре частиц 7 мкм и менее. Например, при изменении площади входного патрубка сепаратора с 0,01 до 0,16 м² эффективность в среднем уменьшается с 80,3 до 66,4%. Улавливание частиц диаметром более 10 мкм производится с эффективностью не менее 99% для любых габаритов сепаратора в рассматриваемом диапазоне (рис. 2).

Входная скорость газового потока 1 м/с является максимально неэффективной для улавливания частиц из газовых потоков в предлагаемом аппарате с площадью сечения входного патрубка 0,01 м², поскольку эффективность очистки газа от пыли в среднем равна 71,5% для частиц в диапазоне a = 1–15 мкм. При росте скорости газового потока на входе в сепаратор происходит увеличение эффективности очистки, так, например, изменение скорости газового потока с 1 до 5, 10 и 15 м/с позволяет увеличить эффективность очистки газа от пыли на 12,8, 17,2 и 19% соответственно относительно эффективности при скорости 1 м/с. Следует отметить, что разница между эффективностью очистки запыленного газового потока при скорости 15 и 10 м/с составляет около 1,8% (рис. 3).

При увеличении площади сечения входного патрубка сепаратора до 0,04 м² средние значения эффективности очистки газового потока от частиц пыли

размером 1–15 мкм при входной скорости газового потока 1, 5, 10 и 15 м/с составляют 66,6, 78,1, 84,1 и 86,8% соответственно (рис. 4).

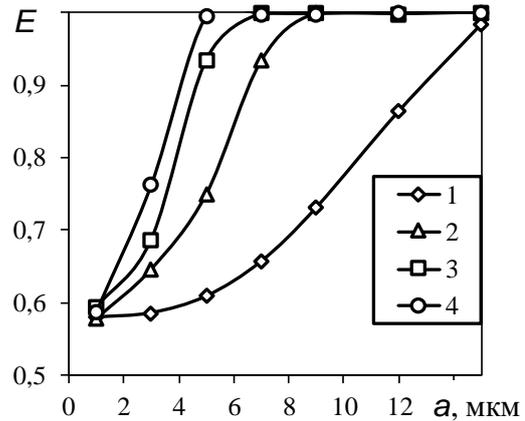


Рис. 3 – Изменение эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц разного диаметра при площади входного сечения 0,01 м² и скорости газового потока на входе в сепаратор, м/с: 1 - 1; 2 - 5; 3 - 10; 4 - 15

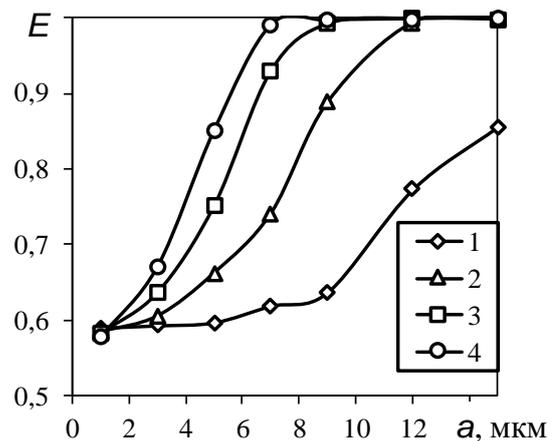


Рис. 4 – Изменение эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц разного диаметра при площади входного сечения 0,04 м² и скорости газового потока на входе в сепаратор, м/с: 1 - 1; 2 - 5; 3 - 10; 4 - 15

При площади входного сечения сепаратора 0,16 м² эффективность очистки газа от пыли существенно падает при скорости газового потока на входе равной 5 м/с относительно той же скорости в аппаратах меньших габаритных размеров. Средние значения эффективности составляют 60,4, 71,1, 77,9 и 81,8% при входной скорости газового потока 1, 5, 10 и 15 м/с соответственно (рис. 5).

Таким образом, увеличение габаритов сепаратора приводит к уменьшению эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц вследствие снижения влияния входной скорости газового потока на процесс очистки. Поэтому наиболее рациональным подходом по повышению эффективности улавливания частиц из газа при относительно больших габаритах аппарата является увеличение значения входной скорости газового потока. Однако, при увеличении входной скорости повышаются энерге-

тические затраты на технологический процесс, поэтому необходимо определять наиболее оптимальное отношение между эффективностью очистки газа от мелкодисперсных частиц и входной скорости газового потока. Например, проведенные исследования показали, что разница между эффективностью очистки газа от пыли составляет не более 4% при изменении входной скорости газового потока с 10 до 15 м/с при разных площадях сечения входного патрубка сепаратора в диапазоне 0,01–0,16 м².

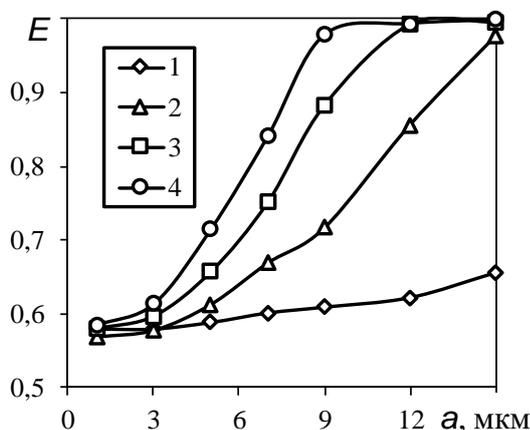


Рис. 5 – Изменение эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц разного диаметра при площади входного сечения 0,16 м² и скорости газового потока на входе в сепаратор, м/с: 1 - 1; 2 - 5; 3 - 10; 4 - 15

В ходе проделанной работы была получена компьютерная модель, позволяющая производить оценочный расчет процессов очистки газового потока от пылевидных частиц разработанным сепаратором. Исследования показали, что наиболее эффективной является скорость газового потока на входе в диапазоне значений 10–15 м/с.

Достоинствами разработанного сепаратора являются высокая эффективность при относительно низком гидравлическом сопротивлении, регенерируемость дугообразных элементов, простота конструкции, малые габариты аппарата, отсутствие движущихся элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-4522.2018.8.

Литература

1. В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев, *Очистка газов*. Теплоэнергетик, Москва, 2002. 640 с.
2. Н.А. Войнов, О.П. Жукова, Н.Ю. Кожухова, А.В. Богаткова, *Химия растительного сырья*, **2**, 217-223 (2018).
3. В. Страус, *Промышленная очистка газов*. Химия, Москва, 1981. 616 с.
4. Г.Р. Мингалеева, Ю.Н. Зацаранная, Е.К. Вачагина, *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, 1-2, 22-31 (2005).

5. А.Н. Николаев, А.В. Дмитриев, Д.Н. Латыпов. Очистка газовых выбросов ТЭС, работающих на твердом и жидком топливе. Новое знание, Казань, 2004. 135 с.
6. Н.Н. Ежова, А.С. Власов, Л.М. Делицын, *Экология промышленного производства*, **2**, 50-57 (2006).
7. *Каталог пылегазоочистного оборудования*. Международный фонд конверсии, 1990. 238 с.
8. А.С. Тимонин, *Инженерно-экологический справочник*. Изд-во Н. Бочкаревой, Калуга, 2003. 2825 с.
9. P. Baltrenas, M. Pranskevičius, A. Venslovas, *Energy Procedia*, **72**, 188-195 (2015).
10. А.В. Толстых, Ю.Н. Дорошенко, *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*, **3**, 50, 201-209 (2015)
11. А.Г. Титов, З.Р. Гильванова, *Инженерный вестник Дона*, **23**, 4-2(23), 55 (2012)
12. V. Sagot, A. Forthomme, L. Ait Ali Yahia, *Journal of Aerosol Science*, **110**, 53-69 (2017).
13. М.Г. Моргулис, М.Г. Мазус, А.С. Мандрико, М.И. Биргер, *Рукавные фильтры*. Машиностроение, Москва, 1977. 256 с.
14. И.Р. Зиярова, К.А. Багаева, Г.Р. Мингалеева, М.Р. Вахитов, А.Н. Николаев, *Вестник технологического университета*, **20**, 13, 53-55 (2017).
15. А.Г. Лаптев, М.И. Фарахов, Р.Ф. Миндубаев. Очистка газов от аэрозольных частиц сепараторами с насадками. Печатный двор, Казань, 2003. 120 с.
16. А.Г. Ветошкин, *Процессы и аппараты пылеочистки*. Пензенский гос. ун-т, Пенза, 2005. 210 с.
17. М.Р. Вахитов, Г.П. Шуваева, А.Н. Николаев, *Вестник Казан. технол. ун-та*, **16**, 1, 187-189 (2013).
18. А.Н. Подрезов, В.Д. Сандаков, И.М. Валеев, Ю.Н. Зацаринная, *Вестник технол. ун-та*, **18**, 10, 100-101 (2015).
19. М.Г. Зиганшин, А.А. Колесник, В.Н. Посохин, *Проектирование аппаратов пылегазоочистки*. Экспресс-3М, Москва, 1998. 505 с.
20. К.М. Муратова, Я.В. Чистяков, А.А. Махнин, *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, **4**, 47-57 (2014).
21. В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдбер, *Подготовка промышленных газов к очистке*. Химия, Москва, 1975. 216 с.
22. В.Г. Шарифудинова, Я.П. Чтаев, *Вестник Казанского технологического университета*, **17**, 4, 238-240 (2014).
23. И.Т. Глебов, *Аспирация и пневмотранспорт деревообрабатывающих предприятий*. СПб.: Лань, 2017. 160 с.
24. Ю.И. Санаев, *Обеспыливание газов электрофильтрами*. Кондор-Эко, Семипалатово, 2009. 156 с.
25. Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, А.Р. Садурдинов, *Вестник Казан. технол. ун-та*, **13**, 11, 247-251 (2010).
26. О.В. Соловьева, С.А. Соловьев, О.С. Дмитриева, *Вестник технол. ун-та*, **21**, 7, 103-107 (2018).
27. С.В. Панфилов, Ю.М. Циркунов, *Прикл. мех. тех. физ.*, **49**, 2, 222-230 (2008).
28. В.А. Кирш, *Коллоид. журн.*, **72**, 2, 206-210 (2010).
29. S.B. Kwon, H.T. Kim, K.W. Lee, *Aerosol Sci. Technol.*, **36**, 6, 742-747 (2002).
30. S.J. Dunnett, C.F. Clement, *Eng. Analys. Bound. Elements*, **33**, 601-610 (2009).
31. B. Asgharian, Y.S. Chenh, *Aerosol Sci. Technol.*, **36**, 10-17 (2002).

© А. В. Дмитриев – д.т.н., доцент, зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com, В. Э. Зинуров – магистрант ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd_93@mail.ru, О. С. Дмитриева – к.т.н., доцент кафедры ПАХТ ФГБОУ ВО «КНИТУ», ja_deva@mail.ru, М. О. Уткин – студент ФГБОУ ВО «КГЭУ», utkin@mail.ru.

© A. V. Dmitriev – doctor of technical sciences, associate professor, the head of «Theoretical Bases of Heat Engineering» chair, KSPEU, ieremiada@gmail.com, V. E. Zinurov – graduate student, KSPEU, vadd_93@mail.ru, O. S. Dmitrieva – candidate of technical sciences, associate professor of PACHT chair, Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology, ja_deva@mail.ru, M. O. Utkin – student, KSPEU, utkin@mail.ru.