

УДК 66.074.2

**А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева,
В. В. Харьков**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СТРУКТУРУ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ СЕПАРАТОРЕ

Ключевые слова: мелкодисперсные частицы, очистка газового потока, инерционный пылеуловитель, циклон.

Работа посвящена актуальной задаче очистки загрязненных газовых выбросов различных промышленных предприятий от твердых мелкодисперсных частиц размером менее 10 мкм. Авторами разработан прямоугольный сепаратор для дополнительной очистки газовых потоков после основного процесса пылеочистки в циклонном аппарате. Детально описывается устройство и принцип его работы. Проводится исследование влияния конструктивных и физических параметров на структуру движения газового потока, в частности оценка влияния длины двутавровых элементов на структуру движения газового потока в прямоугольном сепараторе при различной входной скорости газа. Представлена структура движения газового потока, где отчетливо прослеживается возникновение движущей центробежной силы между элементами сепаратора. Найдено, что существует критическая скорость, до которой наблюдаются скачки коэффициента гидравлического сопротивления, что свидетельствует о нарушении структуры движения газового потока. Критическая скорость газа для длин двутавровых элементов 10; 25 и 50 мм равна 4,9; 2,9 и 2,0 м/с, соответственно. Варьирование расстояния между рядами двутавровых элементов производится для достижения максимального значения центробежной силы. Максимальное и минимальное значения эффективности каждой ступени сепаратора соответствуют значениям чисел Стокса 1,5 и 0,4 соответственно. Полученное уравнение зависимости критической скорости от расстояния между рядами двутавровых элементов и зависимость эффективности каждой ступени от чисел Стокса позволяют определять связь между конструктивными и физическими параметрами, влияющими на структуру движения газового потока в прямоугольном сепараторе с целью достижения максимальной эффективности очистки газов.

**A. V. Dmitriev, V. E. Zinurov, O. S. Dmitrieva,
V. V. Kharkov**

THE EFFECTS OF CONSTRUCTION AND PHYSICAL PARAMETERS ON GAS FLOW PATTERN IN RECTANGULAR SEPARATOR

Keywords: fine particles, gas cleaning, inertial dust collector, cyclone.

The paper deals with the current task of gas emissions cleaning from fine particles with a size less than 10 μm in industrial enterprises. The authors have developed a rectangular separator for additional cleaning of gas flows after the primary dust removal in the cyclone. The device and its operating principle are described. The effect of design and physical parameters on the gas-flow pattern is studied, in particular, the influence of the length of the double-T-shaped elements on the structure of gas flow motion in the rectangular separator at different inlet gas velocity is estimated. Gas flow pattern is presented, where occurrence of centrifugal force between separator elements is clearly observed. It has been found that there is a critical value of this velocity at which the hydraulic resistance coefficient leaps are observed, indicating a disruption of the gas flow pattern. Critical gas velocities are 4.9; 2.9 and 2.0 m/s at lengths of the T-shaped-beam elements 10; 25 and 50 mm, respectively. Change in the distance between rows of double-T-shaped elements is performed to achieve maximum value of centrifugal force. The maximum and minimum efficiency values of each stage of the separator correspond to the Stokes numbers of 1.5 and 0.4, respectively. Derived equation of dependence of critical gas velocity on the distance between rows of double-T-shaped elements and dependence of efficiency of each stage on Stokes numbers give a possibility to determine a correlation between design and physical parameters affecting the structure of gas flow motion in the developed rectangular separator in order to achieve maximum efficiency of gas cleaning.

Проблема очистки загрязненных газовых выбросов является чрезвычайно актуальной задачей для химической и нефтехимической отраслей, а также для энергетики. По данным ООН ежегодно в атмосферу выбрасывается более 2,5 млн. тонн пыли. По прогнозам министерства природных ресурсов РФ с 2030 г. первенство в топливно-энергетическом балансе в России займут уголь и атомная энергетика, что потребует конструктивного и технологического совершенствования пылегазоочистного оборудования [1,2].

В настоящий момент времени наиболее распространенными пылеочистными устройствами являются инерционные пылеуловители, среди которых большую популярность имеют различные модифика-

ции циклонов. Такая их популярность обусловлена большим количеством преимуществ перед другими очистительными устройствами: простота конструкции и сравнительно небольшая стоимость, возможность функционирования в условиях высоких температур и давлений без каких-либо принципиальных изменений конструкции, возможность улавливания и классификации абразивных включений при защите внутренних поверхностей циклонов специальными покрытиями, высокая производительность и сохранение требуемого уровня фракционной эффективности очистки с ростом массовой концентрации твердой фазы, возможность сухого осаждения продукта [3–5]. Однако к недостаткам циклонов относят высокое гидравлическое сопротивление и низкую эффек-

тивность очистки газов от мелкодисперсных частиц диаметром менее 10 мкм. Поэтому модернизация циклонов или разработка новых технологических решений для интенсификации очистки загрязненных газовых потоков будут всегда актуальными [6–11].

Для эффективной очистки загрязненных газовых потоков предлагается реализовать двухступенчатый процесс: сперва газовый поток очищается в циклоне, затем очищенный газ через линию подачи газа попадает в прямоугольный сепаратор, где происходит его дополнительная очистка. Авторами данной статьи была разработана конструкция прямоугольного сепаратора [12,13], основной функцией которого является повышение эффективности очистки газовых потоков от пыли размером менее 10 мкм. Стоит отметить, что прямоугольный сепаратор также способен очищать газовые потоки от частиц более 10 мкм. Эффективность очистки прямоугольным сепаратором газового потока от частиц размером в диапазоне от 10 до 100 мкм варьируется в пределах 99,0–99,9% с умеренным гидравлическим сопротивлением до 700 Па при скоростях газового потока от 1 до 5 м/с. Для частиц размером менее 10 мкм эффективность в среднем равна 61,7 % [13].

Прямоугольный сепаратор состоит из нескольких рядов двутавровых балок, заключенных в прямоугольный корпус. Для обеспечения высокой прочности двутавровые элементы крепятся к стенкам корпуса аппарата. В нижней части прямоугольного сепаратора имеется несколько круглых отверстий, предназначенных для удаления пыли.

Принцип работы устройства заключается в следующем: загрязненный газовый поток входит в устройство через входной патрубок и движется к выходу из него, огибая при этом несколько рядов двутавровых элементов, в ходе данного процесса возникает центробежная сила, отбрасывающая частицы пыли к двутавровым элементам, тем самым, выбивая их из структурированного газового потока. Эти частицы постепенно оседают на дно аппарата, откуда через специально проделанные отверстия удаляются в пылевые мешки. Достоинствами конструкции прямоугольного сепаратора являются: малая металлоемкость, высокая степень улавливания мелкодисперсных частиц, возможность регенерации элементов.

Особая роль в процессе пылеочистки в сепараторе отводится центробежной силе. Поэтому элементы в сепараторе расположены относительно друг друга таким образом, чтобы достигалось ее максимальное значение. На рис. 1 представлена структура движения газового потока, где зеленый цвет отчетливо иллюстрирует возникновение центробежной силы между элементами сепаратора. Скорость газа в сужениях возрастает, что иллюстрируют желтый и красный цвета. Для достижения высокой эффективности пылеочистки структура движения газового потока не должна нарушаться, в обратном случае это приводит к заметному снижению эффективности разделения.

Целью работы является исследование влияния конструктивных и физических параметров на структуру движения газового потока в прямоугольном сепараторе, в частности оценка влияния длины дву-

тавровых элементов на структуру движения газового потока при различной входной скорости газа.

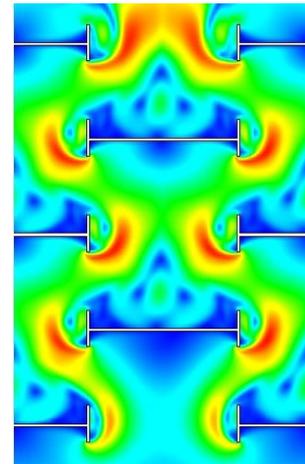


Рис. 1 – Структура движения газового потока в прямоугольном сепараторе (вид сверху)

Для расчета процессов очистки загрязненных газовых потоков в прямоугольных сепараторах при различных длинах двутавровых элементов и входных скоростей газовых потоков использовался метод конечных элементов в программном комплексе ANSYS Fluent. В ходе исследования использовалась SST модель турбулентности. Для упрощения численного расчета принимались следующие допущения: толщины двутавровых элементов и стенок корпуса не учитывались; на стенках двутавровых элементов задавалось условие прилипания; трехмерная модель сепаратора была заменена двумерной, так как по высоте устройства никаких изменений геометрии нет. В ходе расчета изменялись следующие параметры: длина двутавровых элементов b в диапазоне от 10 до 50 мм; число рядов m принималось равным 3, 5 и 7; входная скорость газового потока W варьировалась в диапазоне от 1 до 10 м/с; диаметр частиц пыли a изменялся от 1 до 10 мкм. Постоянными параметрами являлись: атмосферное давление на выходе из аппарата 10^5 Па; начальная скорость частиц в газовом потоке 0 м/с; число частиц, находящихся в газе n , принималось равным 1000.

Эффективность очистки E загрязненного газового потока прямоугольным сепаратором определялась по формуле:

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

где n_k – число части в газе, которые остались в нем после его очистки в прямоугольном сепараторе.

Особый интерес представляет эффективность каждой ступени прямоугольного сепаратора. Стоит отметить, что количество ступеней и количество рядов в сепараторе не равны. Вследствие того, что процесс осаждения частиц на двутавровые элементы первого и последнего рядов сепаратора отличаются от других рядов. Поэтому для нахождения количества ступеней прямоугольного сепаратора необходимо вычесть 2 из количества рядов двутавровых элементов. Эффективность каждой ступени E_1 прямоугольного сепаратора определялась по выражению:

$$E_1 = 1 - (1 - E)^{\frac{1}{m-2}}$$

Коэффициент гидравлического сопротивления сепаратора ξ определялся по формуле:

$$\xi = \frac{2\Delta p h}{\rho W_h^2},$$

где Δp – разница давлений на входном и выходном патрубках сепаратора, Па; h – расстояние между соседними рядами двутавровых элементов, м; H – длина прямоугольного сепаратора, м; ρ – плотность газа, кг/м³; W_h – скорость газового потока в сужениях между элементами, м/с.

Для связи между конструктивными и физическими параметрами использовалось число Стокса Stk , которое определялось по формуле:

$$Stk = \frac{\rho_a a^2 W_h}{\mu h},$$

где ρ_a – плотность частиц, кг/м³; μ – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Результаты исследований были представлены графически на рис. 2–4. Показано, что существует критическая скорость, до которой наблюдаются скачки коэффициента гидравлического сопротивления, что свидетельствует о нарушении структуры движения газового потока, и после которой возможно наблюдать изменение коэффициента гидравлического сопротивления в рамках нормы погрешности, что свидетельствует о структуре потока, представленной на рис. 1.

Обнаружены значения числа Стокса при которых достигается наибольшая эффективность каждой ступени прямоугольного сепаратора. Критическая скорость для длин двутавровых элементов 10; 25 и 50 мм равна 4,9; 2,9 и 2,0 м/с, соответственно. Скачки изменения погрешности коэффициента гидравлического сопротивления до критической скорости составляет до 70 %, а после составляет не более 8 % (рис. 2).

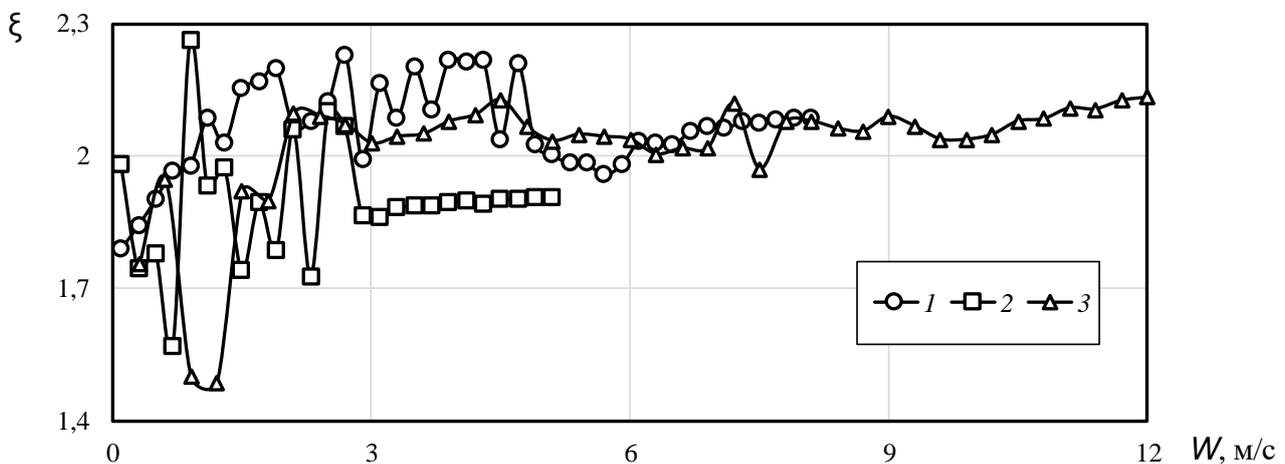


Рис. 2 – Изменение коэффициента гидравлического сопротивления сепаратора ξ от входной скорости газового W при различных длинах двутавровых элементов b , мм: 1 – 10; 2 – 25; 3 – 50

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления прямоугольного сепаратора от расстояния между рядами двутавровых элементов объясняется изменением длины двутавровых элементов. Варьирование расстояния между рядами двутавровых элементов производится для достижения максимального значения центробежной силы. В ходе исследования получено уравнение изменения критической скорости W_c от расстояния между рядами двутавровых элементов (рис. 3).

После определения критической скорости газового потока, полученные значения эффективности ступеней сепаратора и чисел Стокса были отсортированы на две категории, соответствующие значениям скорости газового потока до и после критической скорости. В случае, как и с коэффициентом гидравлического сопротивления (рис. 2), значения докритической скорости представляют собой несвязные зависимости, поэтому представлены не будут, так как не поддаются анализу. Значения эффективности ступеней сепаратора от чисел Стокса, соответствующих

значениям скорости газового потока после критической скорости, представлены на рис. 4.

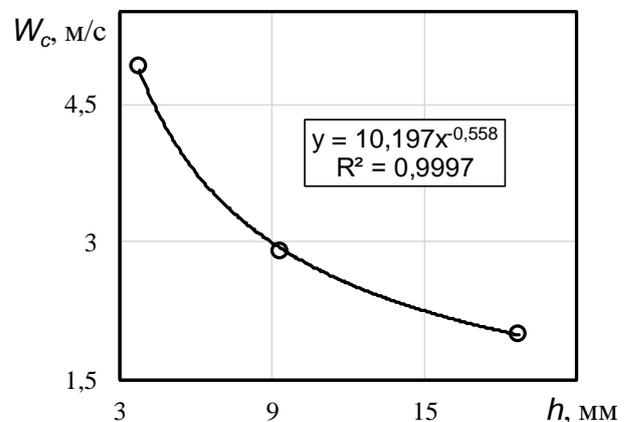


Рис. 3 – Зависимость критической скорости W_c от расстояния между рядами двутавровых элементов h

Максимальное и минимальное значения эффективности каждой ступени сепаратора соответствуют значениям чисел Стокса 1,5 и 0,4 соответственно. Таким образом, можно определить необходимую входную скорость газового потока при конкретном значении длины двутавровых элементов для достижения максимальной эффективности очистки загрязненного газа при минимальном гидравлическом сопротивлении. Следует отметить, что три линии соответствуют разному количеству рядов двутавровых элементов. В связи с тем, что они не накладываются друг на друга можно сделать вывод, что первый ряд двутавровых элементов также оказывает значимый эффект на очистку загрязненного газового потока в прямоугольном сепараторе (рис. 4).

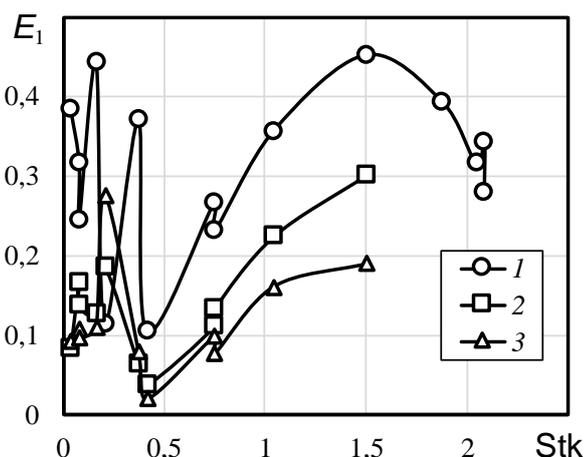


Рис. 4 – Изменение эффективности каждой ступени прямоугольного сепаратора E_1 от чисел Стокса Stk при разном количестве рядов двутавровых элементов m : 1 – 3; 2 – 5; 3 – 7

Таким образом, исследование показало, что использование прямоугольного сепаратора для дополнительной очистки загрязненного газового потока

после циклона способствует интенсификации процесса пылеочистки. Полученное уравнение зависимости критической скорости от расстояния между рядами двутавровых элементов и зависимость эффективности каждой ступени от чисел Стокса позволяют определять связь между конструктивными и физическими параметрами, влияющими на структуру движения газового потока в прямоугольном сепараторе, с целью достижения максимальной эффективности очистки газов.

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

Литература

1. В.А. Андрианов, *Общество и экономика*, 6, 75-106 (2017).
2. M.J. Quina, E. Bontempi, A. Bogush, et al, *Sci. Total Environ.*, 635, 526–542 (2018).
3. B. Sagot, A. Forthomme, L. Ait Ali Yahia, *Journal of Aerosol Science*, **110**, 53-69 (2017).
4. S. Akhbarifar, M. Shirvani, *Chem. Eng. Res. Des.*, 147, 483-492 (2019).
5. В.С. Асламова, *Прямоточные циклоны. Теория, расчет, практика*. АГТА, Ангарск, 2008. 233 с.
6. В.Г. Шарафутдинова, Я.П. Чтаев, *Вестник Казанского технологического университета*, **17**, 4, 238-240 (2014).
7. В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев, *Очистка газов*. Теплоэнергетик, Москва, 2002. 640 с.
8. А.Н. Николаев, В.В. Харьков, *Вестник Технологического университета*, **18**, 3, 294-296 (2015).
9. Ю.И. Санаев, *Обеспыливание газов электрофильтрами*. Кондор-Эко, Семипратово, 2009. 156 с.
10. А.Н. Николаев, В.В. Харьков, *Вестник Технологического университета*, **18**, 18, 130-132 (2015).
11. Н.И. Чепелев, *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*, **5(140)**, 186-191 (2018).
12. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.А. Галиев, *Вестник Технологического университета*, **21**, 9, 58-61 (2018).
13. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, В.Л. Нгуен, *Вестник Иркутского государственного технического университета*, **22**, 3 (134), 138-144 (2018).

© А. В. Дмитриев – д.т.н., зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com; В. Э. Зинуров – аспирант ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd_93@mail.ru; О. С. Дмитриева – к.т.н., доцент кафедры ПАХТ НХТИ ФГБОУ ВО «КНИТУ», ja_deva@mail.ru, В. В. Харьков – ст. преп. кафедры ОПП ФГБОУ ВО «КНИТУ», v.v.kharkov@gmail.com.

© A. V. Dmitriev – Doctor of Engineering, Head of Department «Theoretical Basis of Thermotechnics», Kazan State Power Engineering University (KSPEU), ieremiada@gmail.com; V. E. Zinurov – postgraduate student, KSPEU, vadd_93@mail.ru; O. S. Dmitrieva – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Process Engineering, Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology, Kazan National Research Technological University (KNRTU), ja_deva@mail.ru; V. V. Kharkov – Senior Lecturer, Department of Food Production Equipment, KNRTU, v.v.kharkov@gmail.com.