

УДК 66.074.2

**В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, В. В. Харьков,
Т. С. Петрова**

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ НА УЛАВЛИВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В СЕПАРАТОРЕ С ДУГООБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Ключевые слова: запыленный газ, сухая очистка газа, потери давления.

Работа посвящена актуальной проблеме очистки газового потока от мелкодисперсных частиц на различных промышленных предприятиях. Одним из главных минусов инерционных пылеуловителей является низкая эффективность очистки газовых потоков от частиц размером менее 10 мкм. Авторами разработан прямоугольный сепаратор, очищающий газовый поток от мелкодисперсных частиц размером менее 10 мкм с эффективностью не менее 50 %, который предлагается устанавливать после инерционных пылеуловителей. Также преимуществами данного являются дешевизна конструкции, легкость в установке и использовании. Описывается конструкция и принцип работы данного устройства. В работе проводится исследование изменения потерей давления в сепараторе при изменении входной скорости газового потока от 4 до 10 м/с при различных количествах дугообразных элементов в каждом ряду (от 2 до 16) и рядов этих элементов (от 7 до 13). Было показано, что для нормализации структуры газового потока, необходимо увеличивать количество сепарационных элементов в ряду. Для данного расчета наиболее оптимальным количеством рядов дугообразных элементов является 7, так как при данном количестве наблюдаются наименьшие потери давления в сепарационном устройстве. При повышении требований к очистке газового потока от мелкодисперсных частиц необходимо увеличение количества рядов дугообразных элементов. В случае, когда не предъявляются повышенные требования к очистке газа от мелкодисперсных частиц, то необходимо стремиться к минимальному количеству дугообразных элементов в сепараторе, но их количество должно быть более двух.

**V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, V. V. Kharkov,
T. S. Petrova**

EVALUATION OF ENERGY COSTS FOR CAPTURE OF FINE-DISPERSED PARTICLES IN A SEPARATOR WITH ARC-SHAPED ELEMENTS

Keywords: dust-laden gas, dry gas cleaning, pressure drop.

A paper deals with the pressing problem of gas cleaning from fine-dispersed particles at different industrial enterprises. One of the main disadvantages of inertial dust collectors is the low efficiency of gas flow cleaning from particles smaller than 10 μm . The authors developed a rectangular separator for removing of fine-dispersed particles less than 10 μm in size from the gas flow with efficiency more than 50%, which is proposed to be installed after inertial dust collectors. Other advantages of the developed device are the cheapness and simplicity of the design and easy to use. The design and the operation principle of the separator are described. Research on the pressure loss change in the separator depending on inlet gas flow velocity (from 4 to 10 m/s) with a different number of the arc-shaped elements in a row (2–16) and rows of these elements (7–13) was performed. It has been found that to normalize the gas flow structure, it is necessary to increase the number of separation elements in the row. For this calculation, the most optimal number of rows of arc-shaped elements is 7, since this number shows the lowest pressure drop in the separator. In case of increased requirements for cleaning the gas from fine-dispersed particles, it is necessary to add some rows of the arc-shaped elements. Alternatively, where there are no increased requirements for the gas cleaning, it is necessary to have to a minimum number of the arc-shaped elements in the separator, but their number should be more than two.

С развитием техники и технологии, в частности, с увеличением производственных мощностей и использованием новых материалов в технологических процессах в нефтехимии, энергетике, металлургии и других отраслях промышленности возрастает значимость улавливания мелкодисперсных частиц размером менее 10 мкм из эмиссий газовых потоков на предприятиях [1–7]. Например, при производстве изделий используется мелкодисперсный порошок, который уносится в атмосферу и наносит огромный вред здоровью людей. По данным Всемирной организации здравоохранения 9 из 10 людей дышат загрязненным воздухом и каждый год от последствий вдыхания такого воздуха, содержащего взвешенные частицы, умирают около 7 миллионов человек. Кроме того, Всемирная организация здравоохранения установила, что особо опасными для организма человека являются твердые частицы размером менее

10 мкм, способных в отличие от крупнодисперсных частиц осажаться в легких. В первую очередь в зоне риска оказываются сотрудники предприятий, а также люди, проживающие в ближайших населенных пунктах [8–9].

В настоящее время очистка газовых потоков от твердых частиц на предприятиях осуществляется с помощью различных устройств. Наиболее распространенными являются аппараты сухой очистки (циклоны, батарейные циклоны, рациональные пылеуловители и др.), аппараты мокрой очистки (полые и форсуночные скрубберы, скрубберы Вентури, барботажно-пенные пылеуловители и др.), аппараты фильтрационной очистки и электрофильтры. Среди вышеречисленных устройств самыми популярными являются инерционные пылеуловители, так как они применимы практически в любых технологических процессах, просты в использовании, не имеют слож-

ных подвижных механизмов и занимают относительно небольшие площади. Как правило, мокрые аппараты требуют дополнительного оборудования для подвода воды и ее последующей очистки. Электрофильтры очень сильно зависят от параметров частиц, находящихся в газовом потоке, например, их заряженности. Аппараты фильтрационной очистки требуют достаточно частой замены фильтрующих тканей. Поэтому в большинстве случаев предпочтение отдается инерционным пылеуловителям. Однако, одним из главных минусов данных аппаратов является низкая эффективность очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц размером менее 10 мкм. Поэтому разработка и создание новых технологических решений, позволяющих повысить эффективность очистки эмиссий газовых потоков от мелкодисперсных частиц инерционными пылеуловителями, является актуальной задачей [10–15].

Для решения поставленной проблемы авторами данной работы был разработан сепаратор, очищающий газ от мелкодисперсных частиц размером менее 10 мкм с эффективностью не менее 50 %, который предлагается устанавливать после инерционных пылеуловителей. Устройство имеет простую конструкцию и отличается простотой в использовании. Оно представляет собой несколько рядов дугообразных элементов, которые заключены в трапецевидный корпус. Элементы крепятся по высоте аппарата. Следует отметить, что это устройство устанавливается после инерционных пылеуловителей на несколько месяцев, после чего заменяется на новое [16–21].

Принцип действия сепаратора следующий (рис. 1). Газовый поток, содержащий мелкодисперсные частицы входит в устройство и начинает огибать дугообразные элементы. При таком течении газа в связи с особым расположением дугообразных элементов относительно друг друга, на него начинают действовать центробежные силы, в результате чего мелкодисперсные частицы выбиваются из структурированного потока и при контакте с элементами прилипают к ним, после чего очищенный газ от мелкодисперсных частиц выходит из сепаратора.

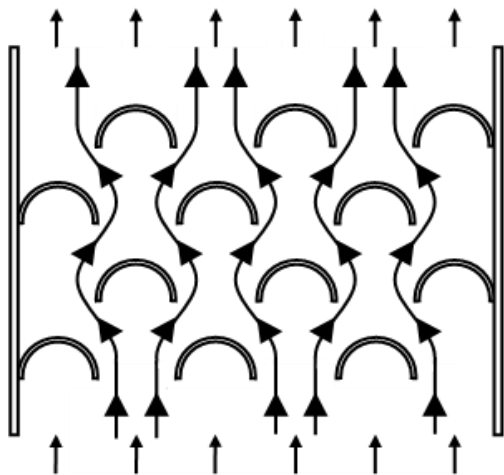


Рис. 1 – Упрощенная двумерная модель прямоугольного сепаратора (вид сверху, перпендикулярный дугообразным элементам)

Как известно, при предъявлении высоких требований к очистке газовых потоков от мелкодисперсных частиц существенно увеличиваются энергетические затраты, которые обусловлены большими потерями давления в аппарате. В связи с этим, целью данной работы является исследование изменения потерей давления в сепараторе в зависимости от входной скорости газового потока при различных количествах дугообразных элементов в каждом ряду и рядов этих элементов.

Данное исследование производилось расчетным путем на основе уравнений (1–3), полученных в ранее проведенных исследованиях [22], характеризующих эффективность E очистки газового потока от мелкодисперсных частиц пыли сепаратором (1), эффективность первых двух рядов E_0 сепаратора (2) и эффективность ступени очистки E_1 сепаратора по формуле (3):

$$E = 1 - 0,4598e^{-1,21Stk}, \quad (1)$$

$$E_0 = 0,5 - 0,4006e^{-0,0327Stk}, \quad (2)$$

$$E_1 = 1 - 0,7945e^{-0,6304Stk}. \quad (3)$$

Следует отметить, что формула (2) была введена для оценки эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц первыми двумя рядами вследствие того, что очистка в данной области происходит преимущественно за счет резкого изменения направления движения потока. После прохождения газом двух рядов дугообразных элементов движение газового потока приобретает структуру за счет действия на газ центробежных сил. Поэтому было введено понятие – степень очистки. Степенью очистки сепаратора является ряд дугообразных элементов, которая определяется формулой (3), где газовый поток очищается под воздействием центробежных сил, то есть, это те ряды, которые расположены после первых двух.

Число Стокса вычислялось по следующему выражению:

$$Stk = \frac{\rho_a a^2 W_h}{\mu h}, \quad (4)$$

где ρ_a – плотность частиц, кг/м³; a – диаметр частиц, мкм; W – скорость газового потока на входе в сепаратор, м/с, μ – динамическая вязкость газа, Па·с; h – радиус окружностей вокруг элементов, м.

В ходе расчета изменялись следующие параметры: входная скорость W газового потока в диапазоне от 4 до 10 м/с, число рядов дугообразных элементов n от 7 до 13, число элементов в каждом ряду n_b от 2 до 16. При этом постоянными задавались следующие параметры: эффективность очистки газового потока от мелкодисперсных частиц принималась равной 0,95, плотность частиц 1000 кг/м³ и диаметр частиц 4 мкм.

Следует отметить, что при исследовании изменения потери давления в сепараторе от числа рядов, число элементов в ряду принималось равным 8. В случае изменения числа элементов в ряду, число рядов принималось равным 6. Расчетный коэффициент гидравлического сопротивления ξ сепаратора был получен в предыдущих исследованиях, который равен 3,96 [23].

Потери давления в сепараторе определялись по следующей формуле:

$$\Delta P = \xi \frac{H \rho W^2}{h \cdot 2}, \quad (5)$$

где H – расстояние между первым и последним рядами дугообразных элементов, м.

Результаты проведенных исследований представлены в графическом виде на рис. 2–3. Увеличение количества элементов в ряду приводит к уменьшению потерей давления в сепараторе. С одной стороны, увеличение количества местных сопротивлений в качестве дополнительных дугообразных элементов должно увеличить общие потери давления в сепараторе, но в связи с тем, что при увеличении количества элементов также увеличиваются габариты аппарата, а скорость остается неизменной, то средняя скорость газа в устройстве уменьшается и потери давления также снижаются (рис. 2).

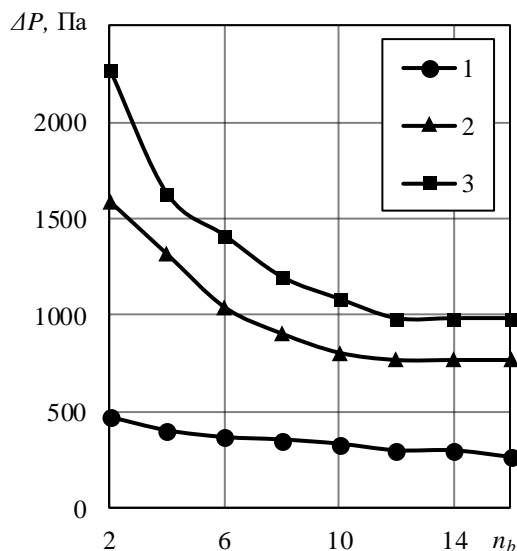


Рис. 2 – Зависимость изменения потери давления в сепараторе от числа дугообразных элементов в каждом ряду при различных значениях входной скорости газового потока W , м/с: 1 – 4; 2 – 8; 3 – 10

Минимальные потери давления в сепараторе наблюдается при входной скорости газового потока равной 4 м/с. В среднем они равны 345 Па. Так, в среднем потери давления в сепараторе при скорости газового потока 4 м/с для 2–8 элементов в ряду составляют 397 Па, а для 9–16 элементов в ряду равны 294 Па. При входной скорости газового потока равной 8 м/с потери давления в аппарате в среднем для n_b в диапазонах 2–8 и 9–16 составляют 980 и 527 Па, соответственно. При скорости газа 10 м/с потери давления в среднем для 2–8 и 9–16 элементов в каждом ряду составляют 1624 и 1006 Па, соответственно. Представленные данные демонстрируют, что увеличение входной скорости газового потока приводит все к более значительной разнице потери давления в сепараторе между различным количеством дугообразных элементов в каждом ряду. Таким образом при большом количестве дугообразных элементов в ряду можно снизить входную скорость газового

потока, что позволит нормализовать структуру потока в сепараторе. В результате при сохранении требуемой эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц будут снижены потери давления в аппарате, что также понизит энергетические затраты.

Увеличение количества рядов дугообразных элементов приводит к повышению потери давления в сепараторе (рис. 3).

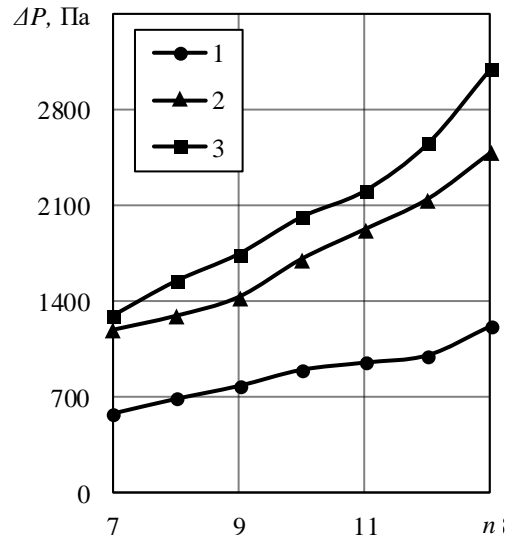


Рис. 3 – Зависимость изменения потери давления в сепараторе от числа рядов дугообразных элементов при различных значениях входной скорости газового потока W , м/с: 1 – 4; 2 – 8; 3 – 10

В данном случае, габариты аппарата остаются неизменными, так как количество дугообразных элементов в каждом ряду не изменяется. В связи с этим, увеличение количества рядов приводит к росту местных сопротивлений, что влияет на существенный рост потерей давления. Следует отметить, что актуальность результатов, представленных на рис. 3, является востребованной при изменении некоторых параметров газового потока, например, запыленности. Потери давления в сепараторе при входной скорости газового потока 4–10 м/с при количестве рядов от 7 до 13 составляют в среднем 1562 Па. При входных скоростях газового потока 4, 8 и 10 м/с потери давления в среднем составляют 877, 1737 и 2070 Па, соответственно. Для данного расчета наиболее оптимальным количеством рядов дугообразных элементов является 7, так как при данном количестве наблюдаются наименьшие потери давления в сепарационном устройстве.

Таким образом, проведенный расчет потерей давления в сепараторе при различных количествах дугообразных элементов в ряду и рядов элементов при различных значениях входной скорости газового потока показал, что для нормализации структуры газового потока, необходимо увеличивать количество элементов в ряду. При повышении требований к очистке газового потока от мелкодисперсных частиц необходимо увеличение количества рядов дугообразных элементов. В случае, когда повышенные требования к очистке газа от мелкодисперсных частиц

не предъявляются, то необходимо стремиться к минимальному количеству дугообразных элементов в сепараторе, но их количество должно быть более двух.

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

Литература

1. S. Akhbarifar, M. Shirvani, *Chem. Eng. Res. Des.*, 147, 483-492 (2019).
2. M.J. Quina, E. Bontempi, A. Bogush, et al, *Sci. Total Environ.*, 635, 526–542 (2018).
3. Н.М. Самохвалов, В.В. Виноградов, *Теоретические основы химической технологии*, **48**, 6, 690-694 (2014).
4. М.Р. Вахитов, Г.П. Шуваева, А.Н. Николаев, *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 1, 187-189 (2013).
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.А. Хамидуллина, А.Ф. Махоткин, И.А. Махоткин, Н.Г. Бакиров, *Вестник Технологического университета*, **20**, 7, 64-66 (2017).
7. А.Н. Николаев, В.В. Харьков, *Вестник Технологического университета*, **18**, 3, 294-296 (2015).
8. A. Combes, G. Franchineau, *Metabolism*, 100, 153944 (2019).
9. D. Wang, Q. Li, G. Shen, J. Deng et. al., *Science of The Total Environment*, 715, 136992 (2020).
10. Д.А. Серебрянский, В.В. Горголюк, С.В. Плашихин, Н.В. Семенюк, *Экология и промышленность*, **2(39)**, 36-40 (2014).
11. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.И. Поляков, *Вестник Технологического университета*, **21**, 11, 66-69 (2018).
12. А.Н. Николаев, В.В. Харьков, *Вестник Технологического университета*, **18**, 18, 130-132 (2015).
13. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Ву Линь Нгуен, *Вестник Технологического университета*, **10**, 1(37), 74-81 (2018).
14. Н.И. Чепелев, *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*, **5(140)**, 186-191 (2018).
15. Г.Р. Мингалеева, Ю.Н. Зацаринная, Е.К. Вачагина, *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, **1-2**, 22-31 (2005).
16. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, С.В. Данг, Э.И. Салахова, *Вестник Технологического университета*, **21**, 11, 75-79 (2018).
17. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, В.Л. Нгуен, *Вестник Технологического университета*, **20**, 15, 78-80 (2017).
18. А.В. Цветное, А.К. Митин, *Экология и промышленность России*, **21**, 8, 4-7 (2017).
19. С.В. Свергузова, И.В. Старостина, Е.В. Суханов, Д.В. Сапронов, И.Г. Шайхиев, *Вестник Казанского государственного энергетического университета*, **18**, 10, 202-205 (2015).
20. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Н.В. Линь, *Вестник Иркутского государственного технического университета*, **22**, 3(134), 138-144 (2018).
21. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.А. Галиев, *Вестник Технологического университета*, **21**, 9, 58-61 (2018).
22. A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva O.S., *E3S Web of Conferences*, 00007 (2019).
23. V.E. Zinurov, O.S. Popkova, V.L. Nguyen, *E3S Web of Conferences*, 00043 (2019).

© **В. Э. Зинуров** – аспирант ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd_93@mail.ru; **А. В. Дмитриев** – д.т.н., зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com; **В. В. Харьков** – старший преподаватель кафедры ОПП ФГБОУ ВО «КНИТУ», v.v.kharkov@gmail.com; **Т. С. Петрова** – студент ФГБОУ ВО «КГЭУ», tonysh@mail.ru.

© **V. E. Zinurov** – postgraduate student, Kazan State Power Engineering University (KSPEU), vadd_93@mail.ru; **A. V. Dmitriev** – Doctor of Engineering, Head of Department «Theoretical Basis of Thermotechnics», KSPEU, ieremiada@gmail.com; **V. V. Kharkov** – Senior Lecturer, Department of Food Production Equipment, Kazan National Research Technological University, v.v.kharkov@gmail.com; **T. S. Petrova** – student, KSPEU, tonysh@mail.ru.