

УДК 66.074.2

**В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. В. Соловьева,
Д. Н. Латыпов**

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ГАЗОВОГО ПОТОКА ОТ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ СЕПАРАТОРОМ ПРИ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ЗАБИВКИ ДУГООБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЫЛЬЮ

Ключевые слова: инерционные пылеуловители, предварительная очистка, эффективность пылеулавливания.

Повышение эффективности сухих инерционных пылеуловителей связано с увеличением скоростей газового потока, следовательно, приводит к увеличению их гидравлического сопротивления. Явления адгезии и аутогезии пылей вносят дополнительные ограничения в использовании этих аппаратов. Представляют определенный интерес использование инерционного механизма осаждения пыли с повышенными показателями слипаемости в устройствах с относительно невысокими гидравлическими сопротивлениями для предварительной очистки перед высокоэффективными фильтрами. Исследовано влияние изменения формы и размеров рабочих элементов инерционного пылеуловителя на его общую эффективность. Результаты получены с использованием метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS Fluent. Для исследования влияния изменения формы дугообразных элементов на эффективность было построено 3 модели сепаратора. Установлено, что на эффективность очистки газового потока от мелкодисперсных частиц значимым образом влияет режим течения газового потока внутри устройства. При неизменной входной скорости газового потока режим течения существенно меняется по мере забивки элементов сепаратора пылью, причем это актуально только при длине элементов более 13 мм. Таким образом, для сохранения высокой эффективности равной более 99 % необходимо поддерживать относительно высокую входную скорость газового потока равную не менее 15 м/с. В случае, если это экономически не рентабельно, то использовать сборное устройство, состоящее из нескольких блоков сепараторов, в которых находятся дугообразные элементы длиной 13 мм. Главными достоинствами прямоугольного сепаратора являются высокая эффективность при умеренном гидравлическом сопротивлении, отсутствие движущихся частей, простота конструкции и легкость в очистке.

**V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. V. Solovyeva,
D. N. Latypov**

STUDYING THE CHANGES IN THE EFFICIENCY OF CLEANING A GAS FLOW FROM FINE PARTICLES USING A RECTANGULAR SEPARATOR AT THE DIFFERENT DEGREES OF CLOGGING THE ARC-LIKE ELEMENTS WITH DUST

Keywords: inertial dust collectors, precleaning, dust collection efficiency.

Increasing the efficiency of dry inertial dust collectors is related to increasing the gas flow rates and, therefore, leads to increasing their hydraulic resistance. The phenomena of adhesion and self-adhesion of dusts introduce additional constraints into using those devices. Of certain interest are the use of the inertial dust precipitation mechanism with the increased indicators of adhesiveness in devices with the relatively low hydraulic resistances for precleaning before high-performance filters. We studied how changes in the forms and sizes of the working elements of an inertial dust collector upon its general efficiency. The results were obtained using the finite-element method in the ANSYS Fluent software package. We built 3 separator models to study how the form of arc-like elements affects the efficiency. It is found that the efficiency of cleaning the gas flow from fine particles is considerably affected by the gas flow mode inside the device. At the unchanged input gas flow rate, the flow mode is considerably changed as the separator elements are clogged with dust, this being relevant for the elements more than 13 mm long only. Therefore, to keep the efficiency as high as over 99 %, it is necessary to maintain a relatively high input gas flow rate of at least 15 m/s. If it is economically inefficient, then we should use a device assembled of several blocks of separators, in which there are arc-like elements 13 mm long. The main advantages of the rectangular separator are the high efficiency at moderate hydraulic resistance, no moving parts, simple design, and easy cleaning.

Повышение эффективности сухих инерционных пылеуловителей связано с увеличением скоростей газового потока, следовательно, приводит к увеличению их гидравлического сопротивления. Явления адгезии и аутогезии пылей вносят дополнительные ограничения в использовании этих аппаратов.

Представляют определенный интерес использование инерционного механизма осаждения пыли с повышенными показателями слипаемости в устройствах с относительно невысокими гидравлическими сопротивлениями для предварительной очистки перед высокоэффективными фильтрами.

Основным преимуществом таких аппаратов должно являться простота конструкции, позволяющая использовать их в существующих системах газоочистки путем врезки в имеющиеся газоходы, без существенных затрат на дополнительное тягодутьевое оборудование.

Авторами разработан прямоугольный сепаратор для очистки газов от мелкодисперсной пыли размером до 10 мкм, позволяющий увеличить эксплуатационный срок службы основных аппаратов тонкой очистки путем установки сепаратора в качестве предварительной ступени очистки [1-8].

Сепаратор представляет из себя простую конструкцию, включающую несколько рядов дугообразных элементов, заключенных в прямоугольный корпус (рис. 1). Для исключения вероятности расшатывания элементов и их поломки они крепятся по высоте к корпусу сепаратора. Также имеется поперечная пластина, объединяющая все дугообразные элементы, что увеличивает жесткость конструкции устройства.

Принцип действия сепаратора можно описать следующим образом: запыленный газовый поток входит в устройство через входной патрубок 1, огибает несколько рядов дугообразных элементов 2 и выходит из сепаратора через выходной патрубок 4, после чего попадает в аппарат тонкой очистки.

При движении газа между дугообразными элементами происходит закручивание запыленного потока. Частицы пыли, которые содержатся в газовом потоке выбиваются из его структуры, попадая на поверхности стенок дугообразных элементов. Если размер частиц составляет менее 10 мкм, то они прилипают к дугообразным элементам за счет электростатических и инерционных сил, броуновского движения и совокупности всех этих факторов.

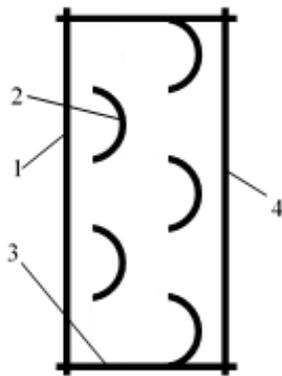


Рис. 1 – Упрощенная двумерная модель сепаратора (сечение перпендикулярное дугообразным элементам): 1 – входной патрубок сепаратора; 2 – дугообразные элементы внутри сепаратора; 3 – корпус устройства; 4 – выходной патрубок сепаратора

Средне и крупнодисперсные частицы при выбивании из структуры потока, как правило, оседают на дно сепаратора, реже прилипают подобно мелкодисперсным частицам к поверхностям дугообразных элементов. Через определенные промежутки времени сепаратор разбирается и очищается от пыли. Для исключения простоя работы предприятия очистка сепаратора производится в те периоды, когда осуществляется аналогичная процедура для аппаратов тонкой очистки.

Особую роль в очистке газового потока от мелкодисперсных частиц отводится дугообразным элементам, которые формируют структуру потока и, вследствие своей формы, влияют на гидравлическое сопротивление аппарата. По мере накопления пыли в сепараторе, в частности забивки дугообразных элементов, они теряют свою форму, приобретая за счет осевшей пыли более конусообразную в поперечном

сечении форму, что, скорее всего, влияет на эффективность очистки газового потока от мелкодисперсной пыли.

Целью настоящей работы является исследование изменения эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц прямоугольным сепаратором при разной степени изменения геометрической формы рабочих дугообразных элементов по мере накопления на их поверхности пыли.

Для проведения данного исследования использовался метод конечных элементов в программном комплексе ANSYS Fluent.

Для исследования влияния изменения формы дугообразных элементов на эффективность было построено 3 модели сепаратора.

Первая модель сепаратора представлена на рисунке 1. Дугообразные элементы не забиты частицами пыли, принималось, что в данном случае степень забивки $p = 0$. Во второй модели принималось, что степень забивки составляет $p = 0,5$, когда внутренняя часть дугообразных элементов полностью закрывалась, т.е. в сечении получались полукруги. В третьей модели принималось степени забивки $p = 1$. Дугообразные элементы превращались в конусообразные в сечении элементы, при этом образующие конуса представляли собой две дуги, соединяющие точку, которая отводилась от центра хорды дугообразного элемента на расстояние $b/2$ и две крайние точки сечения рабочего элемента. Хорда дугообразных рабочих элементов обозначалась параметром b .

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 задавались следующие постоянные параметры: число частиц, находящихся в газовом потоке $n = 1000$, плотность газового потока $\rho = 1,22 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость газа $\mu = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$, плотность частиц $\rho_a = 1075 \text{ кг/м}^3$; число рядов элементов – 10. Для построения зависимостей некоторые параметры изменялись в следующих диапазонах: диаметр частиц a от 1 до 12 мкм, входная скорость газового потока W от 3 до 15 м/с и степень забивки элементов внутри сепаратора p от 0 до 1. Также в ходе численных исследований было произведено масштабирование прямоугольного сепаратора в 2 раза.

Эффективность очистки газового потока E 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 прямоугольном сепараторе.

Алгоритм расчета эффективности предполагает, что уловленной считается частица, отклонившаяся от линии тока газа и прикоснувшаяся к рабочей поверхности уловителя. Данное допущение справедливо для

частиц с хорошей слипаемостью, например, для пыли после окрасочных камер. Несколько завышенные при этом значения эффективности не влияют на зависимость последней от изменения геометрии рабочих элементов аппарата.

Результаты исследований представлены на рисунках 2, 3, 4, 5. Проведенные исследования показали, что эффективность очистки газового потока от мелкодисперсных частиц прямоугольным сепаратором практически не зависит от степени забивки дугообразных элементов пылью. Однако, существенный вклад на эффективность может вносить режим течения (ламинарный, переходный или турбулентный), так как это приводит к изменению структуры потока, затуханию или формированию дополнительных вихрей в сепараторе. Так, при входных скоростях газового потока 3, 11 и 15 м/с средняя эффективность очистки газового потока от мелкодисперсных частиц размером менее 12 мкм по мере забивания дугообразных элементов пылью составляет 99,2%, при скорости 7 м/с эффективность в среднем составляет 96,7 %. Наиболее отчетливо разница видна при сравнении эффективностей очистки запыленного потока от частиц размером до 3 мкм. Средние эффективности равны 90,8 % и 97,7 % при входных скоростях газового потока 7 м/с и 3, 11, 15 м/с соответственно. Данные значения справедливы для дугообразных элементов хордой 13 мм. При масштабировании конструкции устройства в 2 раза в среднем эффективность очистки снижается в 1,32 раза по мере забивания дугообразных элементов.

Изменение эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц по мере забивания дугообразных элементов проиллюстрировано на рисунке 2. На графике 1 - 4 линии характеризуют входную скорость газового потока 7 м/с и различные диаметры частиц. По мере увеличения размера частиц эффективность также возрастает. Так, при размере 1 мкм средняя эффективность составляет 94,2 % для диапазона забивки p от 0 до 1, для частиц размером 3 мкм средняя эффективность составляет 97,3 %. Линии 5 и 6 характеризуют 1 мкм частицы и входную скорость газового потока 11 и 15 м/с соответственно. В связи с тем, что эффективность близка 100 %, можно сделать вывод, что при увеличении размера частиц эффективность не будет уменьшаться (рис. 2).

При нулевой степени забивки дугообразных элементов при $b = 13$ мм в среднем эффективность очистки газового потока от мелкодисперсных частиц составляет 99,4 %, при $b = 26$ мм средняя эффективность равна 78,8 % при входных скоростях газового потока 3, 11 и 15 м/с.

Масштабирование установки в 2 раза влияет только на частицы размером до 3 мкм. При масштабировании установки, все размеры увеличивались в 2 раза: длина элементов, расстояние между элементами, рядами и др. Таким образом, падение эффективности при масштабировании сепаратора в большей степени связано с увеличением расстояний между дугообразными элементами и рядами, так как мелкие частицы при выбивании из структуры потока не

успевают осесть на поверхностях элементов, а подхватываются газовым потоком повторно (рис. 3).

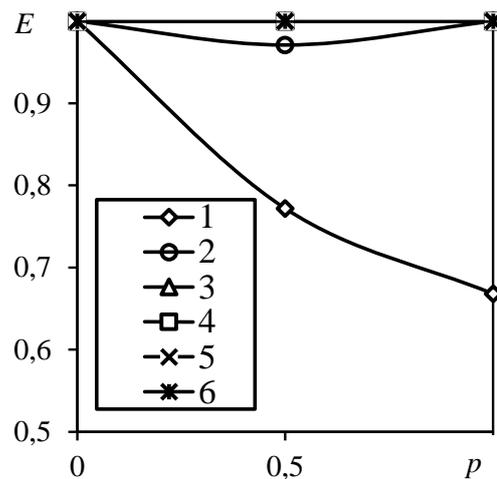


Рис. 2 – Зависимость изменения эффективности очистки газового потока E от степени забивки дугообразных элементов p пылью при различных значениях входной скорости газового потока W , м/с и размера мелкодисперсных частиц a , мкм: 1 – $W = 7$, $a = 1$; 2 – $W = 7$, $a = 3$; 3 – $W = 7$, $a = 5$; 4 – $W = 7$, $a = 9$; 5 – $W = 11$, $a = 1$; 6 – $W = 15$, $a = 1$

При забивании дугообразных элементов пылью на 50 % при длине элементов равной 13 мм в среднем

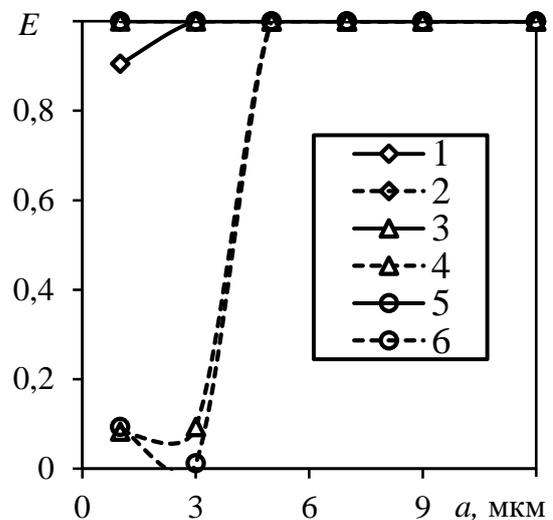


Рис. 3 – Зависимость изменения эффективности очистки газового потока E от размера мелкодисперсных частиц a в прямоугольном сепараторе с нулевой степенью забивки дугообразных элементов пылью при различных значениях входной скорости газового потока W , м/с и длинах дугообразных элементов b , мм: 1, 2 – $W = 3$; 3, 4 – $W = 11$; 5, 6 – $W = 15$. Линии – $b = 13$; пунктирные линии – $b = 26$

эффективность очистки газового потока от мелкодисперсных частиц близка 100 %, при длине элементов 26 мм средняя эффективность составляет 66,7 % при входных скоростях газового потока 3, 11 и 15 м/с. Можно заметить, что в отличии от нулевой

степени забивки дугообразных элементов (рис. 3) при скорости 3 м/с снижается эффективность очистки газового потока от мелкодисперсных частиц размером до 9 мкм при длине элементов 26 мм. В среднем данная эффективность равна 86,4 %. Это объясняется тем, что изменяется форма дугообразных элементов и как следствие изменяется структура газового потока для некоторых скоростей (рис. 4).

Изменение формы дугообразных элементов в сторону конусообразной формы в связи с полной забивкой элементов пылью приводит к падению эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц при скоростях газового потока 3, 11 и 15 м/с при длине элементов 26 мм. В среднем эффективности равны 72,3, 85,2 и 86,3 % при входных скоростях газового потока 3, 11 и 15 м/с соответственно.

Как видно, при росте скорости происходит увеличение эффективности, что еще раз подтверждает выдвинутое предположение о существенном влиянии режима течения газового потока при изменении формы элементов внутри сепаратора на эффективность очистки газа от пыли. Стоит отметить, что средняя эффективность для элементов длиной 13 мм составляет 99,7 % (рис. 5).

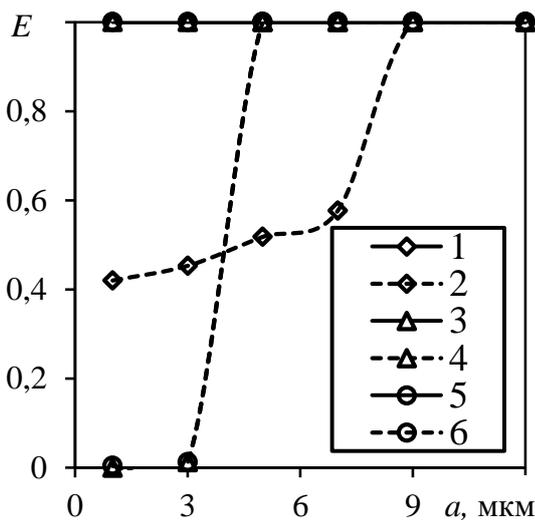


Рис. 4 – Зависимость изменения эффективности очистки газового потока E от размера мелкодисперсных частиц a в прямоугольном сепараторе со степенью забивки дугообразных элементов $p = 0,5$ при различных значениях входной скорости газового потока W , м/с и длинах дугообразных элементов b , мм: 1, 2 – $W = 3$; 3, 4 – $W = 11$; 5, 6 – $W = 15$. Линии – $b = 13$; пунктирные линии – $b = 26$

Проведенные исследования показали, что на эффективность очистки газового потока от мелкодисперсных частиц значимым образом влияет режим течения газового потока внутри устройства, так как он способствует изменению структуры потока. При неизменной входной скорости газового потока режим течения существенно меняется по мере забивки элементов сепаратора пылью, причем это актуально только при длине элементов более 13 мм. Таким образом, для сохранения высокой эффективности равной более 99 % необходимо поддерживать относи-

тельно высокую входную скорость газового потока равную не менее 15 м/с. В случае, если это экономически не рентабельно, то использовать сборное устройство, состоящее из несколько блоков сепараторов, в которых находятся дугообразные элементы длиной 13 мм.

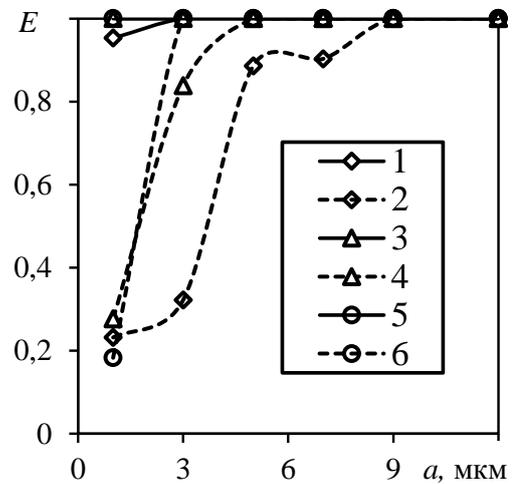


Рис. 5 – Зависимость изменения эффективности очистки газового потока E от размера мелкодисперсных частиц a в прямоугольном сепараторе с степенью забивки дугообразных элементов $p = 1$ при различных значениях входной скорости газового потока W , м/с и длинах дугообразных элементов b , мм: 1, 2 – $W = 3$; 3, 4 – $W = 11$; 5, 6 – $W = 15$. Линии – $b = 13$; пунктирные линии – $b = 26$

Главными достоинствами прямоугольного сепаратора являются высокая эффективность при умеренном гидравлическом сопротивлении, отсутствие движущихся частей, простота конструкции и легкость в очистке.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-01188.

Литература

1. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Нгуен Ву Линь, *Вестник Иркутского государственного технического университета*, **22**, 3(134), 138-144 (2018).
2. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.А. Галиев, *Вестник Казанского технологического университета*, **21**, 9, 58-61 (2018).
3. И.Р. Зиярова, К.А. Багаева, Г.Р. Мингалеева, М.Р. Вахитов, А.Н. Николаев, *Вестник технологического университета*, **20**, 13, 53-55 (2017).
4. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Ю.О. Семенова, *Вестник технологического университета*, **21**, 12, 109-112 (2018).
5. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, С.В. Данг, Э.И. Салахова, *Вестник технологического университета*, **21**, 11, 75-79 (2018).
6. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, В.Л. Нгуен, *Вестник технологического университета*, **20**, 15, 78-80 (2017).

7. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.И. Поляков, *Вестник Казанского технологического университета*, **21**, 11, 66-69 (2018).

8. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Ву Линь Нгуен, *Вестник технологического университета*, **10**, 1(37), 74-81 (2018).

© **В. Э. Зинуров** – магистрант ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd_93@mail.ru, **А. В. Дмитриев** – д.т.н., доцент, зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com, **О. В. Соловьева** - к. ф.-м. н., доцент кафедры ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», rara_avis86@mail.ru, **Д. Н. Латыпов** - к.т.н., доцент, зав. кафедрой ПАХТ НХТИ (филиала) ФГБОУ ВО «КНИТУ», dlatypov@yandex.ru.

© **V. E. Zinurov** – graduate student, KSPEU, vadd_93@mail.ru, **A. V. Dmitriev** – doctor of technical sciences, associate professor, the head of «Theoretical Bases of Heat Engineering» chair, KSPEU, ieremiada@gmail.com, **O.V. Solovjova** - candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of «Theoretical Bases of Heat Engineering» chair, KSPEU, rara_avis86@mail.ru, **D. N. Latypov** - candidate of Technical Sciences, associate professor, head of the Department processes and devices of Chemical Technology Nizhnekamsk Chemical Technology Institute of KNRTU, dlatypov@yandex.ru.