

Ю.В. КНЫШЕНКО, канд. техн. наук,

А.В. ОСАДЧИЙ

(Украина, Днепропетровск, Институт технической механики НАНУ и НКАУ)

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИХРЕВОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ

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, несущих наибольшую экологическую опасность.

В связи с этим представляют интерес появившийся в последние годы новый тип инерционных пылеотделителей – вихревых пылеулавливающих аппаратов со встречными закрученными потоками (ВЗП), имеющих повышенную эффективность инерционной сепарации из газового потока 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. И далеко не всегда расчетные оценки подтверждаются результатами испытаний. Поэтому актуальным является разработка такого метода оценки ожидаемой эффективности вихревого аппарата, который бы не требовал дополнительных испытаний в производственных условиях.

Схема пылеуловителя ВЗП показана на рис. 1. Вихревой пылеуловитель ВЗП состоит из: цилиндрического корпуса (1), включающего в себя непосредственно сепарационную и послесепарационную камеры и цилиндрический пылесборник (2) в нижней части аппарата.

Запыленный газ поступает в аппарат по двум вводам одновременно: первичный поток по осевому патрубку в нижней части аппарата (3), снабженному завихрителем (4), вторичный поток – по патрубку, расположенному в верхней части аппарата (5), где находится также осевой вывод очищенного газа (6). Поступивший в пылеуловитель запыленный газ закручивается завихрителем, под действием центробежных сил частички пыли перемещаются к стенкам цилинд-

Підготовчі процеси збагачення

рического аппарата, где попадают в зону вращения вторичного закрученного потока. Взаимодействие потоков газа усиливает центробежные силы, действующие на частицы пыли, которые эффективно отбрасывается и, достигая стенки цилиндрического корпуса, направляется в нижнюю часть аппарата (пылесборник) под отбойную шайбу. Очищенный газ выводится через осевой вывод вверху аппарата. Вращение потоков внутри аппарата имеет одно направление.

Результаты экспериментальных исследований аппаратов ВЗП [5] свидетельствуют о следующем.

1. Повышение расхода воздуха через пылеуловитель и средней скорости по его сечению способствует увеличению эффективности улавливания пыли. При этом наиболее эффективный режим работы наблюдается при средней скорости потока в плане аппарата свыше 4,5 м/с. Потери давления в аппарате ВЗП, как и для всех аппаратов центробежного действия, зависят от относительной скорости потока в поперечном сечении аппарата в квадратичной степени. При этом для аппаратов ВЗП возможно осуществлять подбор вентиляционного оборудования и производить его настройку так, чтобы получить наиболее приемлемый режим работы для конкретного производства. Например, при улавливании крупнодисперсной пыли среднюю скорость потока в плане аппарата можно принять 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.

2. Соотношение расхода очищаемого воздуха, подаваемого в нижний ввод Q_n , к общему расходу очищаемого воздуха Q оказывает существенное влияние на пылеулавливающую способность аппарата и на потери давления при очистке воздуха. Как следует из зависимостей, представленных на рис. 2 при соотношении расхода воздуха, подаваемого в нижний ввод к общему расходу очищаемого воздуха $Q_n/Q = 0,24$, значения эффективности пылеулавливания в аппарате ВЗП достигают максимальных значений, при этом потери давления в аппарате минимальны. Поэтому такой режим работы аппарата ВЗП можно считать оптимальным, как с точки зрения аэродинамических характеристик, так и по эффективности пылеулавливания.

3. В промышленных условиях важным фактором является стабильность работы пылеуловителей. При этом практически всегда происходит подсос воздуха в бункерную часть аппарата, расход очищаемого воздуха варьируется в широком диапазоне, дисперсный состав пыли меняется стохастически.

Циклонные аппараты имеют довольно узкий диапазон эффективной работы по всем перечисленным параметрам. Например, изменение в расходе газов у циклонов не должно превышать 10...12%. Для аппаратов ВЗП этот диапазон составляет 15...50%. Изменение концентрации пыли в пределах от 20 до 200 г/м³ не снижает эффективность этих аппаратов.

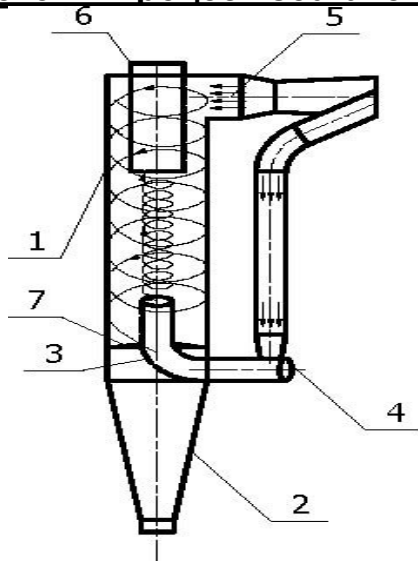


Рис. 1

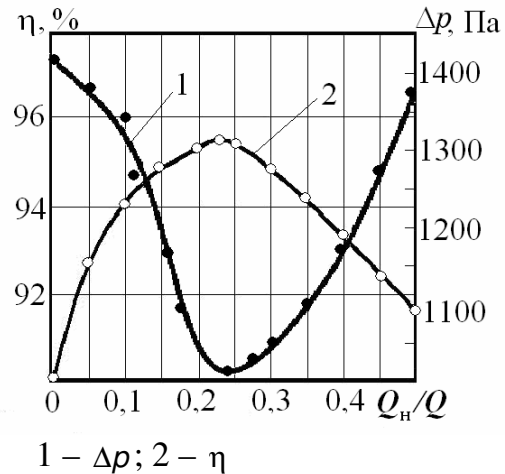


Рис. 2.

Из анализа имеющейся информации о методах сепарации пыли с помощью вихревых пылеотделителей вытекает, что максимальная эффективность их работы 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 $D_1 \approx D$;
- 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 до 40° ,
- форма и размеры отбойных шайб, устанавливаемых вблизи выходных и входных отверстий, снижающие вынос мелких частиц из бункера сбора отсепарированной пыли и увеличивающие скорость вращения потока вблизи выходного патрубка.

Увеличение геометрических размеров аппаратов (диаметров и высот), обусловленное увеличением их производительности, приводит к некоторому снижению эффективности пылеотделения.

Важнейшей характеристикой любого пылеотделительного устройства является расход энергии, обеспечивающий требуемую эффективность сепарации пыли из газового потока.

Известно, удельные энергозатраты на пылеотделение, численно равны гидравлическому сопротивлению аппарата. Поэтому основная задача любого инерционного пылеотделителя, в том числе и вихревого типа, состоит в достижении максимальной эффективности при минимальном гидравлическом сопротивлении аппарата. Как правило, эта задача решается экспериментально, путем совершенствования конструкции аппарата, его проточной части с учетом характеристик пылевых частиц.

Удельные энергозатраты на пылеотделение в циклонных аппаратах, рас-

Підготовчі процеси збагачення

считанные для циклона типа ЦН-15 диаметром 200 мм для частиц с эквивалентным диаметром 6-8 мкм при фракционной эффективности порядка 92...96%, находятся в пределах от 2 до 5 Вт·ч/м³. По данным работе [1] для оптимального соотношения расходов первичного и вторичного потоков удельные энергозатраты на пылеотделение находятся в пределах от 0,5 до 1,0 Вт·ч/м³ для частиц размером от 1 до 10 мкм при эффективности 95...99%

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.

Оценку ожидаемой эффективности для конкретного вида пыли на стадии разработки и проектирования аппарата можно способом, суть которого 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 (расходе воздуха и расчетном соотношении потоков по входам) экспериментально находится распределении угловых скоростей в сепарационном объеме. В результате этого находится конкретное значение минимального диаметра улавливаемой частицы.

Для расчетной оценки фракционной эффективности вихревого пылеуловителя рассмотрено движение частицы в плоском криволинейном потоке газа [6].

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. 3)

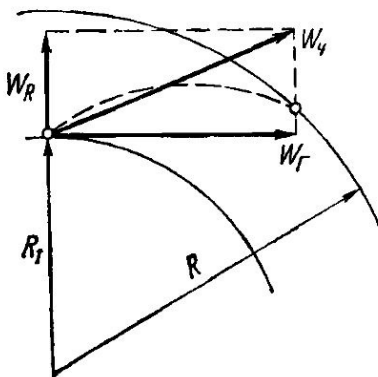


Рис. 3.

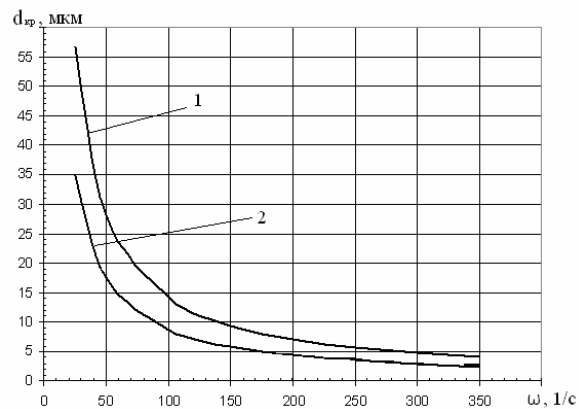


Рис. 4.

Движение частицы в радиальном направлении, на основании второго зако-

Збагачення корисних копалин, 2012. – Вип. 49(90)

Підготовчі процеси збагачення

на Ньютона описується дифференціальним уравнением:

$$\frac{MW_r^2}{R} - c_x \frac{\rho_r W_r^2}{2} F = M \frac{dW_r}{dt}, \quad (1)$$

где M – масса частицы; W_r – 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; ρ_r и ρ_q – плотности газа и пыли (частицы); t – время.

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

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

где $A = 18\mu/d^2 \rho_q$; $d^2 R/dt^2 = dW_r/dt$; $\omega = W_r/R$.

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

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

Положив, что вертикальная скорость воздуха в вихревом пылеуловителе определяется

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

Приняв, что скорость движения частиц равна скорости движения воздуха, что справедливо для частиц микронного размера, время движения частицы по высоте аппарата H будет

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

Приравняв правые части (3) и (4) получим значение минимального диаметра частиц d_{\min} , полностью улавливаемых в вихревом пылеуловителе

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

где $D_{\text{ан}} = 2R$ – диаметр аппарата; $D_{\text{тр}} = 2R_1$ – диаметр трубы с осевым завихрителем.

На рис. 4 приведены результаты расчетов по формуле (5) для двух значений плотности сыпучего материала: $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$ (кривая 1), что соответствует плотности пылевидных пищевых продуктов (муки различных видов), химических порошков, угольной пыли и др., и плотности $\rho = 3150 \text{ кг/м}^3$ (кривая 2), что относится к плотности цемента, металлургических пылей. Расчеты проведены для следующих конструктивных параметров установки $D_{\text{ан}} = 0,2 \text{ м}$, $D_{\text{ан}} / D_{\text{тр}} = 2$, $H / D_{\text{ан}} = 1,81$ и средней скорости газа по сечению аппарата $W_y = 5 \text{ м/с}$.

Для использования зависимости (5) необходимо знание угловой скорости вращения газового потока. В расчетном методе определения фракционной эффективности вихревого пылеуловителя, предложенном в работе [7] 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 как в свободном вихре. В данной работе распределение угловых скоростей вращения газового потока предлагается определять экспериментально при продувке чистого воздуха на полномасштабном макете вихревого пылеуловителя. На рис. 5 приведена схема модельного вихревого пылеуловителя [8]. Геометрические параметры его соответствуют описанным выше. Эксперименты по определению угловой скорости воздушного потока без пыли проводились при расходах соответствующих условиям, при работе пылеотделителя на запыленном потоке.

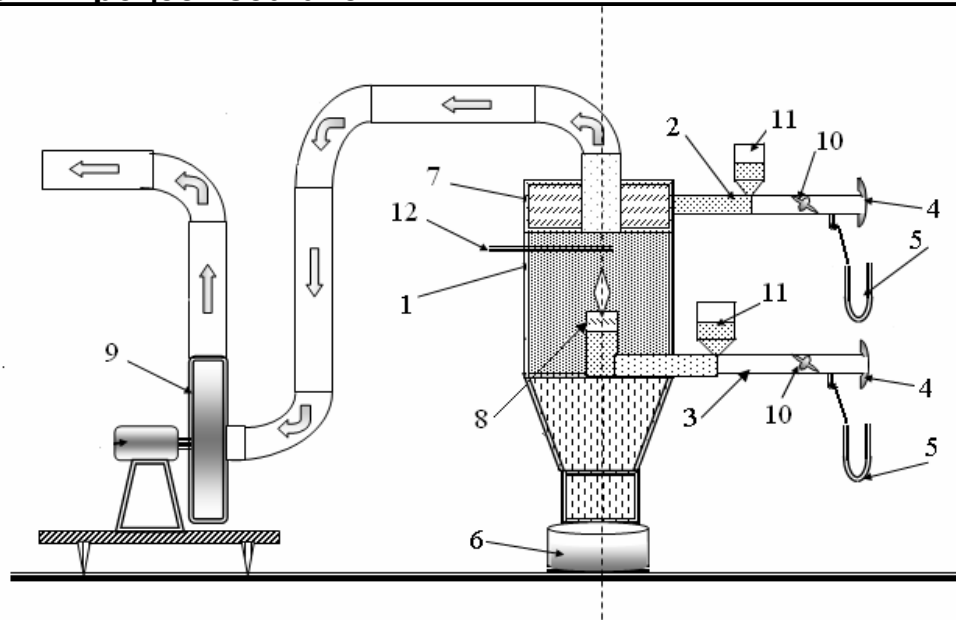


Рис. 5. Схема модельного вихревого пылеуловителя:

1 – корпус пылеотделителя; 2, 3 – всасывающие трубопроводы;
 4 – спрямляющие устройства; 5 – микроманометры; 6 – пылесборник; 7, 8 – завихрители;
 9 – вентилятор; 10 – заслонка; 11 – узлы загрузки пыли; 13 – приемники статического
 давления; 12 – термоанемометрический датчик скорости воздуха в сепарационной зоне

На рис. 6 представлено распределение угловой скорости движения воздуха по диаметру сепарационного объема вихревого пылеуловителя полученное экспериментально при различных расходах.

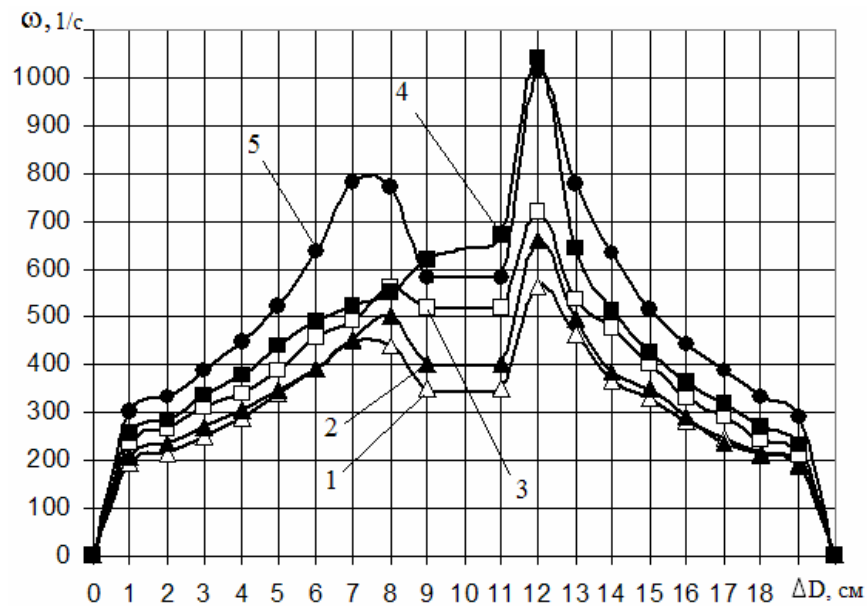


Рис. 6. Распределение угловой скорости движения воздуха по диаметру сепарационного объема вихревого пылеуловителя: кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют $Q = 502; 543; 647; 724; 1041 \text{ м}^3/\text{ч}$

Підготовчі процеси збагачення

Полагая, что решающее значение на сепарацию пыли из газового потока имеет угловая скорость вблизи стенки аппарата применительно к сепарации цемента по формуле (5) рассчитаны значения минимального диаметра частиц пыли, которые могут быть уловлены данным пылеуловителем. Полученные результаты представлены в таблице.

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

Приведенные данные свидетельствуют, что изменение расхода воздуха в два раза практически не влияет на величину минимального диаметра улавливаемой пыли. Опираясь на эти данные и располагая кривой гранулометрического состава конкретной пыли, подлежащей улавливанию, можно спрогнозировать эффективность пылеуловителя данной конструкции

Применительно к грансоставу цемента марки М500, приведенному на рис. 7 [9] и опираясь на значения минимальных диаметров (таблица) находим процентное содержание частиц которые не будут уловлены пылеуловителем (в приведенном примере это примерно 6...7%). Таким образом, ожидаемая эффективность данного пылеуловителя составляет для условий цемента с приведенным грансоставом примерно 93...94%.

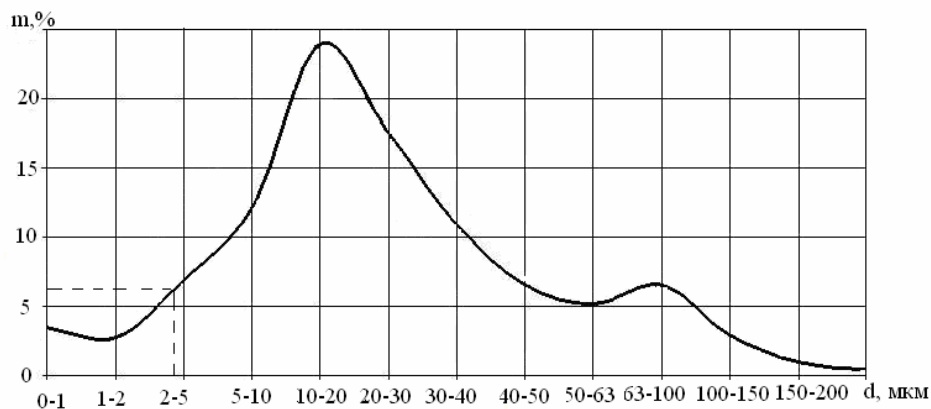


Рис. 7. Гранулометрический составу цемента марки М500

Эти данные хорошо коррелируют с результатами экспериментов для вихревого пылеуловителя диаметром 200 мм при сепарации цемента, известными из литературы [10]. Для верификации представленного расчетно-экспериментального метода оценки эффективности вихревого пылеуловителя

Підготовчі процеси збагачення

были проведены эксперименты по улавливаю цементной пыли на описанной выше установке.

Эффективность пылеулавливания определяется по массе уловленной пыли M_y :

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

Контроль массового расхода твердой фазы во время экспериментов определяется взвешиванием дозы твердой фазы до эксперимента и остатка после эксперимента. Масса уловленной пыли определяется взвешиванием твердой фазы из пылесадительной камеры.

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 [6]. Исследуемая порция цемента массой 200 г загружалась во вторичный воздушный поток. Испытания проводились при двух крайних значениях объемного расхода воздуха. Расход твердой фазы составлял 5 г/с. Степень запыленности воздуха для минимального расхода составляла 35 г/м³, а для максимального – 17 г/м³. При минимальном расходе воздуха эффективность пылеулавливания составила 88,5%, при максимальном – 89,7%. Прямое сопоставление этих данных с полученными в работе [10] некорректно, поскольку в указанной работе не приведена марка цемента и ее гранулометрический состав. Следует отметить также, что гранулометрический состав испытываемого цемента также не является полностью достоверным, а определен из литературных данных.

В целом расчетно-экспериментальные данные, полученные на основании экспериментов на чистом воздухе, экспериментальные результаты из работы [10] и данные прямых экспериментов на лабораторной установке находятся в качественном и количественном согласовании, что дает основание говорить о правомерности предлагаемой расчетно-экспериментальной методике прогноза эффективности вихревого пылеуловителя для различных видов сыпучего материала на стадии разработки и проектирования вихревого пылеуловителя для конкретных видов пыли.

Список литературы

1. Лазарев В.А. Циклоны и вихревые пылеуловители : справочник. – Н. Новгород: Фирма ОЗОН НН, 2006. – 320 с.
2. Медников Е.П. Вихревые пылеуловители. – М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1975. – 45 с.
3. Сажин Б.С., Гудим Л.И. Пылеуловители со встречными закрученными потоками // НИИТЭХИМ. – М., 1982.– Вып. 1(38). – 45 с.
4. Сажин Б.С., Гудим Л.И. Вихревые пылеуловители. – М.: Химия, 1995. – 144 с.
5. www.ptbvgstroy.ru/var/fck/file/vzp2.pdf

Підготовчі процеси збагачення

6. Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве. – М.: Металлургия, 1990. – 400 с.
7. Кнышенко Ю.В., Дешко А.Е. Методика расчетной оценки эффективности вихревого пылеуловителя // Техническая механика. – 2008. – № 1. – С. 64-72.
8. Пат. на винахід 71057 Україна, МПК В04С3/00, В04С5/18. Вихровий пиловловлювач / В.І. Тимошенко, Ю.В. Книшенко, Ю.Г. Ляшенко; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – 2002086574; заявл. 07.08.2002; опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11. – 3 с.
9. Влияние ПАВ (суперпластификаторов и пеообразователей) на размолоспособность портландцемента и наполнителей / В.Г. Хозин, О.В. Хохряков, М.И. Якупов и др. // Научный вестник строительства – ХДГУБА, ХОТЬ АБУ. – Харків, 2010. – Вип. 59. – С. 78-90.
10. www.orghim.lg.ua

© Кнышенко Ю.В., Осадчий А.В., 2012

*Надійшла до редколегії 12.02.2012 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*