

*В.Э. Зинуров, Р.Я. Биккулов, А.В. Дмитриев, д-р техн. наук (Казанский государственный энергетический университет, Россия);  
О.С. Дмитриева, канд. техн. наук (Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия) E-mail: ieremiada@gmail.com*

## Расчет эффективности улавливания мелкодисперсных частиц сепарационным устройством с каналами квадратного сечения\*

Для очистки газообразных выбросов промышленных предприятий [1] применяются механический, электрический и физико-химический способы очистки газа. Выбор способа и метода очистки осуществляется с учетом особенностей и границ применимости этих способов, а также множества факторов, влияющих на степень очистки (в том числе связанных с размерами частиц).

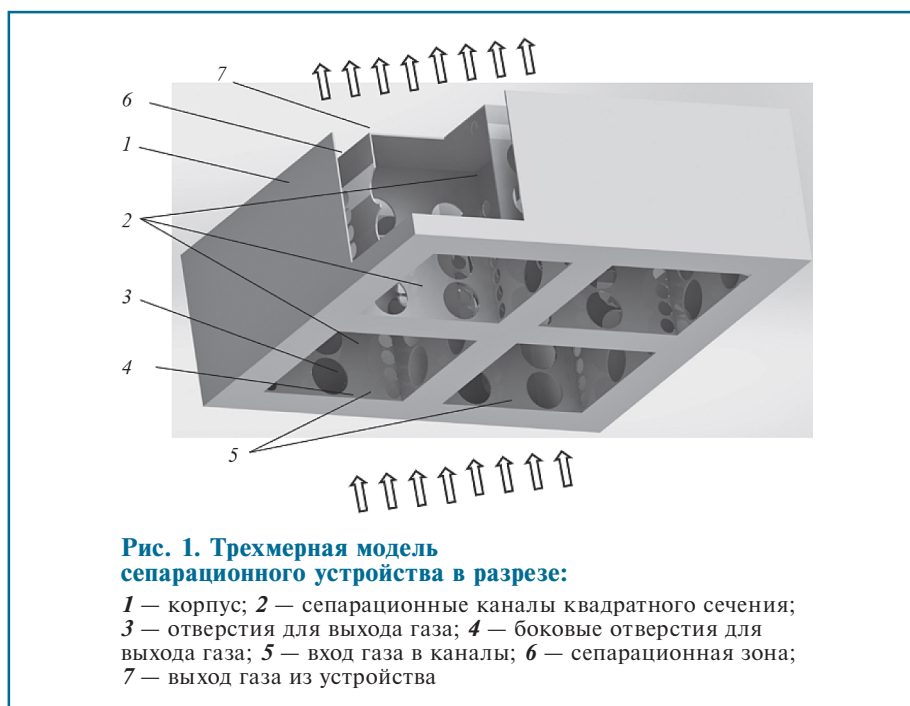
Традиционное оборудование для удаления дисперсных частиц из газовых потоков можно объединить в четыре основные категории: гравитационные пылеуловители; электростатические пылеуловители; рукавные фильтры; циклонные сепараторы. Однако возможности применения многих систем пылеулавливания ограничены особенностями функционирования оборудования, температурой и составом отходящих газов производства [2–4]. Наиболее универсальными и надежными пылеуловителями, работоспособными в сложных условиях эксплуатации без длительного технического обслуживания, являются циклоны [5]. Однако циклонам характерны существенные ограничения по скорости потока, пропускной способности, размеру улавливаемых частиц (от 10 мкм). При повышении мощности циклонных установок (увеличением их размеров) снижается эффективность пылеулавливания и повышается перепад давления [6].

Предлагается новая конструкция сепарационного устройства (рис. 1), разработанная с учетом повышения эффективности отделения частиц размерами до 10 мкм.

В корпусе 1 устройства (см. рис. 1) выполнены четыре квадратных отверстия, образующих сепарационные каналы 2 с чередующимися рядами круглых отверстий 3, 4. При этом диаметр отверстий 3 (расположенных ближе к центральной части стенки канала) — больше диаметра боковых отверстий 4 (расположенных по углам канала). Область, образованная внутренними стенками корпуса устройства 1 и стенками сепарационных каналов 2, является сепарационной зоной 6 устройства, в которой образуется множество вихрей (при выходе газа из отверстий 3 и 4), при этом формирующейся вихревой структурой потоков газа обеспечивается сепарация мелкодисперсных частиц из газового потока.

Принцип действия предлагаемого устройства. Отработанный газовый поток на очистку поступает в устройство через сепарационные каналы 2. Данный поток постепенно отклоняется от прямолинейного движения в сторону отверстий 3 (при прохождении отверстий 3 поток ориентируется перпендикулярно исходному направлению). При этом меньшая часть потока направляется к боковым отверстиям 4, что позволяет исключить образование застойных зон в угловых областях сепарационных каналов 2; таким образом, в данных областях обратные потоки не формируются, и газ уносится в сепарационную зону

рация мелкодисперсных частиц из газового потока.



**Рис. 1. Трехмерная модель сепарационного устройства в разрезе:**

1 — корпус; 2 — сепарационные каналы квадратного сечения; 3 — отверстия для выхода газа; 4 — боковые отверстия для выхода газа; 5 — вход газа в каналы; 6 — сепарационная зона; 7 — выход газа из устройства

\*Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП — 3577.2022.1.

устройства 6. В отверстиях 3 и 4 (вследствие сужения проходного сечения) образуются струи газа с повышенными скоростями. Так, при выходе газа из круглых отверстий 3 каждая струя газа делится на два равных потока, каждый из которых постепенно отклоняется в ближайшую сторону — правую или левую, т.е. газ завихряется по всей высоте сепарационной зоны устройства 6. При вращении отработанного газового потока с диспергированными в нем мелкодисперсными частицами в сепарационной зоне 6 возникают значительные центробежные силы, под действием которых частицы отбрасываются из завихренной структуры к внутренним стенкам корпуса устройства 1, отражаются от них или попадают в «мертвые» (застойные) зоны между двумя соседними вихрями, и в результате оседают на внутренней поверхности корпуса устройства 1. Боковые круглые отверстия 4 предназначены для поддержания вихревой структуры газа в области сепарационной зоны, находящейся на границе контакта соседних сепарационных каналов (см. рис. 1).

Особенности устройства: удобная для монтажа компоновка сепарационных каналов квадратного сечения 2 относительно друг друга; возможность изменения расположения отверстий 3, 4 и их диаметров для создания упорядоченной вихревой структуры в сепарационной зоне 6 (с поддержанием вихревой структуры за счет контакта контуров соседних вихрей). При этом возникающие вихри весьма малы (несколько десятков миллиметров в диаметре при рабочих скоростях газа до 10 м/с), что позволяет получить достаточные центробежные силы для сепарации мелкодисперсных частиц размером до 10 мкм из газового потока (в отличие, например, от инерционных аппаратов грубой очистки — циклонов). В зависимости от размеров проходного сечения трубопровода на промышленном объекте (для монтажа предлагаемого сепарационного устройства) размеры устройства могут быть изменены уменьшением или увеличени-

ем числа сепарационных каналов квадратного сечения 2, а также изменением ширины сепарационной зоны 6 (см. рис. 1).

Цель данной работы — разработка методики расчета предлагаемого сепарационного устройства, включающей зависимости между конструктивными и технологическими параметрами, с учетом параметров мелкодисперсных частиц (диаметра и плотности). Такая инженерная методика необходима для прогнозирования эффективности сепарации мелкодисперсных частиц из газового потока для различных вариантов конструкции устройства.

В работе [7] для устройства с аналогичной конструкцией сепарационной зоны предложена зависимость для расчета ориентировочных размеров сепарационной зоны (при обеспечении необходимого времени пребывания частиц в сепарационной зоне) с учетом конструктивных и технологических параметров устройства:

$$z = \frac{9}{16} \frac{\mu_G}{\rho_a W_B} \left( \frac{bA}{a} \right)^2, \quad (1)$$

где  $z$  — высота сепарационной зоны, м;  $\mu_G$  — коэффициент динамической вязкости газа, Па·с;  $\rho_a$  — плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $W_B$  — скорость газа при входе в сепарационные каналы, м/с;  $b$  — ширина канала сепаратора, м;  $A$  — коэффициент крутки;  $a$  — диаметр частиц, м.

При проведении промышленных испытаний было выявлено, что частицы на стенке сепарационной зоны агрегируются и падают в нижнюю часть сепаратора под действием силы тяжести. Это явление благоприятно для эксплуатации устройства, так как способствует увеличению межремонтного ресурса.

Формула (1) получена в предположении, что частица до контакта со стенкой канала проходит расстояние, равное  $b/8$  (в направлении, перпендикулярном основному направлению потока газа). При заданной высоте сепарационной зоны  $z$  часть частиц «не успеет» пройти это расстояние и останется в потоке очищенного газа на выходе сепарационного устройства. В этом случае



Рис. 2. Схема радиального движения частицы от центра вихря к его краю

при прохождении газовым потоком расстояния  $z$  (высоты сепарационной зоны) на стенках устройства будут осаждены только те частицы, которые на уровне прохода запыленного потока через круглые отверстия находились на расстоянии  $b_r$  от стенки (рис. 2).

Преобразовав формулу (1), получим выражение для расчета расстояния  $b_r$ :

$$b_r = \frac{1}{6} \frac{a}{A} \sqrt{\frac{z \rho_a W_B}{\mu_G}}. \quad (2)$$

С учетом изложенного из соотношения площади пристеночной кольцевой области вращения частиц (с расстоянием  $b_r$  от стенки сепарационной зоны) и общей площади вихря (с радиусом  $b/8$ ) определим эффективность сепарации мелкодисперсных частиц из газового потока в устройстве:

$$E = \frac{64b_r(b/4 - b_r)}{b^2}. \quad (3)$$

Преобразуем формулу (3) подстановкой выражений (1) и (2):

$$E = \frac{8}{3} \frac{a}{Ab} \sqrt{\frac{z \rho_a W_B}{\mu_G}} \times \left( 1 - \frac{2}{3} \frac{a}{Ab} \sqrt{\frac{z \rho_a W_B}{\mu_G}} \right). \quad (4)$$

Согласно зависимости (4) при увеличении диаметра частицы значение эффективности  $E$  проходит через максимум и затем начинает снижаться, что не соответствует физическому смыслу процесса сепарирования в данном устройстве. Следовательно, необходимо усло-

вие для учета этой особенности расчетной формулы (4).

При критическом значении диаметра частицы  $a_{кр}$  эффективность сепарации частиц из газового потока равна единице (принято, что частицы размерами больше  $a_{кр}$  полностью сепарируются из очищаемого газового потока):

$$a_{кр} = \frac{3}{4} Ab \sqrt{\frac{\mu_G}{z \rho_a W_B}}. \quad (5)$$

Тогда система уравнений для расчета эффективности сепарации частиц размером  $a$  из газового потока примет вид:

$$\begin{cases} E = \frac{8}{3} \frac{a}{Ab} \sqrt{\frac{z \rho_a W_B}{\mu_G}} \times \\ \times \left( 1 - \frac{2}{3} \frac{a}{Ab} \sqrt{\frac{z \rho_a W_B}{\mu_G}} \right) \text{ при } a < a_{кр}; \\ E = 1 \text{ при } a > a_{кр}. \end{cases} \quad (6)$$

Для анализа расчетных данных введем формулу модифицированного числа Стокса — критерия подобия, отражающего соотношение кинетической энергии взвешенных частиц и энергии их взаимодействия с газом:

$$Stk = \frac{4 \rho_a a^2 W_B}{\mu_G Ab}. \quad (7)$$

Для расчетов по представленной оценочной методике были приняты базовые значения следующих параметров: динамическая вязкость среды  $\mu_G = 0,0000178$  Па·с; ширина сепарационного канала квадратного сечения  $b = 80$  мм; степень крутки  $A = 0,5$ ; плотность частиц  $\rho_a = 2000$  кг/м<sup>3</sup>; входная скорость газового потока  $W_B = 5$  м/с; высота сепарационной зоны  $z = 50$  мм; критическое значение диаметра частицы  $a_{кр} = 5,66$  мкм (получено расчетом по формуле (5) при подстановке базовых значений). При варьировании одного параметра значения остальных параметров были постоянными (базовыми).

По результатам расчетов установлено: эффективность сепарационного устройства повышается с увеличением диаметра частиц  $a$ , высоты сепарационной зоны  $z$ ,

входной скорости газового потока  $W_B$ , ширины квадратных каналов  $b$ .

Очевидно, что при увеличении диаметра частиц их траектории движения за счет сил инерции изменяются (криволинейные линии становятся ближе к касательным, направленным под некоторым углом к внутренней стенке корпуса), однако скорость вращения вихрей при этом не изменяется — следовательно, облегчается выпадение частиц из потока газа (инерционная сила пропорциональна массе частиц, поэтому крупные частицы улавливаются более эффективно).

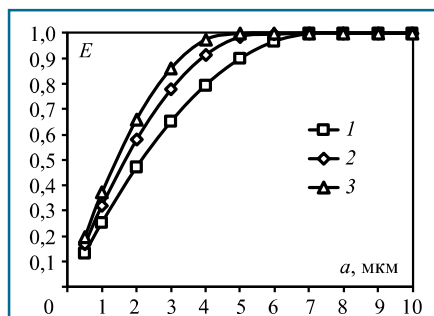
При увеличении высоты сепарационной зоны прямо пропорционально увеличивается время пребывания в ней частиц, следовательно, вероятность осаждения частиц также возрастает. Расчетами установлено, что при улавливании частиц диаметром более 5...6 мкм эффективность устройства с сепарационными каналами квадратного сечения близка к 100 %, при сепарации частиц из газа диаметром 3...5 мкм эффективность устройства — более 60 % (рис. 3).

При увеличении высоты сепарационной зоны  $z$  от 30 до 50 мм эффективность сепарации частиц из газа увеличивается в среднем на 8,2 %, при увеличении  $z$  от 30 до 70 мм — на 12,7 %. Следует отметить, что при заданных условиях моделирования применение сепарационного устройства с каналами квадратного сечения является наи-

более рациональным при улавливании частиц диаметром от 3 мкм, так как при этом обеспечивается высокая эффективность пылеулавливания: так, эффективность сепарации из газа частиц диаметрами 3...7 мкм при высоте сепарационной зоны  $z = 30$  мм составляет 86,2 %, при  $z = 50$  мм — 93,5 %, при  $z = 70$  мм — 96,6 % (см. рис. 3).

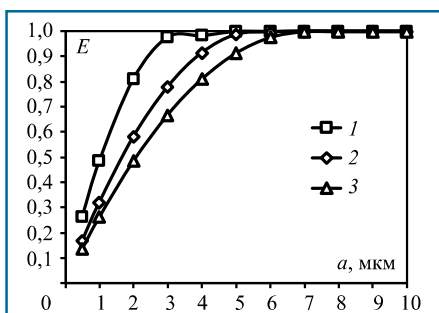
При повышении входной скорости газового потока обеспечивается увеличение центробежных сил в сепарационной зоне устройства, действующих на мелкодисперсные частицы, в результате — повышается эффективность сепарации мелкодисперсных частиц из газового потока. При диаметре частиц более 6 мкм эффективность сепарации практически равна 100 % (в принятых условиях  $a_{кр} = 5,66$  мкм) при этом входная скорость газового потока в исследуемом диапазоне (от 3 до 7 м/с) не влияет на значение эффективности. Изменение скорости газа наиболее существенно влияет на эффективность сепарации частиц диаметрами 2...5 мкм: так, при скорости газа 3 м/с эффективность устройства составила в среднем 70,5 %, при 5 м/с — 81,5 %, при 7 м/с — 87,3 %.

Для компоновки сепарационного устройства в целом особенно важно исследование влияния ширины квадратных каналов на эффективность сепарации частиц из газа (может быть более целесообразным применение большого числа каналов с малым периметром сечения или наоборот — малого числа каналов с относительно большим периметром сечения). При уменьшении ширины сепарационных каналов увеличивается скорость газа внутри устройства и уменьшаются диаметры вихрей в сепарационной зоне, а следовательно — увеличиваются центробежные силы и возрастает эффективность устройства. Расчетами по разработанной оценочной методике установлено, что по мере увеличения ширины каналов от 50 до 100 мм эффективность сепарации из газа мелкодисперсных частиц (диаметром 0,5...4,0 мкм) в сепарационном устройстве уменьшается от 70,4 до 47,3 % (рис. 4).



**Рис. 3. Зависимости эффективности  $E$  улавливания частиц сепарационным устройством от диаметра частиц  $a$  при высоте сепарационной зоны  $z$ :**

1 —  $z = 30$  мм; 2 —  $z = 50$  мм;  
3 —  $z = 70$  мм

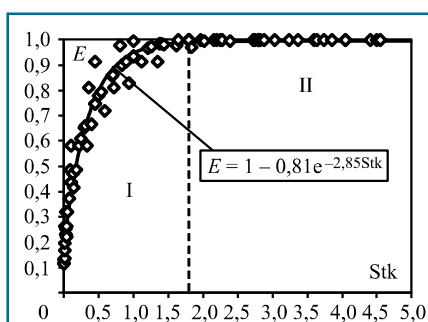


**Рис. 4. Зависимости эффективности  $E$  улавливания частиц сепарационным устройством от диаметра частиц  $a$  при ширине каналов  $b$ :**  
 1 —  $b = 50$  мм; 2 —  $b = 80$  мм;  
 3 —  $b = 100$  мм

При сепарации частиц размером более 5 мкм эффективность сепарационного устройства близка к 100 % (при ширине квадратных каналов 50...100 мм и входной скорости газового потока 5 м/с). Снижение эффективности сепарации при увеличении ширины каналов (см. рис. 4) связано с уменьшением скорости газа на выходе из круглых отверстий в стенках сепарационных каналов, а также с увеличением диаметра вихрей, так как эти факторы влияют на уменьшение центробежных сил.

На графике расчетных значений эффективности сепарации  $E$  в зависимости от числа Стокса  $Stk$  (рис. 5) имеются две области:

в области I (при  $Stk = 0,008...1,79$ ) очевидно, что эффективность сепарации  $E < 100$  %;



**Рис. 5. Зависимость эффективности  $E$  улавливания мелкодисперсных частиц сепарационным устройством с каналами квадратного сечения от значения числа Стокса  $Stk$**

в области II (при  $Stk > 1,79$ ) эффективность сепарации  $E = 100$  %.

По результатам расчетов получено обобщенное экспоненциальное уравнение, отражающее зависимость эффективности сепарации частиц из газового потока от числа Стокса (с учетом конструктивных и технологических параметров устройства и параметров мелкодисперсных частиц):

$$E = 1 - 0,81e^{-2,85Stk} \quad (8)$$

Таким образом, согласно результатам расчетов разработанное сепарационное устройство может быть эффективно применено для улавливания из газовых потоков мелкодисперсных частиц (диаметром менее 10 мкм) на различных промышленных объектах. При относительно небольших значениях входной скорости газового потока (3...7 м/с) обеспечивается высокая эффективность сепарации частиц диаметром более 5...6 мкм (~100 %) и частиц диаметром 3...5 мкм (более 60 %). Эффективность устройства при улавливании частиц диаметром менее 3 мкм в среднем составляет 37,1 %, т.е. необходимо дополнительное применение фильтров тонкой очистки, однако срок службы фильтров при одновременном применении сепарационных устройств может быть существенно увеличен. По результатам исследований выявлено, что изменение некоторых параметров устройства (в частности, уменьшение степени крутки и ширины каналов) позволит обеспечить повышение эффективности сепарации частиц из газа в устройстве в среднем на 10...30 % для частиц диаметром 0,5...5,0 мкм.

#### **Выводы по результатам проведенных расчетов:**

эффективность сепарационного устройства с каналами квадратного сечения повышается с увеличением диаметра частиц, высоты сепарационной зоны, плотности частиц, входной скорости газового потока, ширины каналов;

существенное влияние на эффективность устройства оказывает ширина квадратного канала, так как этой величиной определя-

ется диаметр образующихся вихрей в сепарационной зоне;

получена зависимость эффективности сепарации частиц из газового потока от числа Стокса (с учетом конструктивных и технологических параметров устройства, а также параметров улавливаемых мелкодисперсных частиц);

при числах Стокса более 1,79 обеспечивается 100 %-ная эффективность улавливания частиц размерами от 0,5 до 10 мкм;

разработанное устройство значительно превосходит традиционные циклоны по эффективности удаления из газового потока частиц размерами менее 10 мкм.

Основные достоинства разработанного сепарационного устройства: простота изготовления и эксплуатации; малая металлоемкость; легкость регенерации (очистки) квадратных каналов от мелкодисперсной пыли; высокая эффективность пылеулавливания.

#### **Список литературы**

1. Misra A.K. Climate change and challenges of water and food security // The International Journal of Built Environment and Sustainability. 2014. V. 3. N. 1. P. 153—165.
2. Сугак Е.В., Войнов Н.А., Николаев Н.А. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами. Казань: Школа. 1999. 224 с.
3. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты газоочистки. Пенза: ПГУ. 2006. 201 с.
4. Буренин В.В. Очистка выбросов предприятий нефтегазового комплекса // Neftegaz.RU. 2019. № 4. С. 108—115.
5. Marinuc M., Rus F. The effect of particle size and input velocity on cyclone separation process // Bulletin of the Transilvania University of Brasov. 2011. V. 4. P. 117—122.
6. Gim-bun J., Chuah T.G., Fakhru'l-Razi A. et al. The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study // Chemical Engineering and Processing. 2005. V. 44. P. 7—12.
7. Биккулов Р.Я., Дмитриева О.С., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р. Очистка воздушных потоков от мелкодисперсных частиц в окрасочных камерах // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 12. С. 10—14.