

8. SanPiN 2.2.2/2.4.1340-03. Gigenicheskie trebovaniya k personal'nyim elektronno-vychislitel'nyim mashinam i organizatsii raboty. - Vved. 2003-06-30. - M.: Izd-vo standartov, 2003. - 27 s.

9. SanPiN 2.1.2.1002-00. Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k zhilym zdaniyam i pomeshcheniyam. - Vved. 2001-07-01. - M.: Izd-vo standartov, 2001. - 13 s.



УДК 631.36:628.51

В.П. Куц, С.М. Слободян
V.P. Kuts, S.M. Slobodyan

ОЦЕНКА УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛИ СОСТАВНОЙ СИСТЕМОЙ

EVALUATION OF DUST COLLECTION BY MULTISTAGE SYSTEM

Ключевые слова: оценка, эффективность, пыль, улавливание, предельно допустимая концентрация (ПДК), многоступенчатая система.

Keywords: evaluation, dust, efficiency, dust collection, maximum permissible concentration, multistage system.

Представлено исследование проблемы оценки для разных по логике работы, структуре исполнения моделей и принципу физического действия практических конструкций новых авторских устройств для анализа дисперсного состава пылевидных материалов и порошков. Описаны метод, конструкция и принцип действия новых устройств для оценки и анализа дисперсного состава порошков и пылевидных материалов. Показано, что учёт уравнений взаимосвязи основных рабочих параметров и характеристик новых устройств авторов для анализа дисперсного состава порошков и пылевидных материалов обуславливает отличие от нуля значения расчёта эффективности этих устройств, что позволяет решить проблему оценки размеров частиц, фракций, контроля и диагностики, а также эффективности применения предложенных авторами устройств очистки воздушной среды от пыли вне рамок традиционных подходов решения этой проблемы оценки подобного рода систем. Применение предложенных устройств позволяет значительно сократить длительность анализа по сравнению с известными методами. Изложена методика оценки и ведения расчетов эффективности работы созданных авторами улавливающих пыль систем – центробежно-инерционных с жалюзийным отводом воздуха, мокрых и магнитных. Оценена эффективность в условиях, отличающихся от эксперимента, для обеспечения нормативной остаточной концентрации пыли в выбросах с учетом надежности предложенных и созданных авторами уловителей пыли (~190).

The evaluation of various models and practical designs of new original devices for the analysis of dusty materials and powders is discussed. The method, original design and operation principle of new original devices for the analysis of particle size distribution of dusty materials and powders are described. It is shown that the account of equations of connections stipulates parameters of new original devices for the difference from zero estimations approximations equations, which allows solving the problem of time outside quantum and fractal of dust particulate materials, control and diagnosis of dust particulate materials outside the framework of traditional approaches to that problem. The application of the proposed original devices may significantly reduce the analysis duration as compared to the known methods. The methodology for calculating the efficiency of created dust collection original systems is presented. The original dust collection systems are centrifugal inertia with air exhaust louver, wet and magnetic systems. Their efficiency in different experimental conditions was evaluated. It needs to ensure regulatory residual dust concentration in the emissions taking into account reliability of dust collectors in their operation.

Куц Виктор Петрович, к.т.н., доцент, Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя, Украина. Тел. +38-0352-251789. E-mail: Victor_Kuts@tstu.edu.ua.

Слободян Степан Михайлович, д.т.н., проф., Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Тел. (3822) 563-267. E-mail: sms_46@ngs.ru.

Kuts Viktor Petrovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Ternopol National Technical University named after Ivan Puluy, Ukraine. Ph.: +38-0352-251789. E-mail: Victor_Kuts@tstu.edu.ua.

Slobodyan Stepan Mikhaylovich, Dr. Tech. Sci., Prof., National Research Tomsk Polytechnic University. Ph.: (3822) 563-267. E-mail: sms_46@ngs.ru.

Введение

Полностью обеспечить требования к норме допустимого остаточного содержания пыли в выбросах промышленных и вентиляционных установок только с помощью одного пылеуловителя удается очень редко, так как применения даже самого эффективного пылеулавливающего аппарата возможно только при достаточно малом содержании пыли в газовых средах, подлежащих очистке [1].

Цель и задачи. При значительной запыленности газовой среды (200-300 г/м³) приходится использовать несколько аппаратов, причем на каждой следующей степени очистки должны использоваться пылеуловители более высокого класса, чем на предыдущем. Такой подход применяют в следующих случаях. Во-первых, когда стремятся достичь концентрации пыли в выбросах за счёт пылеуловителей 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 предварительное отделение части пыли перед ними необходимо при начальной её 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, мг/м³;

C_K – конечная концентрация твердых частиц в очищенном воздухе, мг/м³. 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. м³/ч;

k – коэффициент, зависящий от ПДК ($k = 0,3 \div 1$). При $L > 15$ тыс. м³/ч;

$$C_K = 100k.$$

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:

первой степени –

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

второй степени –

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

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:

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

С помощью полученных формул уже на стадии проектирования можно оценить эффективность пылеуловителя конечной степени очистки, необходимую для обеспечения нормируемой остаточной запыленности очищенного выброса или же необходимое число ступеней очистки [1, 2].

Экспериментальные исследования

Результаты экспериментальных исследований трех авторских конструкций пылеулавливающих аппаратов: жалюзийно-вихревого, батарейного циклона с жалюзийными эле-

ментами 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 [3-5].

Улучшение этих показателей обусловлено сочетанием в предложенных пылеуловителях двух методов разделения запыленных потоков: центробежного (как в циклонах) и жалюзийного (пропускании через жалюзийные решетки). Все три типа аппаратов испытывались по требованиям стандартной методики, рекомендованной для такого класса пылеочистного оборудования. Испытания проводились в два этапа. На первом этапе на не запыленном воздухе определяли гидродинамические характеристики и изучали влияние на них режимных и конструктивных параметров. Затем оценивалась эффективность пылеулавливания и исследовалось влияние на нее тех же параметров. В качестве тестовой применялась кварцевая пыль с медианным распределением диаметра частиц $\delta_{50} = 8$ мкм плотностью $\rho_p = 2650$ кг/м³. Начальная концентрация пыли в воздухе, поступающем в аппарат, составляла $C_H = 3$ г/м³. В испытаниях учитывались конструктивные особенности каждого из аппаратов для использования их преимуществ в полной мере и устранения выявленных недостатков. Это позволило получить результаты, не вызывающие сомнений в их достоверности.

Самая высокая эффективность пылеулавливания в жалюзийно-вихревом уловителе диаметром 0,16 м равна 96%, что выше эффективности аппарата со встречными закрученными потоками (без жалюзийной решетки).

Оптимальные значения режимных и конструктивных параметров при этом имеют следующие значения:

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 наивысший показатель эффективности достигает 93%, при следующих зна-

чениях режимных и конструктивных 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 $\zeta = 68$).

Максимальная эффективность пылеулавливания, достигнутая 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 – в пределах 25-28 м/с;

б) скорость потока в поперечном плане (сечении) аппарат – в пределах 3,5-4,0 м/с;

в) скорость прохождения воздуха через жалюзийную решетку – 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 – 1,91 и 1,07.

Результаты и их обсуждение

Хотя достигнутые в процессе натурных испытаний эффективности пылеулавливания во всех трех типах предложенных пылеуловителей с жалюзийным отводом воздуха довольно высокие и преобладают по этому показателю эффективности известных уловителей того же класса, однако достичь нормы остаточного содержания пыли в очищенном воздухе только за счет использования одного какого-нибудь из этих аппаратов оказалось невозможным. Поэтому следует их использовать как ступени очистки перед аппаратами высших классов. Для применения рассматриваемых аппаратов в конкретных условиях производства следует в полной мере учесть специфику этих условий и внести коррективы в показатели, полученные при исследованиях.

Эксплуатационные свойства всех трех типов предложенных пылеуловителей, которые будут работать в условиях, отличающихся от тех, для которых известны эксперименталь-

ные данные по фракционной эффективности, могут быть предусмотрены на основе имеющихся данных путем сопоставления с экспериментальными данными [6, 7]:

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 тестовой 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 $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0,83 \text{ м}^3/\text{с}$), то для жалюзийно-вихревого пылеуловителя производительностью $0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ ($250 \text{ м}^3/\text{ч}$) поправочный множитель для исчисления размера частиц при изменении расхода составит величину, равную $\sqrt{0,07/0,83} = 0,29$.

Для батарейного циклона с жалюзийными элементами производительностью $0,55 \text{ м}^3/\text{с}$ ($2000 \text{ м}^3/\text{ч}$) без изменения диаметра циклона элементов (с самыми эффективными и наи-

меньшим рекомендованным размером) при изменении расхода изменится только количество циклонных элементов. Итак, при производительности $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0,83 \text{ м}^3/\text{с}$) их число должно быть в 1,5 раза больше, чем в аппарате, который исследовался, то есть 12.

Для циклона со ступенчатым отводом пыли поправочный множитель для пылеуловителя производительностью $0,44 \text{ м}^3/\text{с}$ ($1600 \text{ м}^3/\text{ч}$) – величина, равная: $\sqrt{0,44/0,83} = 0,73$; для пылеуловителя производительностью $0,0277 \text{ м}^3/\text{с}$ (100 м^3): $\sqrt{0,0277/0,83} = 0,18$.

Однако внесение поправки на изменение производительности в пылеуловителе будет не совсем корректным без установления диапазона 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 сильно 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 $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0,83 \text{ м}^3/\text{с}$) составит 93% (диаметр аппарата – $0,53 \text{ м}$), а для циклона со ступенчатым отводом пыли – 92% (диаметр аппарата – $0,55 \text{ м}$).

По этим значениям эффективности можно определить эффективность очистки системой той же производительности $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0,83 \text{ м}^3/\text{с}$) с использованием одного из рассматриваемых пылеуловителей на первой ступени и мокрого пылеуловителя [8] – на второй ступени, эффективность которого равна 98,5%. Предельно допустимая концентрация пыли в очищенном воздухе составляет $5 \text{ мг}/\text{м}^3$.

Используя формулу (7), можно получить 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 (1), (7), (8). Расчетное значение начальной запыленности при этом составит величину, равную $C_k = 60 \text{ г/м}^3$. 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 [9].

Заключение

Результаты анализа говорят о том, что использование 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 применять пылеочистные аппараты, способные 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 г/м^3 .

Библиографический список

1. Пирумов, А.И. Обеспыливание воздуха. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
2. Белевицкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений. – Л.: Химия, 1990. – 228 с.
3. Жалюзийно-вихревой пылеуловитель: пат. № 23900А Украина, МПК⁶ В04С3/06 / Куц В.П., Каспрук В.Б., Плескун М.И. – № 96062491; заявл. 24.06.96; опубл. 31.08.98. Бюл. № 4.
4. Батарейный циклон с жалюзийными элементами: пат. № 59139А Украина, МПК⁷ В04С 3/06 / Куц В.П., Ярош Я.Д., Марцияш О.М. – № 2003021573; заявл. 24.02.2003; опубл. 15.08.2003, Бюл. № 8.
5. Циклон повышенной эффективности со ступенчатым отводом твердой фазы: пат. № 62320А Украина, МПК⁷ В04С 3/06 / Куц В.П., Марцияш О.М., Ярош Я.Д. – № 2003031933; заявл. 04.03.2003; опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12.
6. Беляев В.И., Стрикунов Н.И., Леканов С.В. Результаты исследования влияния

основных параметров подсевного решета на эффективность работы центробежно-решетного сепаратора // Вестник АГАУ. – 2006. – № 2 (22). – С. 49–54.

7. Страус В. Промышленная очистка газов: пер. с англ. Ю.Я. Косого. – М.: Химия, 1981. – 616 с.

8. Аппарат для мокрого пылеулавливания: пат. на полезную модель № 35760 Украина, МПК⁷ В01D 47/06 / Куц В.П., Горишна Г.П., Марцияш О.М. – № 4 2008 02735; заявл. 03.03.2008; опубл. 16.10.2008, Бюл. № 19.

9. Устройство для удаления аэрозольных частиц из газового потока: пат. на полезную модель № 39426 Украина, МПК⁷ В01D 47/00 / Куц В.П. – № 4 2008 1142; заявл. 09.09.2008; опубл. 25.02.2009, Бюл. № 4.

References

1. Pirumov A.I. Obespylivanie vozdukha. – M.: Stroizdat, 1981. – 296 s.
2. Belevitskii A.M. Proektirovanie gazoochistitel'nykh sooruzhenii. – L.: Khimiya, 1990. – 228 s.
3. Zhalyuziino-vikhrevoi pyleulovitel': Pat. № 23900A Ukraina, MPK⁶ V04S3/06 / Kuts V.P., Kaspruk V.B., Pleskun M.I. – № 96062491; zayavl. 24.06.96; opubl. 31.08.98. Byul. № 4 .
4. Batareynyi tsiklon s zhalyuziinyimi elementami: Pat. № 59139A Ukraina, MPK⁷ V04S 3/06 / Kuts V.P., Yarosh Ya.D., Martsiyash O.M. – № 2003021573; zayavl. 24.02.2003; opubl.15.08.2003. Byul. № 8 .
5. Tsiklon povyshennoi effektivnosti so stupenchatym otvodom tverdoi fazy: Pat. № 62320A Ukraina, MPK⁷ V04S 3/06 / Kuts V.P., Martsiyash O.M., Yarosh Ya.D. – № 2003031933; zayavl. 04.03.2003; opubl. 15.12.2003. Byul. № 12.
6. Belyaev V.I., Strikunov N.I., Lekanov S.V. Rezul'taty issledovaniya vliyaniya osnovnykh parametrov podsevnogo resheta na effektivnost' raboty tsentrobezhno-reshetnogo separatora // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2006. – № 2 (22). – S. 49–54.
7. Straus V. Promyshlennaya ochistka gazov / V. Straus: per. s angl. Yu.Ya. Kosogo. – M.: Khimiya, 1981. – 616 s.
8. Apparat dlya mokrogo pyleulavlivaniya: Patent na poleznuyu model' № 35760 Ukraina, MPK⁷ V01D 47/06 / Kuts V.P., Gorishna G.P., Martsiyash O.M. – № 4 2008 02735; zayavl. 03.03.2008; opubl. 16.10.2008, Byul. № 19.
9. Ustroistvo dlya udaleniya aeropol'nykh chastits iz gazovogo potoka: Patent na poleznuyu model' № 39426 Ukraina, MPK⁷ V01D 47/00 / Kuts V.P. – № 4 2008 1142; zayavl. 09.09.2008; opubl. 25.02.2009, Byul. № 4.