

## МЕТОДИКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПРОГНОЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИХРЕВОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ

Предложена методика прогноза эффективности вихревого пылеуловителя, основанная на расчетном определении зависимости минимального диаметра пылевой частицы, которая может быть сепарирована из воздушного потока, от его угловой скорости; распределение угловых скоростей чистого воздушного потока в сепарационном объеме определяется экспериментально при продувках на полномасштабном макете проектируемого пылеуловителя. Сопоставление величин минимальных диаметров пылевых частиц с кривой гранулометрического состава пыли, подлежащей улавливанию, дает возможность прогнозировать эффективность пылеуловителя на стадии его разработки и проектирования.

Запропоновано методику прогнозу ефективності вихревого пиловловлювача, що ґрунтується на розрахунковому визначенні залежності мінімального діаметра пилової частинки, яка може бути сепарована з повітряного потоку, від його кутової швидкості; розподіл кутових швидкостей чистого повітряного потоку у сепараційному об'ємі визначається експериментально при продувках на повномасштабному макеті проєктованого пиловловлювача. Співставлення величин мінімальних діаметрів пилових частинок з кривою гранулометричного складу пилу, що підлягає вловлюванню, дає можливість прогнозувати ефективність пиловловлювача на стадії його розробки та проєктування.

The procedure for predicting the efficiency of a vortical deduster based on calculations of the dependence of a minimal diameter of the dust particle which can be separated from an air flow on its angle velocity is proposed; distribution of angle velocities of a pure air flow in the separation volume is experimentally determined by blows using a full-scale mock-up of the designed deduster. A correlation of magnitudes of minimal diameters of dust particles with a curve of a granulometric composition of dust to be trapped provides a possibility of predicting the efficiency of the deduster at the stage of its development and design.

Одними из наиболее распространенных пылеулавливающих аппаратов инерционного типа являются циклоны, работа которых основана на использовании центробежных сил, возникающих при вращении газового потока внутри корпуса циклона. Параметры существующих типов циклонных аппаратов за многие десятилетия использования в различных отраслях промышленности детально изучены. Подбор конкретного типоразмера циклона может быть легко осуществлен по справочной литературе. Вместе с тем, аппараты циклонного типа имеют ряд существенных недостатков, в числе которых низкая эффективность улавливания пыли микронных размеров, несущей наибольшую экологическую опасность. Повышение эффективности сепарации мелкодисперсной пыли с помощью традиционных циклонных аппаратов сопряжено с ростом гидравлического сопротивления и ростом энергозатрат на очистку газового потока.

В связи с этим представляет интерес появившийся в последние годы новый тип инерционных пылеотделителей – вихревые пылеулавливающие аппараты со встречными закрученными потоками (ВЗП), имеющие повышенную эффективность инерционной сепарации пылевых частиц микронного размера, приближающуюся к эффективности фильтров [1 – 5].

Теоретическое решение задачи об эффективности вихревого пылеотделителя сдерживается сложностью гидродинамической картины в вихревом аппарате. Инженерные методы расчета, как правило, опираются на эмпирические зависимости, полученные для конкретных конструкций вихревых аппаратов и конкретных видов пыли. Поэтому после разработки, изготовления и запуска пылеотделителя приходится уже в промышленных условиях проводить определение его эффективности. При этом не всегда расчетные оценки подтверждаются результатами испытаний. Поэтому актуальной является разработка такого метода прогноза ожидаемой эффективности вихревого аппа-

рата, который бы не требовал дополнительных испытаний в производственных условиях.

Результаты экспериментальных исследований аппаратов ВЗП, обобщенные в работе [5], свидетельствуют о следующем.

Максимальная эффективность вихревого пылеуловителя обеспечивается при следующих конструктивных параметрах:

- относительная высота рабочей части аппарата  $H/D = 2,5 \dots 3,0$ ;
- диаметр входного отверстия для подачи запыленного потока (первичного потока) составляет половину диаметра аппарата ( $D_1 \approx D/2$ );
- диаметр выходного отверстия  $D_{\text{вых}} \approx (1,2 \dots 1,5)D_1$ ;
- углы установки лопастей завихрителей первичного и вторичного потоков в пределах от  $15^\circ$  до  $40^\circ$ ;
- форма и размеры отбойных шайб, устанавливаемых вблизи выходных и входных отверстий, должны обеспечивать снижение выноса мелких частиц из бункера сбора отсепарированной пыли и увеличивать скорость вращения потока вблизи выходного патрубка.

Наиболее эффективный режим работы наблюдается при средней скорости потока в плане аппарата свыше 4,5 м/с. Подбор вентиляционного оборудования необходимо производить так, чтобы получить наиболее приемлемый режим работы для конкретного производства. Например, при улавливании крупнодисперсной пыли среднюю скорость потока в плане аппарата можно принять равной 4,5 м/с, а при улавливании тонкодисперсной пыли, в зависимости от требований, предъявляемых к очистке, эта скорость должна быть увеличена до 7 – 8 м/с. При этом соответственно увеличивается производительность аппарата и его гидравлическое сопротивление.

Соотношение расходов очищаемого воздуха, подаваемого в нижний  $Q_1$  и верхний  $Q_2$  вводы, оказывает существенное влияние на пылеулавливающую способность аппарата и на потери давления при очистке воздуха.

Следует отметить, что для характеристики соотношения первичного и вторичного потоков используются различные виды зависимостей. В таблице 1 приведены результаты разных авторов по диапазонам исследованных соотношений расходов первичного  $Q_1$  и вторичного потоков  $Q_2$  и оптимальные значения этих соотношений. Подчеркнутые данные соответствуют принятой в цитируемой работе форме представления соотношения расходов  $Q_1$  и  $Q_2$ . Остальные значения для каждой из работ получены пересчетом на соответствующую зависимость.

Как видно из приведенных данных, рекомендации по оптимальному соотношению расходов  $Q_1$  и  $Q_2$  с точки зрения эффективности пылеулавливания и гидравлического сопротивления аппарата у разных авторов существенно отличаются друг от друга.

Опираясь на опыт разработки вихревых пылеотделителей, можно создать конструкцию, которая по своим конструктивным и режимным параметрам будет соответствовать требованиям оптимальности, однако значение эффективности для конкретного вида пыли можно будет определить только после создания пылеуловителя и испытаний его в промышленных или специально созданных лабораторных условиях.

Таблица 1

Вид соотношения между $Q_1$ и $Q_2$	[8]	[5]	[7]	[2]	[1]	[6]	[9]
$k_1 = Q_2 / (Q_2 + Q_1)$	<u>0,45</u>	0,76	0,6 – 0,76	<u>0,35 – 0,40</u>	<u>0,69</u>	0,23 – 0,26	0,23
$k_2 = Q_1 / (Q_2 + Q_1)$	0,55	<u>0,24</u>	<u>0,25 – 0,40</u>	0,60 – 0,65	0,31	0,74 – 0,77	0,71
$k_3 = Q_2 / Q_1$	0,82	3,17	1,5 – 3,0	0,30 – 0,35	2,23	<u>0,30 – 0,35</u>	<u>0,30 – 0,40</u>

В настоящей работе предлагается методика прогноза эффективности вихревого аппарата на стадии разработки и проектирования для конкретного вида пыли. Суть ее состоит в следующем. Для проектируемого пылеуловителя с заданными конструктивными и режимными параметрами расчетным путем находится зависимость минимального диаметра улавливаемой пылевой частицы от угловой скорости вращения газового потока в сепарационном объеме пылеуловителя. Затем на полномасштабном макете вихревого пылеуловителя для соответствующих режимных условий (расхода воздуха и расчетного соотношения потоков по входам) экспериментально находится распределение угловых скоростей в сепарационном объеме. В результате этого определяется конкретное значение минимального диаметра улавливаемой частицы. Опираясь на эти данные, с использованием кривой гранулометрического состава пыли находится доля частиц, которые не будут уловлены, а остаток частиц, с размером, большим минимального, определяет эффективность проектируемого аппарата.

Для расчетной оценки фракционной эффективности вихревого пылеуловителя рассмотрено движение частицы в плоском криволинейном потоке газа [9].

На частицу пыли, движущуюся в радиальном направлении, действует аэродинамическая сила, обусловленная движением частицы в потоке газа со скоростью  $W_r$ , и центробежная сила, с которой частица стремится двигаться от центра в направлении радиуса со скоростью  $W_R$  (рис. 1)

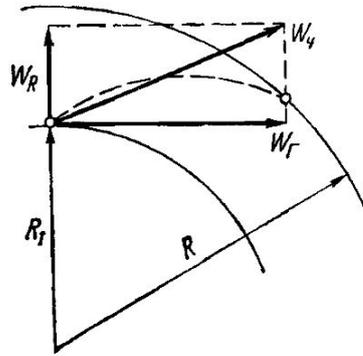


Рис. 1

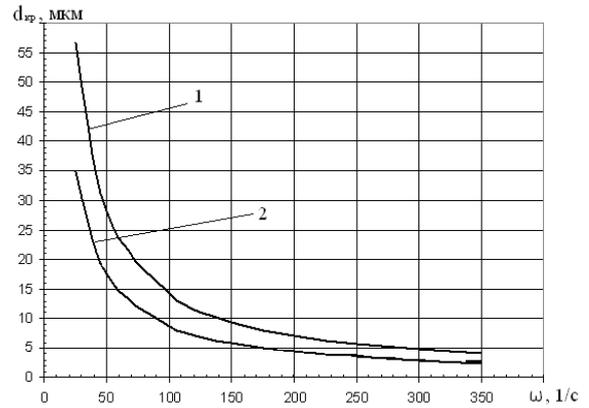


Рис. 2

Движение частицы в радиальном направлении на основании второго закона Ньютона описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{MW_\gamma^2}{R} - c_x \frac{\rho_\gamma W_R^2}{2} F = M \frac{dW_R}{dt}, \quad (1)$$

где  $M$  – масса частицы;  $W_\gamma$  – скорость газа;  $R$  – радиус кривизны траектории в рассматриваемой точке;  $c_x$  – аэродинамический коэффициент;  $F$  – площадь сечения частицы в направлении, нормальном к радиусу;  $W_R$  – скорость движения частицы в радиальном направлении;  $\rho_\gamma$  – плотность газа;  $t$  – время.

Считая частицу сферической, а движение в радиальном направлении ламинарным, с учетом соотношений  $F = \pi d^2/4$ ;  $M = \pi d^3 \rho_\gamma/6$ ;  $c_x = 24/Re = 24\mu/W_R \rho_\gamma d$  получим

$$\frac{d^2 R}{dt^2} + A \frac{dR}{dt} - \omega^2 R = 0, \quad (2)$$

где  $A = 18\mu/d^2 \rho_\gamma$ ;  $d^2 R/dt^2 = dW_R/dt$ ;  $\omega = W_\gamma/R$ .

Пренебрегая радиальным ускорением частицы  $d^2 R/dt^2$ , решение (2) с учетом начального условия  $t = 0$ ,  $R = R_1$  имеет вид

$$R = R_1 e^{\frac{\omega^2 t}{A}}.$$

Отсюда находится время, необходимое для перехода частицы с радиуса  $R_1$  на радиус  $R$

$$t = \frac{AR^2}{W_\gamma^2} \ln \frac{R}{R_1} \quad (3)$$

Положим, что вертикальная скорость воздуха в вихревом пылеуловителе определяется как

$$W_y = \frac{Q}{\pi(R^2 - R_1^2)}.$$

Для частиц микронного размера справедливо допущение, что скорость движения частиц равна скорости движения воздуха; время движения частицы по высоте аппарата  $H$  будет

$$t_y = \frac{H}{W_y}, \quad (4)$$

Из сравнения (3) и (4) получим значение минимального диаметра частиц  $d_{\min}$ , полностью улавливаемых в вихревом пылеуловителе

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{18\mu W_y \ln\left(\frac{D_{\text{ап}}}{D_{\text{тр}}}\right)}{\omega^2 \rho_{\text{ч}} H}}, \quad (5)$$

где  $D_{\text{ап}} = 2R$  – диаметр аппарата;  $D_{\text{тр}} = 2R_1$  – диаметр трубы с осевым завихрителем;  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность материала частицы пыли.

На рис. 2 приведены результаты расчетов по формуле (5) для плотности сыпучего материала  $\rho_{\text{ч}} = 1200 \text{ кг/м}^3$ , что соответствует плотности пылевидных пищевых продуктов (муки различных видов), химических порошков, угольной пыли и др., и плотности  $\rho_{\text{ч}} = 3150 \text{ кг/м}^3$  (кривая 2), что относится к плотности цемента, металлургических пылей. Расчеты проведены для следующих конструктивных параметров установки:  $D_{\text{ап}} = 0,2 \text{ м}$ ,  $D_{\text{ап}} / D_{\text{тр}} = 2$ ,  $H / D_{\text{ап}} = 1,81$  и средней скорости газа по сечению аппарата  $W_y = 5 \text{ м/с}$ .

Для использования зависимости (5) на практике необходимо знание угловой скорости вращения газового потока. В расчетном методе определения фракционной эффективности вихревого пылеуловителя, предложенном в работе [10], при задании радиального распределения угловых скоростей принималось допущение о том, что в пределах от 0 до  $R_1$  угловая скорость постоянна, а в пределах от  $R_1$  до  $R$  распределение угловой скорости такое же, как в свободном вихре. В данной работе распределение угловых скоростей определяется экспериментально при продувке чистого воздуха на полномасштабном макете вихревого пылеуловителя.

На рис. 3 приведена схема экспериментальной установки для исследования модельного вихревого пылеуловителя, состоящей из пылеуловителя 1, всасывающих трубопроводов 2 и 3 с мерными коллекторами 4 и центробежного вентилятора 5.

Пылеуловитель состоит из цилиндрического корпуса, завихрителей первичного 6 и вторичного 7 потоков, пылесборника 8. Регулировка соотношения расходов по входам пылеуловителя осуществлялась с помощью заслонок 9. Загрузка порции исследуемой пыли проводилась с помощью устройств 10.

Для измерения перепадов давления во входных мерных коллекторах использованы спиртовые микроманометры 11, соединенные с датчиками статического давления 12. Измерение распределения тангенциальной скорости

вихревых потоков в сепарационной зоне пылеуловителя осуществлялось термоанемометром 13.

Основные геометрические параметры пылеуловителя соответствуют описанным выше. Эксперименты по определению угловой скорости воздушного потока без пыли проводились при расходах, соответствующих условиям при работе пылеуловителя на запыленном потоке.

На рис. 4 представлено распределение угловой скорости движения воздуха по радиусу сепарационного объема вихревого пылеуловителя, полученное экспериментально при различных суммарных расходах, при этом кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют  $Q = 502; 543; 647; 724; 1041 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Отношение первичного расхода к суммарному выдерживалось в экспериментах равным 0,24.

Прогноз эффективности пылеуловителя проводился для условий сепарации кварцевой пыли, наиболее часто используемой в качестве эталонного материала при отработке пылеуловителей различного типа. Полагая, что решающее влияние на сепарацию пыли из газового потока имеет угловая скорость вблизи стенки аппарата, применительно к сепарации кварцевой пыли ( $\rho_{\text{к}} = 2650 \text{ кг/м}^3$ ) по формуле (5) рассчитаны значения минимального диаметра частиц пыли, которые могут быть уловлены данным пылеуловителем. Полученные результаты представлены в таблице 2.

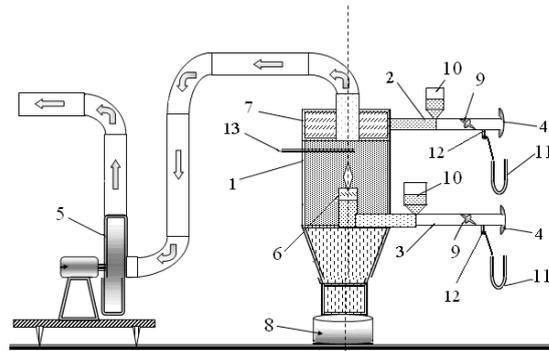


Рис. 3

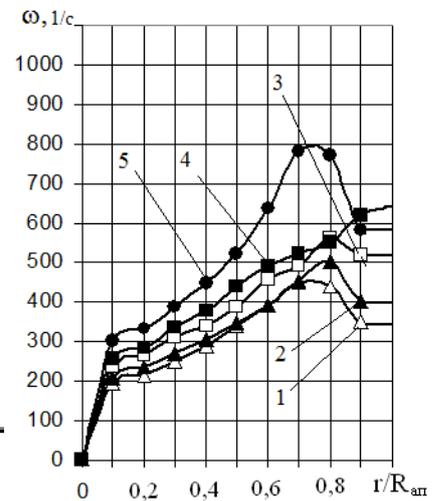


Рис. 4

Таблица 2

Объемный расход $Q$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	Гидравлическое сопротивление $\Delta p_{\text{ВЛУ}}$ , кПа	Средняя скорость $W_y$ , м/с	Угловая скорость у стенки $\omega_c$ , 1/с	Минимальный диаметр частиц $d_{\text{min}}$ , мкм
502	1,15	4,4	192	5,0
543	1,35	4,8	208	4,9
647	1,55	5,7	224	4,9
724	1,75	6,4	245	4,8
1041	2,55	9,2	294	4,7

Приведенные данные свидетельствуют, что увеличение суммарного расхода воздуха (в два раза) приводит к некоторому снижению минимального диаметра улавливаемой пыли, что не противоречит данным работы [5].

Применительно к грансоставу испытываемой кварцевой пыли, полученному с помощью лазерного анализатора частиц MASTERSIZER 2000E (см. рис. 5), и опираясь на значения минимальных диаметров (см. таблицу 2), находим процентное содержание частиц, которые не будут уловлены пылеуловителем. Масса неуловленных частиц численно равна площади под кривой в диапазоне диаметров частиц от 0,1 мкм до значений  $d_{\min} \approx 5$  мкм. Найденная площадь составляет для всех режимов примерно 10 – 11%. Таким образом, ожидаемая эффективность данного пылеуловителя для кварцевой пыли, имеющей приведенный выше грансостав, находится в пределах 89 – 90%.

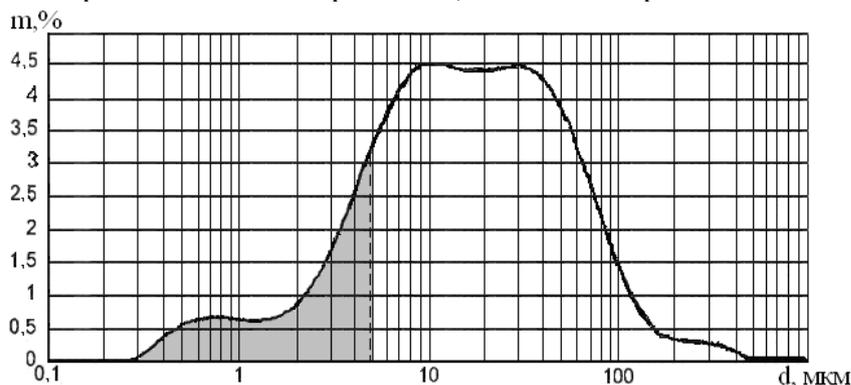


Рис. 5

Для верификации представленной расчетно-экспериментальной методики прогноза эффективности вихревого пылеуловителя были проведены эксперименты по улавливанию кварцевой пыли на описанной выше установке.

Эффективность пылеулавливания определялась по массе уловленной пыли  $M_y$  и суммарной массе  $M$  на входе в пылеуловитель:

$$\eta = \frac{M_y}{M} \cdot 100 \% . \quad (6)$$

Масса порции пыли  $M$ , вводимой в воздушный поток на входе в пылеуловитель, и масса уловленной пыли из пылесадительной камеры  $M_y$  определялись взвешиванием.

Эксперименты по определению эффективности лабораторного вихревого пылеуловителя проводились при расходах воздуха, соответствующих испытаниям на чистом воздухе при определении угловых скоростей вращения воздушного потока в сепарационном объеме. Методически эксперименты проводились аналогично испытаниям, представленным в работе [11]. Исследуемая порция кварцевой пыли массой 200 г загружалась во вторичный воздушный поток. Испытания проводились при двух крайних значениях объемного расхода воздуха. Расход твердой фазы составлял 10 г/с. Степень запыленности воздуха для минимального расхода составляла  $35 \text{ г/м}^3$ , а для максимального –  $17 \text{ г/м}^3$ . При минимальном расходе воздуха эффективность пылеулавливания составила 87 %, при максимальном – 88%. В целом расчетно-экспериментальные данные, полученные на основании экспериментов на чис-

том воздухе, экспериментальные результаты из работы [11] и данные прямых экспериментов на лабораторной установке находятся в качественном и количественном согласовании, что дает основание говорить о правомерности предлагаемой расчетно-экспериментальной методики прогноза эффективности вихревого пылеуловителя для различных видов сыпучего материала на стадии разработки и проектирования вихревого пылеуловителя для конкретных видов пыли.

Использование предложенной методики позволяет упростить выбор конструктивных параметров вихревого пылеуловителя и сократить объемы его экспериментальной отработки.

1. *Лазарев В. А.* Циклоны и вихревые пылеуловители : справочник / *В. А. Лазарев*. – Н. Новгород : Фирма ОЗОН НН, 2006. – 320 с.
2. *Медников Е. П.* Вихревые пылеуловители / *Е. П. Медников*. – М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1975. – 45 с.
3. *Сажин Б. С.* Пылеуловители со встречными закрученными потоками / *Б. С. Сажин, Л. И. Гудим* // НИИТЭХИМ. – М., 1982. – Вып. 1(38). – 45 с.
4. *Сажин Б. С.* Вихревые пылеуловители / *Б. С. Сажин, Л. И. Гудим*. – М. : Химия, 1995. – 144 с.
5. [www.ptbvgstroy.ru/var/fck/file/vzp2.pdf](http://www.ptbvgstroy.ru/var/fck/file/vzp2.pdf).
6. *Островский Г. М.* Прикладная механика неоднородных сред / *Г. М. Островский*. – СПб. : Наука, 2000. – 359 с.
7. *Азаров В. Н.* Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий : автореф. дисс... докт. техн. наук : 05.26.01 / *Азаров Валерий Николаевич* ; Ростовский гос. ун-т. – 2004. – 46 с.
8. *Белоусов А. С.* Гидродинамика процессов с неоднородными структурами закрученных гетерогенных потоков в вихревых аппаратах : автореф. дисс... докт. техн. наук : 05.17.08 / *Белоусов Александр Сергеевич* ; Московский гос. текстильн. ун-т. – 2010. – 32 с.
9. *Старк С. Б.* Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве / *С. Б. Старк*. – М. : Металлургия, 1990. – 400 с.
10. *Кнышенко Ю. В.* Методика расчетной оценки эффективности вихревого пылеуловителя / *Ю. В. Кнышенко, А. Е. Дешко* // Техническая механика. – 2008. – № 1. – С. 64 – 72.
11. [www.orghim.lg.ua](http://www.orghim.lg.ua)

Институт технической механики  
НАН Украины и НКА Украины,  
Днепропетровск

Получено 17.10.2012,  
в окончательном варианте 26.10.2012