

УДК 66.074.2

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

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПЫЛЕОЧИСТИТЕЛЬНОГО СЕПАРАТОРА МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛЬЮ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАТРАТЫ В ХОДЕ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ключевые слова: пылеуловитель, циклон, мелкодисперсные частицы, гидравлическое сопротивление, потери давления, энергетические затраты.

В статье рассмотрен вопрос понижения энергетических затрат при эксплуатации разработанного пылеочистительного устройства – сепаратора. основными элементами сепаратора являются дугообразные элементы, по мере их забивки пылью изменяется геометрическая форма элементов, приводящая к изменению структуры потока, который в свою очередь может существенно влиять на энергетические затраты, вследствие изменения потери давления в устройстве. С одной стороны, изменение структуры потока может привести к образованию различных дополнительных завихрений, вызванных местными сопротивлениями – наростами пыли на внешних и внутренних поверхностях дугообразных элементов, с другой стороны, наросты пыли могут уменьшить потери давления, организовав более плавное течение, относительно протекания процесса пылеочистки при очищенных дугообразных элементах, запыленного потока внутри сепаратора при неизменной или возросшей эффективности очистки газа от мелкодисперсных частиц. Известно, что в фильтрах тонкой очистки, определенная толщина слоя пыли увеличивает эффективность очистки газа от мелкодисперсных и тонкодисперсных частиц. Поэтому, целью данной работы являлось исследование влияния забивки дугообразных элементов мелкодисперсной пылью в процессе эксплуатации устройства на изменение гидравлического сопротивления сепаратора. Данное исследование проводилось путем численного моделирования в программном комплексе ANSYS Fluent. Для этого была построена трехмерная модель сепаратора и задавались граничные условия. Вследствие того, что дугообразные элементы имеют неизменяющуюся геометрическую форму по высоте и элементы по ширине устройства расположены относительно друг друга с одинаковым шагом, для упрощения расчетов исследовалась двухмерная периодическая область. Результаты проведенных исследований показали, что По мере забивки дугообразных элементов мелкодисперсной пылью происходит уменьшение гидравлического сопротивления сепаратора, что является положительным фактором, способствующим снижению энергетических затрат на предприятии. Уменьшение гидравлического сопротивления обусловлено исключением обратных течений газового потока в сепараторе. Основными параметрами, влияющими на энергетическую эффективность сепаратора, являются степень забивки дугообразных элементов, входная скорость газового потока и эффективность очистки газового потока.

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

IMPACT OF POLLUTING A DUST SEPARATOR WITH FINE DUST UPON THE ENERGY CONSUMPTION DURING ITS OPERATION

Keywords: dust collector, cyclone, fine particles, hydraulic resistance, pressure losses, energy consumption.

This paper deals with the issue of reducing energy consumption when operating the developed dust collector/separator developed. The main components of the separator are arc-like elements. As they are clogged with dust, their geometry changes, which leads to changing the flow structure. The latter one, in turn, can considerably affect energy consumption due to changes in the pressure losses in the device. On the one hand, changes in the flow structure may lead to forming various additional vortices caused by local resistances; on the other hand, dust deposits on the external and internal surfaces of arc-like elements may reduce pressure losses by having arranged a smoother flow regarding the dust-cleaning process running at cleaned arc-like elements, the dusted flow inside the separator at the unchanged or increased efficiency of cleaning the gas of fine particles. It is known that, in fine cleaning filters, a certain thickness of the dust layer increases the efficiency of cleaning the gas of fine and fine-dispersed particles. Therefore, this study is aimed at investigating how clogging the arc-like elements with fine dust in operating the device affects changes in the hydraulic resistance of the separator. The study was performed by numerically simulating using the ANSYS Fluent software suite. For this purpose, we built a three-dimensional model of the separator and defined boundary conditions. Since the arc-like elements have an unchanging geometry by the height and elements by the width of the device are arranged with the identical step relative to each other. To facilitate our computations, we studied the two-dimensional periodic area. The results of our studies have shown that, as the arc-like elements are clogged with fine dust, the hydraulic resistance of the separator decreases, which is a positive factor promoting the reduction of energy consumption at an enterprise. Reducing the hydraulic resistance is determined by excluding reverse flows of the gas flow within the separator. The main parameters that affect the energy efficiency of the separator are the degree of clogging in the arc-like elements, the input gas flow rate, and the efficiency of cleaning the gas flow.

Несмотря на известные недостатки, сухие инерционные пылеуловители очень часто остаются неотъемлемой частью систем очистки газов от взвешенных частиц. Особенно оправдано их применение

в качестве ступеней предварительной очистки газов, например, перед высокоэффективными фильтрами с целью снижения эксплуатационных затрат последних.

Авторами ранее была предложена конструкция инерционного пылеуловителя для пыли с дисперсным составом до 12 мкм. [1-8]. Пылеуловитель эффективно работает в качестве аппарата предварительной очистки газового потока от пыли с хорошей слипаемостью и предназначен для установки перед фильтрами тонкой очистки.

Сепаратор представляет собой простую конструкцию, включающую несколько рядов дугообразных элементов, заключенных в прямоугольный корпус (рис. 1). Запыленный газовый поток входит в устройство через входной патрубок, огибает несколько рядов дугообразных элементов и выходит из сепаратора через выходной патрубок, 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.

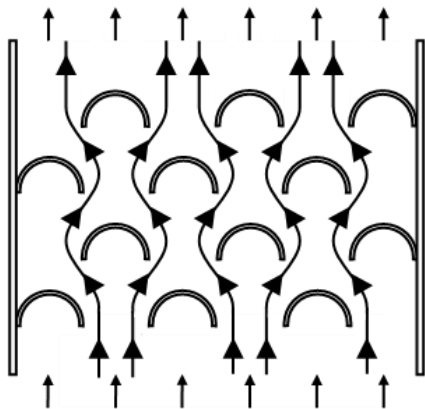


Рис. 1 – Схема движения газа в сепараторе с чистыми рабочими элементами (степень забивки $p=0$)

Через определенные промежутки времени сепаратор забивается мелкодисперсной пылью и очищается. Вследствие того, что основными элементами сепаратора являются дугообразные элементы, по мере их забивки пылью изменяется геометрическая форма элементов, приводящая к изменению структуры потока, который в свою очередь может существенно влиять на энергетические затраты, вследствие изменения потери давления в устройстве. С одной стороны, изменение структуры потока может привести к образованию различных дополнительных завихрений, вызванных местными сопротивлениями – наростами пыли на внешних и внутренних поверхностях дугообразных элементов, с другой стороны, наросты пыли могут уменьшить потери давления, организовав более плавное течение, относительно протекания процесса пылеочистки при очищенных дугообразных элементах, запыленного потока внутри сепаратора при неизменной или возросшей эффективности очистки газа от мелкодисперсных частиц (рис. 2).

Известно, что в фильтрах тонкой очистки, определенная толщина слоя пыли увеличивает эффективность очистки газа от мелкодисперсных и тонкодисперсных частиц. Поэтому определение эксплуатационного промежутка времени сепаратора до его очистки является значимым вопросом. Целью данной работы является исследование влияния забивки дугообразных элементов мелкодисперсной пылью в процессе эксплуатации устройства на изменение гидравлического сопротивления сепаратора.

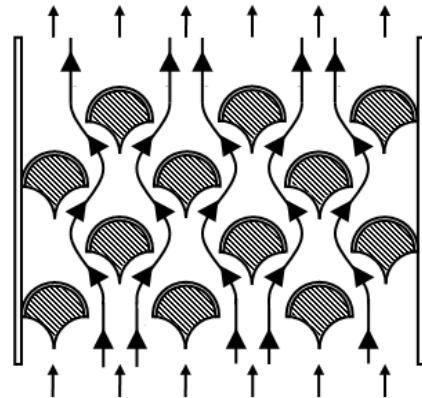


Рис. 2 – Схема движения газа в сепараторе с полностью забитыми рабочими элементами (степень забивки $p=1$)

Данное исследование проводилось путем численного моделирования в программном комплексе ANSYS Fluent. Для этого была построена трехмерная модель сепаратора и задавались граничные условия. Вследствие того, что дугообразные элементы имеют неизменяющуюся геометрическую форму по высоте и элементы по ширине устройства расположены относительно друг друга с одинаковым шагом, для упрощения расчетов исследовалась двумерная периодическая область. Также для упрощения численного моделирования 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. На входе в устройство задавалась входная скорость газового потока, которая изменялась от 1 до 15 м/с. На выходе из устройства задавалось атмосферное давление при нормальных условиях равное 101 325 Па. Также были заданы следующие постоянные параметры: плотность частиц $\rho_a = 1075 \text{ кг/м}^3$; число рядов элементов – 10; число частиц, находящихся в газовом потоке $n = 1000$. На поверхностях дугообразных элементов задавалось условие прилипания, так как производилась очистка запыленного потока от частиц размером менее 12 мкм. Для построения зависимостей часть параметров изменялись: диаметр частиц a от 1 до 12 мкм и степень забивки p дугообразных элементов мелкодисперсной пылью от 0 до 1. Для оценки степени забивки дугообразных элементов были рассмотрены три модели сепаратора: 1) $p = 0$ – элементы полностью очищены (рис. 1); 2) $p = 0,5$ – элементы

забиты на 50 % пылью, для этого внутренняя часть дугообразных элементов полностью закрывалась, т.е. получались полукруги; 3) $p = 1$ – элементы полностью забиты пылью, дугообразные элементы приобретают конусообразную форму (рис. 2). Для получения более обширных сведений влияния забивки дугообразных элементов мелкодисперсной пылью на гидравлическое сопротивление сепаратора производилось масштабирование трех моделей устройства в 2 раза. Стоит отметить, что длина хорды дугообразных элементов b принималась равной 13 мм, при масштабировании – 26 мм. В ходе проведения численного моделирования измерялись давление на входном патрубке, плотность газового потока, кинематическая вязкость газа, эффективность очистки запыленного потока от мелкодисперсных частиц.

Коэффициент гидравлического сопротивления сепаратора вычислялся по следующей формуле:

$$\xi = \Delta P \frac{h}{H} \frac{2}{\rho W_h^2}, \quad (1)$$

где ΔP – потери давления в сепараторе, Па; h – радиус окружностей вокруг элементов, м; H – расстояние между первым и последним рядами дугообразных элементов, м; ρ – плотность газового потока в сепараторе, кг/м³; W_h – скорость газового потока в сужениях между рядами дугообразных элементов, м/с.

Вследствие того, что дугообразные элементы перекрывали 50 % входной площади сепаратора, то для вычисления скорости в сужениях между рядами дугообразных элементов, входная скорость газа умножалась на 2.

Эффективность очистки запыленного газового потока от мелкодисперсных частиц вычислялась по следующему выражению:

$$E = 1 - \frac{n_k}{n}, \quad (2)$$

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

Влияние сил инерции к силам вязкости определялось числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{W_h h}{\nu}, \quad (3)$$

где ν – кинематическая вязкость газового потока, м²/с.

Результаты проведенных исследований представлены в графическом виде на рис. 3-5. По мере забивки дугообразных элементов мелкодисперсной пылью происходит уменьшение гидравлического сопротивления сепаратора, что является положительным фактором, способствующим снижению энергетических затрат на предприятии. Уменьшение гидравлического сопротивления обусловлено исключением обратных течений газового потока в сепараторе. Так при $p = 0$ запыленный поток, входящий в внутреннюю часть дугообразных элементов движется, в большинстве случаев, по внутренней стенке дуги и вылетая из дугообразных элементов навстречу новому потоку газа создает ему дополнительное пре-

пятствие для движения, при $p = 0,5$ запыленный поток частично соприкасается с полукругами, также создавая обратное течение, но уже в меньшей степени, чем при $p = 0$, при $p = 1$ дугообразные элементы приобретают конусообразную форму, при которой газовый поток огибает элементы и движется к выходному патрубку сепаратора, не создавая дополнительных обратных течений. Также было определено, что при росте входной скорости газового потока увеличиваются потери давления в сепараторе. Такое изменение вызвано увеличением кинематической вязкости газа. Следует отметить, что измеряемая плотность газового потока при увеличении входной скорости газа от 1 до 15 м/с изменялась от 1,208 до 1,706 кг/м³.

Росту гидравлического сопротивления сепаратора способствуют малая забитость дугообразных элементов мелкодисперсной пылью и увеличение числа Рейнольдса. Анализ формулы (3) показывает, что силы инерции в данном исследовании практически всегда оказывают намного большее влияние, чем силы вязкости, при постепенных ростах скорости в сужениях между рядами дугообразных элементов и кинематической вязкости газа. Наиболее интенсивный рост коэффициента гидравлического сопротивления наблюдался при степени забивки дугообразных элементов $p = 0$ при увеличении числа Рейнольдса в диапазоне от 0 до 79 000. Следует отметить, что скорость увеличения гидравлического сопротивления при степени забивки $p = 0,5$ больше, чем при $p = 1$. Так, при значении числа Рейнольдса 66 900 коэффициент гидравлического сопротивления при $p = 1$ сравнивается с коэффициентом при степени забивки $p = 0,5$, что указывает об увеличении значения сил вязкости по мере забивания дугообразных элементов мелкодисперсной пылью (рис. 3).

Наиболее полно картину уменьшения гидравлического сопротивления сепаратора по мере забивки дугообразных элементов пылью иллюстрирует рисунок 4, на котором представлен осредненный коэффициент гидравлического сопротивления, который определялся как среднее арифметическое среди всех коэффициентов по отдельности для степени забивки 0, 0,5 и 1. Осредненный коэффициент гидравлического сопротивления уменьшался на 33,5 и 4,9 % при увеличении степени забивки дугообразных элементов пылью p с 0 до 0,5 и с 0,5 до 1 соответственно. Стоит отметить, что практически равные максимальное и минимальное значения коэффициентов гидравлических сопротивлений при $p = 0,5$ и $p = 1$ указывают о минимизации обратных течений газового потока по мере забивки элементов пылью (рис. 4).

На рисунке 5 представлена зависимость энергетической эффективности сепаратора от степени забивки дугообразных элементов. Чем больше значение комплекса $E/\Delta P$, тем эффективнее с энергетической точки зрения сепаратор.

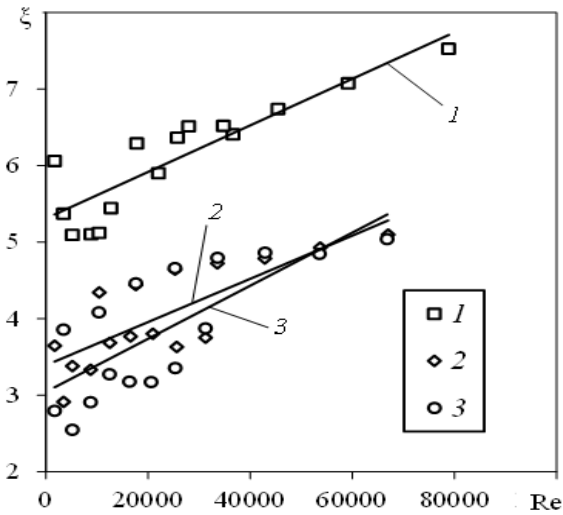


Рис. 3 – Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса Re при различных значениях забивки дугообразных элементов мелкодисперсной пылью, p : 1 - 0; 2 - 0,5; 3 - 1

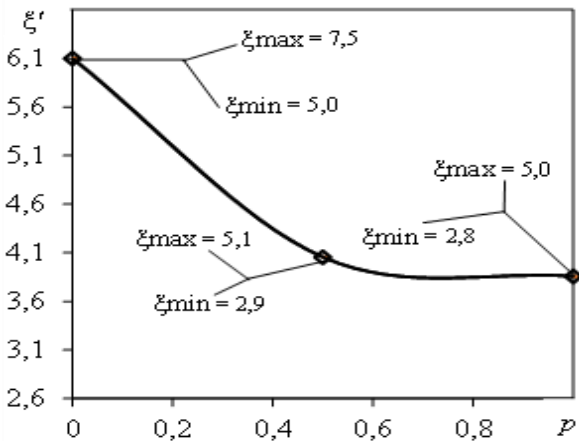


Рис. 4 – Зависимость осредненного коэффициента гидравлического сопротивления от степени забивки дугообразных элементов мелкодисперсной пылью

Следует отметить, что с данной точки зрения сепаратор наиболее эффективен при нулевой степени забивки дугообразных элементов. Хотя, значения комплексов $E/\Delta P$ при $b = 13$ и 26 мм при скорости 3 м/с намного больше, чем при скоростях 11 и 15 м/с необходимо понимать, что организация скорости газового потока 3 м/с очень затруднительна, так как это существенно замедлит очистительный производственный процесс. Таким образом, увеличение входной скорости газового потока уменьшает энергетическую эффективность сепаратора, в большей степени это вызвано увеличением потери давления в сепараторе по мере роста входной скорости газа. Масштабирование сепаратора, в частности увеличение дугообразных элементов практически не сказывается на энергетической эффективности сепаратора при входных скоростях газового потока более 11 м/с (рис. 5).

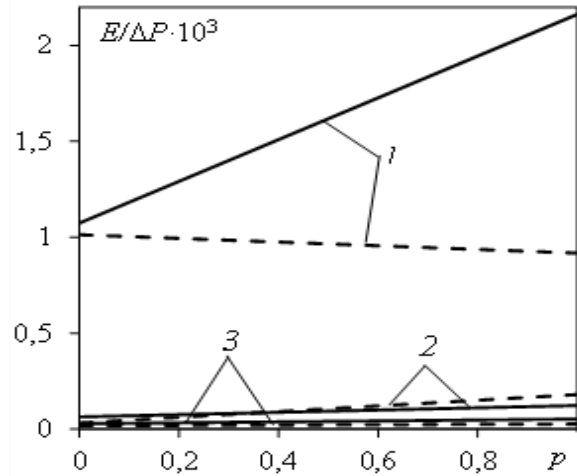


Рис. 5 – Зависимость комплекса $E/\Delta P$ от степени забивки дугообразных элементов мелкодисперсной пылью при различных значениях входной скорости газового потока W , м/с: 1 - 3; 2 - 11; 3 - 15. Линии – $b = 13$ мм; штрих - пунктирные линии – $b = 26$ мм

Проведенные исследования показали, что не стоит производить очистку сепаратора от мелкодисперсной пыли раньше времени, так как забивка дугообразных элементов способствует уменьшению гидравлического сопротивления сепаратора. Для повышения энергетической эффективности сепаратора необходимо создавать минимально возможную входную скорость газового потока. Однако, необходимо учитывать, что энергетическая эффективность также зависит от эффективности очистки газового потока, которая увеличивается при повышении входной скорости газового потока, вследствие увеличения влияния центробежной силы на запыленный поток. Поэтому необходимо рационально подходить к подбору оптимальной входной скорости газового потока.

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

Литература

1. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.И. Поляков, *Вестник технологического университета*, **21**, 11, 66-69 (2018).
2. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Ву Линь Нгуен, *Вестник технологического университета*, **10**, 1(37), 74-81 (2018).
3. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, С.В. Данг, Э.И. Салахова, *Вестник технологического университета*, **21**, 11, 75-79 (2018).
4. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, В.Л. Нгуен, *Вестник технологического университета*, **20**, 15, 78-80 (2017).
5. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Нгуен Ву Линь, *Вестник Иркутского государственного технического университета*, **22**, 3(134), 138-144 (2018).
6. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.А. Галиев, *Вестник технологического университета*, **21**, 9, 58-61 (2018).

7. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Нгуен Ву Линь, *Вестник Иркутского государственного технического университета*, **22**, 3(134), 138-144 (2018).

8. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Ю.О. Семенова, *Вестник технологического университета*, **21**, 12, 109-112 (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.