

УДК 535.536:628.51

С. М. Слободян, В. П. Куц

Эффективность улавливания пыли и аэрозоля N-ступенчатой системой

S. M. Slobodyan, V. P. Kuts

Dust and Aerosol Collection Efficiency by N — step System

Изложена методика расчетов эффективности созданных пылеулавливающих систем — центробежно-инерционных с жалюзийным отводом воздуха, мокрых и магнитных. Исследованы проблемы оценки для различных логических моделей и принципа действия практических конструкций новых устройств для анализа дисперсного состава пылевидных материалов. Показаны особенности аппаратной реализации на примере описания блоков практических конструкций и работоспособность спроектированных устройств на конкретных примерах новых устройств для анализа дисперсного состава пылевидных материалов. Применение предложенных устройств позволяет значительно сократить длительность анализа по сравнению с известными методами. В работе показано, что учет взаимосвязи параметров новых устройств анализа дисперсного состава порошков и пылевидных материалов обуславливает наличие близкой к нулю погрешности оценки, что позволяет решить проблему оценки размеров частиц, фракций, контроля и диагностики вне рамок известных подходов решения проблемы эффективной оценки. Оценена их эффективность в условиях, отличающихся от условий эксперимента, для обеспечения нормативной остаточной концентрации пыли в выбросах с учетом надежности работы пылеуловителей при их эксплуатации.

Ключевые слова: эффективность, пылеулавливание, предельно допустимая концентрация.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-57

Введение. Полностью обеспечить требования к допустимому остаточному содержанию пыли в выбросах промышленных и вентиляционных установок только с помощью одного пылеуловителя [1] удается очень редко. Ведь применение даже самого эффективного пылеулавливающего аппарата возможно только при достаточно малом содержании пыли в газовых средах, подлежащих очистке.

При сильной запыленности газовой среды (200–300 г/м³) приходится использовать несколько аппаратов, причем на каждой следующей степени должны применяться пылеуловители более высокого класса, чем на предыдущем. Такой подход применяют в следующих случаях. Во-первых, для достижения кон-

Methodology for calculating efficiency of created dedusting systems is presented. This work is devoted to evaluation of various logical models and operation principles of new devices for the analysis of dust-like materials. Proposed devices can significantly an analysis duration in comparison with other well-known methods. The proposed dedusting systems are based on centrifugal inertia systems with an air exhaust louver, wet and magnetic systems. It is demonstrated that equation of parameters relationship properly developed for a new device leads to non-zero estimation errors. Thus, problems of size evaluation for particles and fractions, problems of control and diagnostics can be solved within a framework that goes beyond traditional approach. The efficiency of the proposed technique in different experimental conditions is evaluated and proved to fall into compliance with regulations on residual dust concentration with consideration of dust collector operational reliability.

Key words: efficiency, dedusting, maximum permissible concentration (MPC).

центрации пыли в выбросах уловителями с меньшей, чем необходимо, эффективностью. Во-вторых, когда хотят получить из первых ступеней очистки, в которых, как правило, используют сухие пылеуловители (пылеосадительные камеры, циклоны), крупнодисперсный порошок, пригодный для применения в технологии или более удобный для транспортировки, чем шлам мокрых пылеуловителей.

Основные положения. При использовании рукавных фильтров обычно проводят предварительное отделение части пыли, что необходимо при начальной ее концентрации, превышающей 20 г/м³, или при необходимости фракционирования уловленного материала путем выделения крупных фракций в первой степени очистки.

Эффективность пылеуловителя или суммарная эффективность пылеулавливающей установки E , % должна быть не менее величины

$$E = \frac{C_H - C_K}{C_H} \cdot 100, \quad (1)$$

где C_H — концентрация твердых частиц в воздухе, поступающем на очистку, $\text{мг}/\text{м}^3$; C_K — конечная концентрация твердых частиц в очищенном воздухе, $\text{мг}/\text{м}^3$. Величина C_K должна быть не больше допустимой остаточной концентрации, которая определяется по формуле

$$C_K = (160 - 4L) \cdot k, \quad (2)$$

где L — расход запыленного воздуха, тыс. $\text{м}^3/\text{час}$; k — коэффициент, зависящий от ПДК ($k = 0,3 \div 1$). При $L > 15$ тыс. $\text{м}^3/\text{час}$; $C_K = 100k$.

При наличии значительных подсосов воздуха эффективность более точно выразится формулой

$$E = \frac{L_H C_H - L_K C_K}{L_H C_H}, \quad (3)$$

где L_H и L_K — расход соответственно запыленного и очищенного воздуха.

Эффективность отдельных ступеней, например двухступенчатой установки, определяется по формулам:

$$\text{первой ступени} — E_1 = \frac{C_H - C_1}{C_H} \cdot 100; \quad (4)$$

$$\text{второй ступени} — E_2 = \frac{C_1 - C_K}{C_1} \cdot 100, \quad (5)$$

где C_1 и C_K — соответственно концентрация пыли в воздухе на выходе пылеуловителей первой и второй (конечной) ступеней. Значения этих концентраций находятся из формул (4) и (5): $C_1 = C_H - C_H E_1$ и $C_K = C_1 - C_1 E_2$.

После подстановки и преобразований получим

$$C_K = C_1 + C_H (E_1 E_2 - E_2). \quad (6)$$

Формула для общей эффективности имеет вид:

$$E_{1,2} = E_1 + E_2 (1 - E_1) \quad (7)$$

Аналогично для трехступенчатой установки:

$$E_{1,2,3} = E_{1,2} + E_3 (1 - E_{1,2}). \quad (8)$$

Полученные формулы на стадии проектирования позволяют оценить эффективность пылеуловителя конечной ступени очистки, необходимую для обеспечения нормируемой остаточной запыленности очищенного выброса [2, 3], или же необходимое количество ступеней очистки.

Экспериментальные исследования. Результаты экспериментальных исследований трех конструк-

ций [4–6] пылеулавливающих аппаратов: жалюзийно-вихревого, батарейного циклона с жалюзийными элементами и циклона со ступенчатым отводом пыли — говорят о том, что по эффективности и гидравлическому сопротивлению они превосходят известные в настоящее время аппараты центробежной очистки — циклоны.

Улучшение этих показателей обусловлено сочетанием в предложенных пылеуловителях двух принципов разделения запыленных потоков: центробежного, как в циклонах, и жалюзийных (прохождение через решетки). Все типы аппаратов испытывались по требованиям стандартной методики, рекомендованной для такого пылеочистного оборудования. Исследования проводились в два этапа: сначала, на первом этапе, на не запыленном воздухе определялись гидродинамические характеристики и изучалось влияние на них режимных и конструктивных параметров, а затем определялась эффективность пылеулавливания и исследовалось влияние на нее тех же параметров. В качестве экспериментальной использовалась кварцевая пыль с медианным распределением диаметра частиц $\delta 50 = 8$ $\mu\text{м}$ плотностью $\rho_n = 2650$ $\text{кг}/\text{м}^3$. Начальная концентрация пыли в воздухе, поступающем в аппарат, составляла $C_H = 3$ $\text{г}/\text{м}^3$.

В натуральных испытаниях учтены конструктивные особенности каждого аппарата для использования в полной мере их преимуществ и устранения выявленных недостатков. Это позволило получить результаты, не вызывающие сомнений в их достоверности.

Самый высокий показатель эффективности пылеулавливания в жалюзийно-вихревом пылеуловителе диаметром 0,16 м составляет 96%. Показатель этого пылеуловителя выше эффективности аппарата со встречными закрученными потоками (без жалюзийной решетки).

Оптимальные значения режимных и конструктивных параметров:

а) скорость в поперечном плане (сечении) аппарата составляет 3,7 м/с;

б) скорость прохождения воздуха через жалюзийную решетку близка к 4,5 м/с. Эту скорость при оптимальных значениях расходов в пылеуловителях такой конструкции обеспечивает жалюзийная решетка с коэффициентом живого сечения $k_p = 0,4$;

в) количество направляющих спиральных перегородок в завихрителях как первичного, так и вторичного воздушных потоков составляет 4;

г) соотношение расходов вторичного и первичного потоков равно 2,3;

д) гидравлическое сопротивление пылеуловителя при этом составляет $\Delta p = 1155$ Па, коэффициент гидравлического сопротивления $\zeta = 132$.

В батарейном циклоне с жалюзийными элементами наивысшая эффективность достигает 93% при следующих значениях параметров:

а) скорость в поперечном сечении (плане) циклонных элементов близка к 3,5 м/с;

б) скорость прохождения воздуха через жалюзийные решетки циклонных элементов находится в пределах 4,5–5,0 м/с;

в) как направляющие аппараты в циклонных элементах использованы аппараты типа «розетка»;

г) гидравлическое сопротивление пылеуловителя составляет 753 Па, а коэффициент гидравлического сопротивления $\zeta = 102$.

При использовании направляющих аппаратов типа «винт» максимальная эффективность пылеулавливания достигает 91% при гидравлическом сопротивлении 502 Па (коэффициент гидравлического сопротивления $\zeta = 68$).

Максимальный показатель эффективности пылеулавливания в циклоне со ступенчатым отводом пыли составляет 95% для аппарата диаметром 0,4 м и 96% — для аппарата диаметром 0,1 м при следующих значениях режимных и конструктивных параметров:

а) скорость пылевоздушного потока на входе в аппарат находится в пределах 25–28 м/с;

б) скорость потока в сечении аппарата в пределах 3,5–4,0 м/с;

в) скорость прохождения воздуха через жалюзийную решетку находится в пределах 4–5 м/с;

г) гидравлическое сопротивление аппаратов при этом составило 850 Па, коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к входной скорости, равен 1,84, а коэффициент сопротивления, отнесенный к скорости в поперечном сечении аппарата, — 115 для пылеуловителя диаметром 0,4 м, а для пылеуловителя диаметром 0,1 м с гидравлическим сопротивлением 790 Па — коэффициенты сопротивления 1,91 и 107.

Результаты и их обсуждение. В процессе экспериментальных исследований эффективность пылеулавливания, достигнутая во всех трех типах предложенных пылеуловителей с жалюзийным отводом воздуха, довольно высокая. Она выше эффективности других существующих пылеуловителей того же класса, однако достичь норм остаточного содержания пыли в очищенном воздухе только за счет применения одного любого из аппаратов оказалось невозможным. Поэтому рекомендовать их применение можно в качестве ступеней очистки перед аппаратами высших классов. Для применения аппаратов [4–8] в конкретных условиях производства следует учесть специфику этих условий и внести коррективы в показатели, полученные при исследованиях в лабораторных условиях.

Эксплуатационные свойства всех трех типов предложенных пылеуловителей, которые будут работать в условиях, отличающихся от тех, для которых известны экспериментальные данные по фракционной эффективности, могут быть предусмотрены на осно-

ве имеющихся данных путем сопоставления с экспериментальными данными [9]:

1) при изменении плотности пыли размер частиц новой пыли, которые будут улавливаться с той же эффективностью, что и частицы заданного размера тестовой пыли, может быть найден путем умножения размера тестовой пыли на величину, равную отношению:

$(\text{плотность тестовой пыли}/\text{плотность новой пыли})^{1/2}$;

2) при изменении объемной скорости газового потока, проходящего через пылеуловитель, при новом расходе размер частиц, которые будут улавливаться с той же эффективностью, что и частицы тестового размера при экспериментальном расходе, может быть рассчитан путем умножения размера частиц экспериментальной пыли на величину, определяемую соотношением:

$(\text{экспериментальный расход}/\text{новый расход})^{1/2}$;

3) при изменении вязкости газа (например, связанном с изменением температуры газа), размер частиц при равной эффективности можно найти умножением размера частицы тестовой пыли на величину отношения:

$(\text{новая вязкость}/\text{тестовая вязкость})^{1/2}$;

4) при изменении диаметра пылеуловителя (циклонного элемента батарейного циклона), но при сохранении геометрического подобия с экспериментальным аппаратом, размер частиц для равной эффективности может быть найден умножением размера частицы экспериментального циклона на величину корня квадратного из отношения:

$(\text{диаметр новой модели}/\text{диаметр экспериментальной модели})^{1/2}$.

Так как разработанные пылеуловители (жалюзийно-вихревой, батарейный циклон с жалюзийными элементами, циклон со ступенчатым отводом пыли), исследованные на экспериментальном стенде, имели различную производительность и различные диаметры, целесообразно оценить их эффективность при одинаковой производительности, воспользовавшись приведенными выше множителями.

Если принять какое-то конкретное значение расхода газового потока (производительность пылеуловителя), например 3000 м³/час (0,83 м³/с), то для жалюзийно-вихревого пылеуловителя производительностью 0,07 м³/с (250 м³/час) поправочный множитель для исчисления размера частиц при изменении расхода составит величину, равную $\sqrt{0,07/0,83} = 0,29$.

Для батарейного циклона с жалюзи элементами производительности 0,55 м³/с (2000 м³/час) без изменения диаметра циклона элементов (самых эффективных, с наименьшим рекомендованным размером) при изменении расхода изменится только количество циклонных элементов. Итак, при производительности 3000 м³/час (0,83 м³/с) их количество должно быть

в 1,5 раза больше, чем в аппарате, который исследовался, т. е. 12.

Для циклона со ступенчатым отводом пыли поправочный множитель для производительности $0,44 \text{ м}^3/\text{с}$ ($1600 \text{ м}^3/\text{час}$) равен: $\sqrt{0,44/0,83} = 0,73$; для производительности $0,0277 \text{ м}^3/\text{с}$ (100 м^3) — $\sqrt{0,0277/0,83} = 0,18$.

Однако внесение поправки на изменение производительности в пылеуловителе выглядит не совсем корректным без установления определенных границ таких изменений, например, не более $\pm 20\%$ от оптимальной производительности, ведь конструкции аппаратов рассчитываются по оптимальным значениям скоростей в них. Значительное изменение этих скоростей может очень существенно повлиять, в первую очередь, на гидравлическое сопротивление аппарата и не привести к улучшению эффективности.

Если же сделать перерасчет диаметра частиц, которые полностью улавливаются в аппарате другого размера, по формуле

$$d'_q = d_q \sqrt{D'/D}, \quad (9)$$

(где d'_q — диаметр частиц, улавливаемых в новом аппарате, м; d_q — диаметр частиц, улавливаемых в исследованном аппарате, м; D' — диаметр нового аппарата, м; D — диаметр исследованного аппарата, м), а затем по графику интегральной функции распределения экспериментальной пыли определить эффективность очистки в новом аппарате, то для жалюзийно-вихревого пылеуловителя производительностью $3000 \text{ м}^3/\text{час}$ ($0,83 \text{ м}^3/\text{с}$) она составит 93% (диаметр аппарата при этом $0,53 \text{ м}$), а для циклона со ступенчатым отводом пыли — 92% (диаметр аппарата при этом $0,55 \text{ м}$).

Эти значения эффективности, позволяют определить эффективность очистки системой той же производительности $3000 \text{ м}^3/\text{час}$ ($0,83 \text{ м}^3/\text{с}$) с одним из рассматриваемых уловителей на первой ступени

и, например, мокрого пылеуловителя [7] — на второй ступени, эффективность которого составляет $98,5\%$. Предельно допустимая концентрация пыли в очищенном воздухе — $5 \text{ мг}/\text{м}^3$. Используя формулу (7), можно найти значение эффективности этой двухступенчатой установки $E_{1,2}$. Из формулы (1) можно определить предельное значение начальной зависимости газового потока, при которой можно достичь нормируемого значения C_k .

Наибольшую начальную запыленность газового потока, который можно очистить до ПДК в трехступенчатой установке из циклона со ступенчатым отводом пыли, жалюзийно-вихревого пылеуловителя и мокрого пылеуловителя, можно определить, воспользовавшись формулами (7), (8) и (1). Расчетное значение начальной запыленности при этом составит величину, равную $C_k = 60 \text{ г}/\text{м}^3$. Значит, для очистки газов с большей запыленностью на первой ступени очистных систем нужно использовать пылеуловители других типов, которые позволили бы уловить основную часть пыли. Для очистки газов от пыли с ферромагнитными свойствами на конечной ступени очистки можно использовать предложенный автором магнитный пылеуловитель [8].

Заключение. Результаты анализа говорят о том, что применение в очистных системах предложенных пылеуловителей позволяет достичь допустимого остаточного содержания пыли в выбросах промышленных и вентиляционных установок при некотором начальном содержании пыли в газах, поступающих на очистку. При большей начальной запыленности необходимо воспользоваться пылеочистными аппаратами, способными существенно уменьшать пылевые нагрузки на следующие ступени очистных систем. Максимальная начальная запыленность газового потока, при которой можно достичь ПДК пыли в очищенном воздухе в пылеулавливающей установке из указанных пылеуловителей, составляет $60 \text{ г}/\text{м}^3$.

Библиографический список

1. Куц В. П., Слободян С. М. Метод анализа дисперсного состава аэрозолей, пыли и порошков // Известия Алтайского государственного университета. — 2014. — № 1/1.
2. Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха. — М., 1981.
3. Белевицкий А. М. Проектирование газоочистительных сооружений. — Л., 1990.
4. Жалюзийно-вихревой пылеуловитель: патент № 23900 А Украина, МПК⁶ В04С 3/06 / В. П. Куц, В. Б. Каспрук, М. И. Плескун / Тернопольский государственный технический университет им. Ивана Пулюя. — № 96062491; заявл. 24.06.96; опубл. 31.08.98. — Бюл. № 4.
5. Батарейный циклон с жалюзийными элементами: патент № 59139А Украина, МПК⁷ В04С3/06 / В. П. Куц, Я. Д. Ярош, О. М. Марцияш — № 2003021573; заявл. 24.02.2003; опубл. 15.08.2003. — Бюл. № 8.
6. Циклон повышенной эффективности со ступенчатым отводом твердой фазы: патент № 62320А Украина, МПК⁷ В04С3/06 / В. П. Куц, О. М. Марцияш, Я. Д. Ярош. — № 2003031933; заявл. 04.03.2003; опубл. 15.12.2003. — Бюл. № 12.
7. Аппарат для мокрого пылеулавливания: патент на полезную модель № 35760 Украина, МПК⁷ В01D47/06 /

Эффективность улавливания пыли и аэрозоля N-ступенчатой системой

В. П. Куц, Г. П. Горишна, О. М. Марцияш. — № 4200802735; заявл. 03.03.2008; опубл. 16.10.2008. — Бюл. № 19.

8. Устройство для удаления аэрозольных частиц из газового потока: патент на полезную модель № 39426 Укра-

ина, МПК⁷ B01D47/00 / В. П. Куц. — № 420081142; заявл. 09.09.2008; опубл. 25.02.2009. — Бюл. № 4.

9. Страус В. Промышленная очистка газов: пер. с англ. Ю. Я. Косого. — М., 1981.