

ОЧИСТКА ГАЗА ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ С ДУГООБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

¹Э.И. Салахова, ²В.Э. Зинуров, ²А.В. Дмитриев, ¹О.С. Дмитриева, ²А.А. Абдуллина

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет,

²Казанский государственный энергетический университет

Для решения проблемы очистки газов предложено новое пылеулавливающее устройство с дугообразными элементами. Отмечена особенность устройства, заключающаяся в возможности изменения проходного сечения на входе в него за счет варьирования числа рядов дугообразных элементов и их высоты, что позволяет подбирать входную скорость газа, при которой эффективность сепарации максимальная. Представлены результаты численного моделирования процесса улавливания твердых частиц из газа при различных конструктивных решениях и технологических параметрах работы установки. Установлено, что высокая эффективность устройства с дугообразными элементами при низком перепаде давления (не более 380 Па) достигается за счет создания упорядоченной волнообразной структуры газопылевого потока, на основе которой возникают центробежные силы высоких значений при относительно низких скоростях газа на входе (0,25–2 м/с). Сделан вывод об оптимальной конструкции устройства, имеющего высоту дугообразных элементов 250 мм и количество их рядов 12 шт.

Ключевые слова: пылеулавливающее устройство, дугообразные элементы, эффективность сепарации, перепад давления

Статья поступила в редакцию 27.04.2023, доработана 05.07.2023, принята к публикации 02.09.2023

Gas Cleaning with Dust Collection Device with Arc-Shaped Elements

¹E.I. Salakhova, ²V.E. Zinurov, ²A.V. Dmitriev, ¹O.S. Dmitrieva, ²A.A. Abdullina

¹Kazan National Research Technological University, 420015 Kazan, Russia,

²Kazan State Power Engineering University, 420066 Kazan, Russia

To solve the issue of gas purification, a new dust collecting device with arc-shaped elements has been proposed. A feature of the device is noted, which consists in the capability of changing the flow area at its inlet by varying the number of rows of arc-shaped elements and their height, which makes it possible to select the inlet gas velocity at which the separation efficiency is maximum. The results of numerical modeling of the process of capturing solid particles from gas for various design solutions and process parameters of the unit are presented. It has been found that the high efficiency of a device with arc-shaped elements at a low pressure drop (no more than 380 Pa) is achieved by creating an arranged wave-like structure of the gas and dust flow, on the basis of which the centrifugal forces of high values arise at relatively low gas velocities at the inlet (0.25–2 m/s). A conclusion was made on the optimal design of the device, which has a height of arc-shaped elements of 250 mm and the number of their rows is 12 pcs.

Keywords: dust collecting device, arc-shaped elements, separation efficiency, pressure drop

Received 27.04.2023, revised 05.07.2023, accepted for publication 02.09.2023

DOI: 10.18412/1816-0395-2024-2-12-18

Твердые частицы образуются в различных технологических процессах химической, нефтехимической промышленности, энергетики и пр., попадают в атмосферу в виде газовых выбросов, оказывают вредное воздействие на организм человека, приводят к опасному загрязнению окружающей среды, сокращают срок службы оборудования и увеличивают расходы на техническое обслуживание [1]. В этой связи удаление твердых взвешенных частиц из газовых

сред имеет большое значение для повышения энергетической и экологической эффективности производства. При выборе способа и метода очистки следует выявить особенности и границы применимости, связанные, прежде всего, с размерами частиц [2]. Причем в зависимости от особенностей функционирования производственного оборудования, температуры и состава среды использование некоторых систем пылеудаления ограничено. Требуемая очистка запылен-

ных газов в сложных условиях эксплуатации с помощью традиционных пылеулавливающих устройств, например тканевых и волокнистых фильтров, циклонов, электрофильтров, часто затруднительна, сопряжена с серьезными экономическими затратами, высоким перепадом давления и значительным износом рабочих поверхностей оборудования [3–6]. Многие технологические процессы требуют многоступенчатой системы газоочистки от взвешенных ча-

стиц, что усложняет ее обслуживание [7]. При этом среди универсальных аппаратов все же можно выделить скрубберы и циклоны [8, 9]. Проблема очистки газов усугубляется высокой концентрацией взвешенных загрязняющих веществ в атмосфере, поэтому исследования по разработке новых высокоэффективных устройств очистки промышленных газов от твердых частиц не теряют своей актуальности.

Для решения проблемы было разработано новое пылеулавливающее устройство (рис. 1), в корпусе 1 которого размещено несколько рядов дугообразных элементов 3 в шахматном порядке, обращенных вогнутой стороной навстречу газовому потоку. Газопылевой поток попадает в устройство через входной патрубок 2, набегая на элементы 3.

Вследствие этого структура газопылевого потока при течении внутри сепарационного устройства приобретает волнообразный вид (рис. 2), при огибании газом каждого дугообразного элемента 3 возникают центробежные силы, под действием которых частицы выбиваются из структуры потока и задерживаются дугообразными элементами. Также характерно образование небольших застойных зон в виде циркулирующих завихрений (см. рис. 2), наиболее ярко выраженные располагаются внутри дугообразных элементов 3, а непосредственно за ними формируются зоны меньших размеров [10, 11]. Таким образом, при сепарации частиц из газопылевого потока они отлетают к дугообразным элементам 3, ударяются о них и отскакивают. Как правило, после этого частицы попадают в область застойных зон (см. рис. 2), по которым постепенно направляются в бункер устройства 5 (на рис. 1 изображен в урезанном виде). Стоит отметить, что некоторая часть частиц после отскока от дугообразных элементов 3 попадает повторно в структуру потока и уносится

далее им, однако множество сепарационных рядов дугообразных элементов 3, расположенных друг за другом, сводит количество таких возвратов к минимуму. Помимо центробежных сил на сепарацию частиц из газопылевого потока в устройстве оказывают влияние гравитационные и инерционные силы. Очевидно, что наиболее эффективно они действуют на средне- и крупнодисперсные частицы. Для мелкодисперсных частиц размером до 20 мкм преобладающим фактором их сепарации из газопылевого потока выступают центробежные силы. С целью предотвращения уноса частиц газом в процессе их седиментации в бункер 5 в нижнюю часть устройства установлена сепарационная решетка 4 из продольных и поперечных пластин по отношению к направлению потока. Также решетка 4 служит каркасом крепления дугообразных элементов 3, в частности они вставляются в нее при монтаже. Очищенный газ покидает устройство через выходной патрубок 6 (см. рис. 1).

Отличительная особенность данного устройства в сравнении с циклонными сепараторами заключается в формировании более высоких центробежных сил, позволяющих эффективнее проводить сепарацию мелкодисперсных частиц из газопылевого потока, так как при огибании газом каждого дугообразного элемента 3 (см. рис. 1) радиус поворота относительно мал. Также в отличие от циклонных сепараторов в пылеулавливающем устройстве

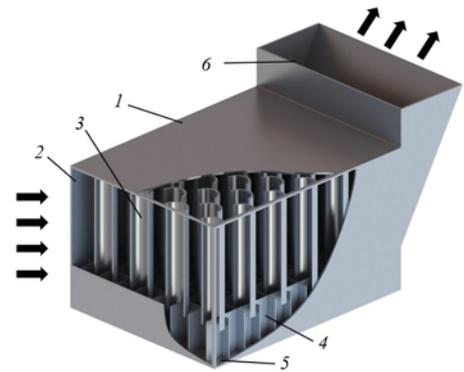


Рис. 1. Трехмерная модель пылеулавливающего устройства (вид с разрезом):
1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – дугообразные элементы; 4 – сепарационная решетка; 5 – бункер; 6 – выходной патрубок

Fig. 1. Three-dimensional model of the dust collecting device (sectional view):
1 – housing; 2 – inlet pipe; 3 – arc-shaped elements; 4 – separation rate; 5 – bunker; 6 – outlet pipe

достигается меньший абразивный износ стенок [12].

Для образования упорядоченной волнообразной структуры потока с высокими значениями центробежных сил необходимо правильно расположить ряды дугообразных элементов 3 (см. рис. 1) относительно соседних таким образом, чтобы при обтекании газом элементов образовывались полукруглости.

Следует отметить достоинство пылеулавливающего устройства, состоящее в том, что при его сборке имеется возможность конструктивного подбора наиболее эффективной входной скорости потока для конкретной технологической линии. Таким образом, площадь прямоугольного сечения входного патрубка в сепарационное устройство 2 (см. рис. 1) можно технически увеличить или уменьшить путем изменения числа дугообразных

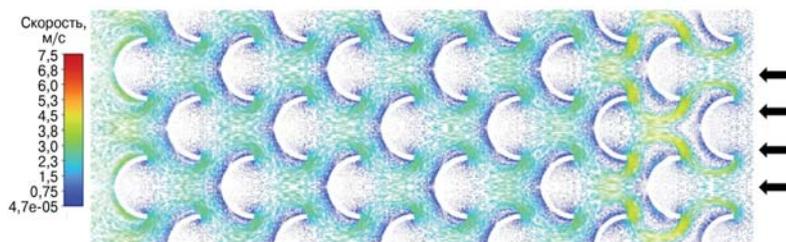


Рис. 2. Структура газопылевого потока внутри пылеулавливающего устройства с дугообразными элементами при условии симметрии

Fig. 2. The structure of the gas and dust flow inside the dust collecting device with arc-shaped elements under the condition of symmetry

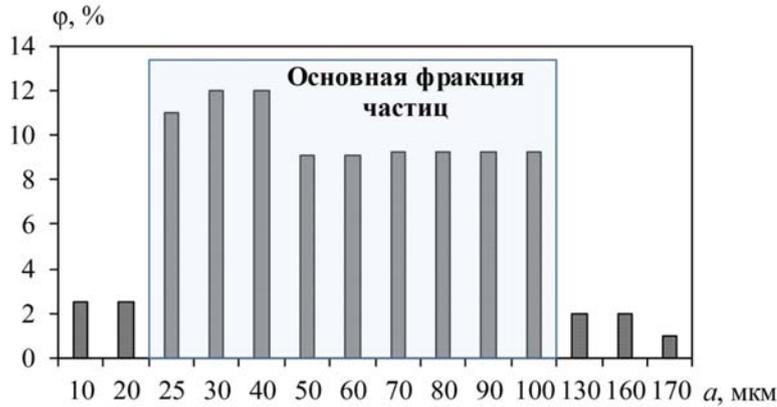


Рис. 3. Процентное распределение частиц дисперсной фазы на входе в пылеулавливающее устройство с дугообразными элементами
Fig. 3. Percentage distribution of particles of the dispersed phase at the inlet to the dust collecting device with arc-shaped elements

элементов 3 или их высоты, т.е. при постоянстве расхода газопылевого потока в технологической линии скорость на входе в сепаратор может быть скорректирована.

Цель работы — определение скорости газопылевого потока на входе в пылеулавливающее устройство, при которой достигается максимальная эффективность сепарации частиц. Исследование проводилось при помощи численного моделирования в программном комплексе Ansys Fluent с применением для описания газодинамики уравнения Навье-Стокса, которое дополнялось

уравнением сплошности среды. При этом для замыкания уравнения Навье-Стокса задействовалась $k-\omega$ SST модель турбулентности, ранее апробированная в работе [12]. Отклонения между результатами численного и физического экспериментов были менее 10 %. Для моделирования частиц применялась Discrete Phase Model (DPM).

Построена трехмерная модель пылеулавливающего устройства со следующими геометрическими размерами: диаметр средней линии дугообразных элементов $d_{ml} = 52,5$ мм, их толщина $\delta = 4,5$ мм, высота и

толщина сепарационной решетки — 250 и 2 мм соответственно. В ходе моделирования изменялась высота дугообразных элементов от 250 до 1000 мм и количество их рядов от 4 до 12 шт., скорость газопылевого потока на входе в устройство W составляла от 0,25 до 7 м/с. Размер частиц пыли a в газопылевом потоке варьировался от 10 до 170 мкм. Плотность частиц ρ_a составляла 3400 кг/м³. Расход частиц G_a изменялся от 3,3 до 39,3 г/с [13]. При численном моделировании в рамках упрощения использовалось условие симметрии, так как по ширине геометрия дугообразных элементов и сепарационной решетки не изменяется. Однако допущением при таком подходе является отсутствие стенок корпуса сепарационного устройства. Количество ячеек составляло около 2 млн шт. При этом установлено, что основная фракция частиц в газопылевом потоке ϕ , %, имеет дисперсность от 25 до 100 мкм (рис. 3).

Процентное распределение частиц дисперсной фазы в сепарационное устройство определялось по формуле:

$$\phi = G_a/G_s \cdot 100\%, \quad (1)$$

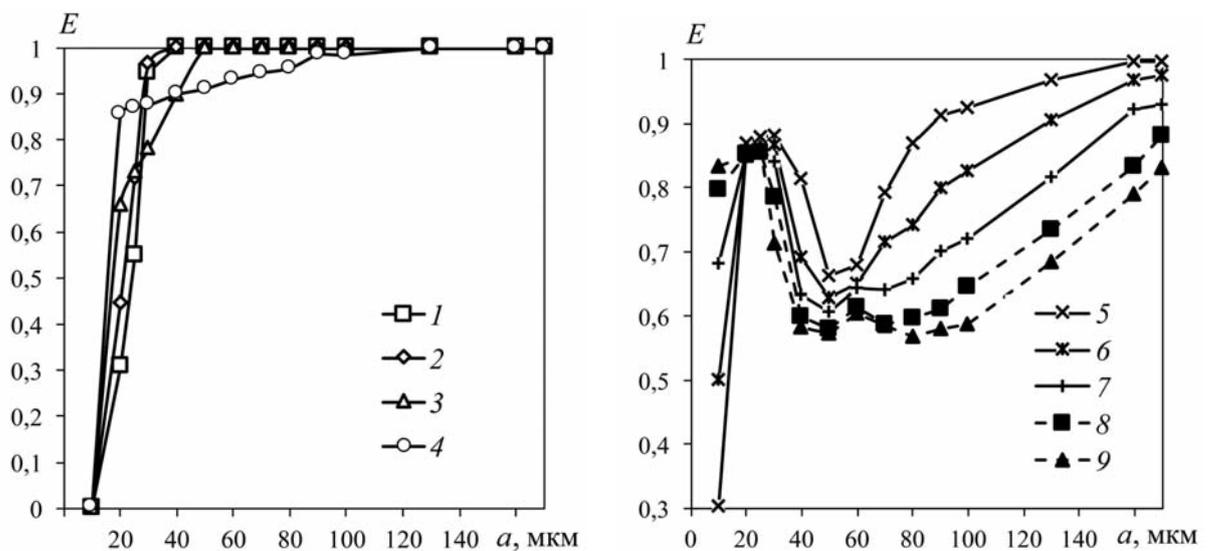


Рис. 4. Зависимость эффективности пылеулавливающего устройства E с дугообразными элементами ($h = 250$ мм, $N = 12$ шт.) от диаметра частиц a при различной входной скорости газа W , м/с:
 1 – 0,25; 2 – 0,5; 3 – 1; 4 – 2; 5 – 3; 6 – 4; 7 – 5; 8 – 6; 9 – 7

Fig. 4. Dependence of the efficiency of the dust collecting device E with arc-shaped elements ($h = 250$ mm, $N = 12$ pcs.) on the particle diameter a at different inlet gas velocity W , m/s:
 1 – 0.25; 2 – 0.5; 3 – 1; 4 – 2; 5 – 3; 6 – 4; 7 – 5; 8 – 6; 9 – 7

где G_o — массовый расход частиц определенного размера, г/с; G_{Σ} — суммарный массовый расход частиц от 10 до 170 мкм, г/с.

Эффективность работы пылеулавливающего устройства с дугообразными элементами

$$E = 1 - G_{out}/G_{in}, \quad (2)$$

где G_{out} , G_{in} — массовый расход частиц на выходе и входе пылеулавливающего устройства соответственно, г/с.

Перепад давления в пылеулавливающем устройстве с дугообразными элементами можно определить, как:

$$\Delta p = p_{in} - p_{out}, \quad (3)$$

где p_{in} , p_{out} — давление на входе в сепаратор и выходе из него соответственно, Па.

Проведенные исследования показали, что разработанное устройство с дугообразными элементами целесообразно использовать при относительно низких входных скоростях газопылевого потока W от 0,5 до 2 м/с, позволяющих получить высокую эффективность сепарации частиц ($E \geq 71,5\%$) основной фракции размером от 25 до 100 мкм из газа (рис. 4) при умеренном перепаде давления до 380 Па (количество рядов дугообразных элементов N равно 12, а их высота h равна 250 мм).

При этом наиболее оптимальна входная скорость $W = 1$ м/с. Эффективность пылеулавливающего устройства для частиц размером от 20 до 40 мкм составляет от 65,9 до 90,1 %. Для частиц более 40 мкм эффективность близка к 100 %. При входной скорости газа в устройство менее 0,5 м/с и более 2 м/с эффективность сепарации из газа частиц размером от 25 до 100 мкм ухудшается. Это связано с изменением центробежных сил, действующих на частицы, и условием взаимодействия частиц со стенкой [14]. Так, при входной скорости, равной 0,25 м/с, центробежных сил недостаточно для выбивания из газопылевой структуры частиц размером менее 20 мкм. Для частиц больших размеров эффективность сопоставима или ниже, напри-

мер, чем при входной скорости $W = 0,5$ м/с. В случае входной скорости W более 2 м/с большую роль играет условие отражения частиц от поверхностей дугообразных элементов. Под действием центробежных сил частицы выбиваются из потока и отлетают к дугообразным элементам. При этом импульс каждой отдельной частицы достаточно большой, что приводит к вероятности ее отскока от поверхности дугообразного элемента обратно в структурированный волнообразный поток газа. В случае, если частица отскакивает в застойную зону, то она постепенно падает в бункер сепарационного устройства (см. рис. 4).

Можно отметить, что при входной скорости газопылевого потока $W \geq 3$ м/с ее рост приводит к повышению эффективности сепарации частиц размером менее 10 мкм ввиду увеличения значений центробежных сил и снижению эффективности сепарации частиц размером более 10 мкм ввиду хаотичного отражения частиц от дугообразных элементов и их повторного уноса потоком газа. Обратная ситуация по изменению эффективности отмечается при входной скорости $W \leq 2$ м/с. Эффективность сепарации мелких частиц из газа снижается, средне- и крупнодисперсных частиц увеличивается (см. рис. 4). Для мелкодисперсных частиц центробежных сил недостаточно, средне- и крупнодисперсные частицы выбиваются за счет центробежных, инерционных и гравитационных сил. Перепад давления при этом составляет от 5,6 до 4665,6 Па при входной скорости от 1 до 7 м/с (рис. 5).

В ходе исследований получена зависимость перепада давления в устройстве с дугообразными элементами Δp от входной скорости газопылевого потока при условии $h = 250$ мм и $N = 12$ шт. (см. рис. 5):

$$\Delta p = 94,1 W^2. \quad (4)$$

В процессе экспериментов также было установлено влия-

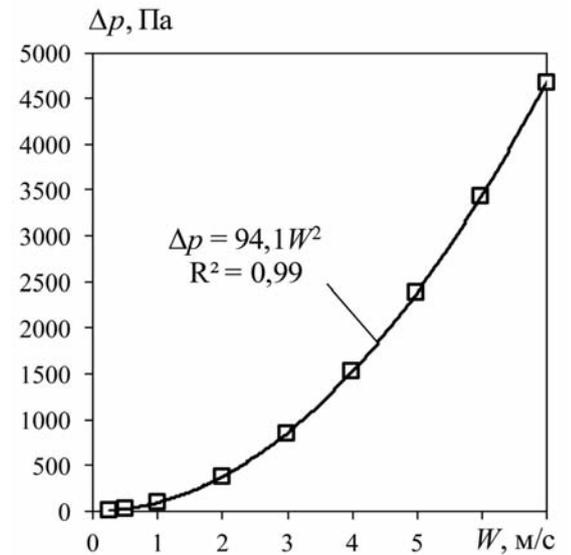


Рис. 5. Зависимость перепада давления Δp в пылеулавливающем устройстве с дугообразными элементами от входной скорости газа W ($h = 250$ мм, $N = 12$ шт.)

Fig. 5. Dependence of pressure drop Δp in a dust collecting device with arc-shaped elements on the inlet gas velocity W ($h = 250$ mm, $N = 12$ pcs.)

ние высоты дугообразных элементов h и количества рядов дугообразных элементов N на эффективность сепаратора (рис. 6) и его перепад давления при входной скорости газопылевого потока $W = 1$ м/с.

Увеличение высоты дугообразных элементов h от 250 до 1000 мм приводит к снижению эффективности сепарации частиц E из газопылевого потока. Это вызвано тем, что часть частиц не успевает осесть в бункере. В частности, подвержены этому частицы, которые находятся в верхней части газопылевого потока на входе в сепарационное устройство. При попадании в застойные зоны, представляющие собой небольшие циркулирующие вихри по высоте дугообразных элементов, существует вероятность вылета из них по мере седиментации в приемный бункер и возврата в структурированный поток. С другой стороны, уменьшать высоту дугообразных элементов до очень маленьких размеров невозможно вследствие конструктивных особенностей изготовления устройства с такими элементами. Поэтому наиболее оптимальным значением высоты

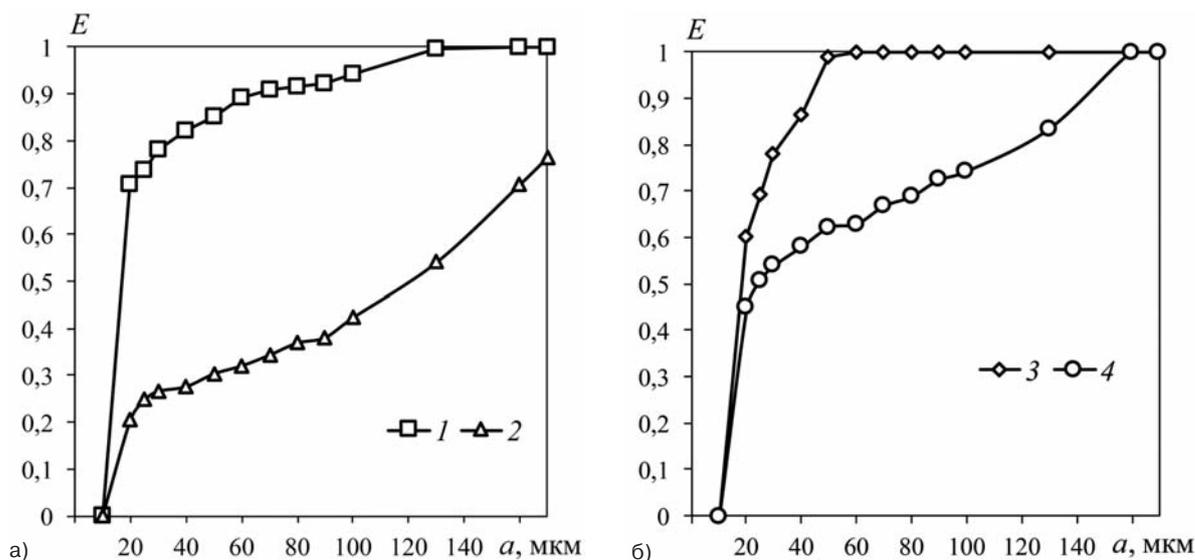


Рис. 6. Зависимость эффективности пылеулавливающего устройства с четырьмя (а) и с восемью (б) рядами дугообразных элементов от диаметра частиц при $W = 1$ м/с и высоте дугообразных элементов h 250 мм (1, 3) и 1000 мм (2, 4)

Fig. 6. Dependence of the efficiency of the dust collecting device with four (a) and eight (b) rows of arc-shaped elements on the particle diameter at the $W = 1$ m/s and height of the arc-shaped elements h 250 mm (1, 3) and 1000 mm (2, 4)

сепарационных элементов h является 250 мм (см. рис. 6). Увеличение числа рядов дугообразных элементов N от 4 до 12 шт. приводит к повышению эффективности сепарации частиц E из газопылевого потока в сепараторе (рис. 6, 7). Для наглядной демонстрации влияния центробежных сил и условий отражения частиц от дугообразных элементов на эффективность устройства данные на графиках (см. рис. 4) представлены в ином виде на рис. 7, иллюстрирующем зависимость эффективности от входной скорости газопылевого потока для частиц определенной дисперсности. Видно, что частицы размером до 10 мкм не улавливаются при скорости менее 2 м/с вследствие малых центробежных сил. При этом с увеличением скорости эффективность возрастает для мелкодисперсных частиц, а для средних и крупнодисперсных падает, так как частицы отпрыгивают от элементов и попадают обратно в движущийся поток газа (см. рис. 7).

Очевидно, что большее число рядов сепарационных элементов приводит к более высокой результативности устройства в целом. Учитывая, что

перепад давления Δp с увеличением числа рядов дугообразных элементов N от 4 до 12 шт. при входной скорости газопылевого потока 1 м/с возрастает незначительно (до 110,9 Па), то оптимальным количеством рядов будем считать 12 штук (рис. 8).

При входной скорости газопылевого потока 1 м/с и количестве рядов дугообразных элементов N от 4 до 12 перепад давления Δp изменяются от 45,5 до 95,4 и от 53,4 до 110,9 при высоте элементов h 250 и 1000 мм соответственно (рис. 8).

При входной скорости газопылевого потока W , равной 0,25; 0,5; 1 и 2 м/с, эффективность пылеулавливающего устройства с дугообразными элементами E близка к 100 % при размере частиц a более 30, 30, 40 и 80 мкм соответственно. При этом эффективность сепарации E частиц размером менее 30 мкм в среднем составляет 54,3; 53,3; 54,4 и 65,1 % при входной скорости W , равной 0,25; 0,5; 1 и 2 м/с соответственно (см. рис. 4).

При скорости газопылевого потока на входе в устройство от 3 до 7 м/с можно выделить три диапазона размеров частиц, для которых характерны

изменения эффективности устройства E : 1) до 30 мкм происходит увеличение эффективности; 2) от 30 до 70 мкм происходит снижение эффективности; 3) более 70 мкм эффективность возрастает. При размере частиц до 30 мкм эффективность сепаратора в среднем составляет 73,4; 77,1; 81,1; 82,2 и 82,4 % при входной скорости, равной 3; 4; 5; 6 и 7 м/с соответственно. Для второго диапазона, который соответствует размерам частиц от 30 до 70 мкм, эффективность сепаратора в среднем составляет 71,8; 65,6; 62,8; 59,8 и 58,7 % при входной скорости, равной 3; 4; 5; 6 и 7 м/с соответственно. Для третьего диапазона частиц размером a более 70 мкм эффективность сепарационного устройства в среднем составляет 92,3; 84,1; 77,1; 69,9 и 66,1 % при входной скорости, равной 3; 4; 5; 6 и 7 м/с соответственно (см. рис. 4).

Эффективность устройства с дугообразными элементами для основной фракции частиц размером от 25 до 100 мкм в среднем составляет 86,3 и 32,6 % при высоте дугообразных элементов h , равной 250 и 1000 мм соответственно, и количестве их рядов $N = 4$. При этом эф-

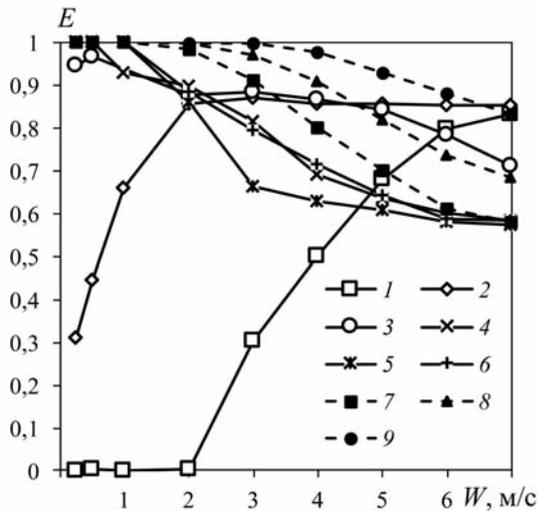


Рис. 7. Зависимость эффективности пылеулавливающего устройства E с дугообразными элементами ($h = 250$ мм, $N = 12$ шт.) от входной скорости газа W , м/с, при различной дисперсности частиц a , мкм:

1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50; 6 – 70; 7 – 90; 8 – 130; 9 – 170

Fig. 7. Dependence of the efficiency of a dust-collecting device with arc-shaped elements ($h = 250$ mm, $N = 12$ pcs.) on the inlet gas velocity W , m/s, at different particle dispersion a , μm :

1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50; 6 – 70; 7 – 90; 8 – 130; 9 – 170

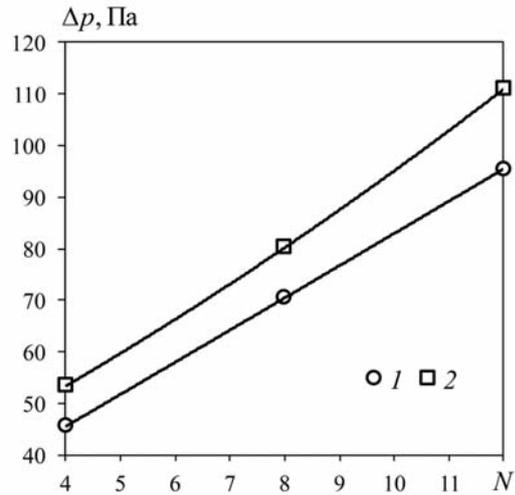


Рис. 8. Зависимость перепада давления в пылеулавливающем устройстве от количества рядов дугообразных элементов N при $W = 1$ м/с и высоте h 250 мм (1) и 1000 мм (2)

Fig. 8. Dependence of the pressure drop in the dust-collecting device on the number of rows of arcuate elements N at $W = 1$ m/s and their heights h 250 mm (1) and 1000 mm (2)

эффективность сепарации частиц из газопылевого потока близка к 100 % для частиц размером более 100 мкм при высоте дугообразных элементов $h = 250$ мм и количестве их рядов $N = 4$ шт. (см. рис. 6, а).

С увеличением количества рядов дугообразных элементов до 8 штук эффективность сепаратора с дугообразными элементами составляет в среднем 92,5 и 63,4 % при высоте дугообразных элементов h , равной 250 и 1000 мм соответственно. При этом эффективность сепарации частиц из газопылевого потока близка к 100 % для частиц размером более 50 и 130 мкм при высоте дугообразных элементов, равной 250 и 1000 мм соответственно, и количестве их рядов $N = 8$ шт. (см. рис. 6, б).

Стоит отметить, что при числе рядов дугообразных элементов $N = 12$ шт. и их высоте 250 мм эффективность сепаратора для основной фракции частиц размером от 25 до 100 мкм составляет в среднем 93,4 % (см. рис. 4).

Таким образом, применение пылеулавливающего устройства с дугообразными элементами может быть рассмотрено

в качестве замены циклонных сепараторов, так как в нем достигается высокая эффективность сепарации частиц размером более 25 мкм при относительно малых входных скоростях газа (менее 2 м/с), что позволяет получить низкий перепад давления в устройстве (до 380 Па). Устойчивая волнообразная структура газопылевого потока внутри устройства, сохраняющаяся при любой входной скорости газопылевого потока в диапазоне 0,25–7 м/с и при любых конструктивных параметрах устройства, таких как высота дугообразных элементов и число их рядов, обеспечивает надежность обеспыливания потока при внезапном изменении режима работы технологической линии или необходимости изменении геометрии устройства.

На основе проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. Высокая эффективность пылеулавливающего устройства с дугообразными элементами при низком перепаде давления достигается за счет создания упорядоченной волнообразной структуры газопылевого потока, на основе которой воз-

никают центробежные силы высоких значений, при относительно низких входных скоростях газа.

2. Поле центробежных сил высоких значений в пылеулавливающем устройстве достигается за счет малого радиуса поворота газопылевого потока, который периодически повторяется по мере движения газа.

3. Повышению эффективности пылеулавливающего устройства способствует уменьшение высоты дугообразных элементов, увеличение количества рядов элементов и достижение определенных скоростей газопылевого потока на входе в устройство.

4. Максимальная эффективность сепарации частиц из газопылевого потока достигается при его входной скорости в диапазоне 0,25–2 м/с, высоте дугообразных элементов 250 мм и количестве их рядов 12 шт. При этом наиболее оптимальная входная скорость газопылевого потока 1 м/с.

5. Перепад давления в пылеулавливающем устройстве с дугообразными элементами составляет не более 380 Па при входной скорости газопылевого потока до 2 м/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-3577.2022.1.

The work was carried out with the financial support of the scholarship of the President of the Russian Federation to young scientists and postgraduates SP-3577.2022.1.

Литература

1. Kok J.F., Storelmo T., Karydis V.A., Adebisi A.A., Mahowald N.M., Evan A.T., He C., Leung D.M. Mineral dust aerosol impacts on global climate and climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023. Vol. 4. P. 71–86.
2. Буренин В.В. Очистка выбросов предприятий нефтегазового комплекса. *Neftegaz.RU*. 2019. № 4. С. 108–115.
3. Самохвалов Н.М., Виноградов В.В. Очистка газа от пыли щелевым фильтром. *Экология и промышленность России*. 2022. Т. 26. № 6. С. 10–15.
4. Heidenreich S. Hot gas filtration – a review. *Fuel*. 2013. Vol. 104. P. 83–94.
5. Huang A.-N., Ito K., Fukasawa T., Yoshida H., Kuo H.-P., Fukui K. Classification performance analysis of a novel cyclone with a slit on the conical part by CFD simulation. *Separation and Purification Technology*. 2018. Vol. 190. P. 25–32.
6. Xiao G., Wang X., Yang G., Ni M., Gao X., Cen K. An experimental investigation of electrostatic precipitation in a wire-cylinder configuration at high temperatures. *Powder Technology*. 2015. Vol. 269. P. 166–177.
7. Орлов С.М., Дмитроченкова Э.И., Орлова А.Я. Анализ работы циклона как первой ступени очистки газа от пыли. *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2010. № 6 (86). С. 10–15.
8. Иванова В.С., Николенко С.Д., Сазонова С.А., Асминин В.Ф. Физическое моделирование аппарата пылеочистки скруббер Вентури для улучшения условий труда на производствах. *Моделирование систем и процессов*. 2019. Т. 12. № 1. С. 48–55.
9. Бахронов Х.Ш., Ганиева С.У. Ход развития аппаратов для очистки газов от пыли. *Journal of Advances in Engineering Technology*. 2022. № 2. С. 33–38.
10. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. Collecting of finely dispersed particles by means of a separator with the arc-shaped elements. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 126. P. 00007.
11. Zinurov V.E., Kharkov V.V., Salakhova E.I., Vakhitov M.R., Kuznetsov M.G. Numerical simulation of collection efficiency in separator with inclined double-T elements. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. P. 042024.
12. Salakhova E.I., Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Nabiullin I.R., Salakhov I.I. Dust Collector for Paraffin Dehydrogenation Units with a Fluidized Catalyst Bed. *Catalysis in Industry*. 2022. Vol. 14. № 4. P. 369–375.
13. Salakhova E.I., Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Salakhov I.I. Modeling of Erosion in a Cyclone and a Novel Separator with Arc-Shaped Elements. *Processes*. 2023. Vol. 11. № 1. P. 156.
14. Миньков Л.Л., Дик И.Г. Численное моделирование немонотонной сепарационной кривой гидrocиклона. *Инженерно-физический журнал*. 2012. Т. 85. № 6. С. 1214–1222.

References

1. Kok J.F., Storelmo T., Karydis V.A., Adebisi A.A., Mahowald N.M., Evan A.T., He C., Leung D.M. Mineral dust aerosol impacts on global climate and climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023. Vol. 4. P. 71–86.
2. Burenin V.V. Ochistka vybrosov predpriyatii neftegazovogo kompleksa. *Neftegaz.RU*. 2019. № 4. S. 108–115.
3. Samokhvalov N.M., Vinogradov V.V. Ochistka gaza ot pyli shchelevym fil'trom. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2022. T. 26. № 6. S. 10–15.
4. Heidenreich S. Hot gas filtration – a review. *Fuel*. 2013. Vol. 104. P. 83–94.
5. Huang A.-N., Ito K., Fukasawa T., Yoshida H., Kuo H.-P., Fukui K. Classification performance analysis of a novel cyclone with a slit on the conical part by CFD simulation. *Separation and Purification Technology*. 2018. Vol. 190. P. 25–32.
6. Xiao G., Wang X., Yang G., Ni M., Gao X., Cen K. An experimental investigation of electrostatic precipitation in a wire-cylinder configuration at high temperatures. *Powder Technology*. 2015. Vol. 269. P. 166–177.
7. Orlov S.M., Dmitrochenkova E.I., Orlova A.Ya. Analiz raboty tsiklona kak pervoi stupeni ochistki gaza ot pyli. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2010. № 6 (86). S. 10–15.
8. Ivanova V.S., Nikolenko S.D., Sazonova S.A., Asminin V.F. Fizicheskoe modelirovanie apparata pyleochistki skrubber Venturi dlya uluchsheniya uslovii truda na proizvodstvakh. *Modelirovanie sistem i protsessov*. 2019. T. 12. № 1. S. 48–55.
9. Bakhronov Kh.Sh., Ganieva S.U. Khod razvitiya apparatov dlya ochistki gazov ot pyli. *Journal of Advances in Engineering Technology*. 2022. № 2. S. 33–38.
10. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. Collecting of finely dispersed particles by means of a separator with the arc-shaped elements. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 126. P. 00007.
11. Zinurov V.E., Kharkov V.V., Salakhova E.I., Vakhitov M.R., Kuznetsov M.G. Numerical simulation of collection efficiency in separator with inclined double-T elements. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. P. 042024.
12. Salakhova E.I., Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Nabiullin I.R., Salakhov I.I. Dust Collector for Paraffin Dehydrogenation Units with a Fluidized Catalyst Bed. *Catalysis in Industry*. 2022. Vol. 14. № 4. P. 369–375.
13. Salakhova E.I., Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Salakhov I.I. Modeling of Erosion in a Cyclone and a Novel Separator with Arc-Shaped Elements. *Processes*. 2023. Vol. 11. № 1. P. 156.
14. Min'kov L.L., Dik I.G. Chislennoe modelirovanie nemonotonnoi separatsionnoi krivoi gidrotsiklona. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2012. T. 85. № 6. S. 1214–1222.

Э.И. Салахова – ст. преподаватель, Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), e-mail: salakhova.elmira@gmail.com • В.Э. Зинуров – ассистент, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), e-mail: vadd_93@mail.ru • А.В. Дмитриев – д-р техн. наук, зав. кафедрой, КГЭУ, e-mail: ieremiada@gmail.com • О.С. Дмитриева – канд. техн. наук, доцент, КНИТУ, e-mail: ja_deva@mail.ru • А.А. Абдуллина – студент, КГЭУ, e-mail: azalkaabdullina69826@gmail.com

E.I. Salakhova – Senior lecturer, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: salakhova.elmira@gmail.com • V.E. Zinurov – Assistant, Kazan State Power Engineering University (KSPEU), e-mail: vadd_93@mail.ru • A.V. Dmitriev – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department, KSPEU, e-mail: ieremiada@gmail.com • O.S. Dmitrieva – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, KNRTU, e-mail: ja_deva@mail.ru • A.A. Abdullina – Student, KSPEU, e-mail: azalkaabdullina69826@gmail.com