

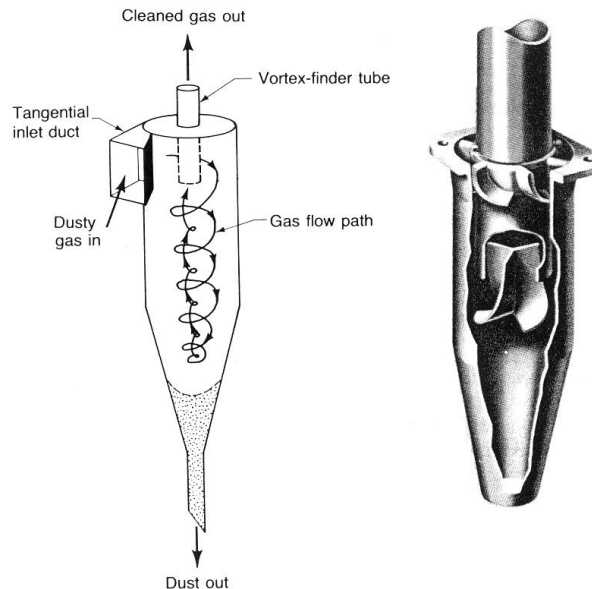
Ciclones

(adaptado de *control de la contaminación atmosférica* por C. D. Cooper y F.C. Callejón, 1986)

1. Introducción

Los separadores ciclónicos se han utilizado en los Estados Unidos por cerca de 100 años, y siguen siendo uno de los dispositivos industriales de la gas-limpieza más utilizados. Las razones principales del uso extenso de ciclones son que son baratos de comprar, no tienen ninguna pieza móvil, y pueden ser construidos para soportar condiciones de funcionamiento ásperas. Típicamente, un gas de partículas entra tangencialmente cerca de la tapa del ciclón, según lo demostrado esquemáticamente en el cuadro 1. El flujo del gas es forzado en un espiral hacia abajo debido a la entrada tangencial. Otro tipo de ciclón (un ciclón paleta-axial, vea que el panel derecho del cuadro 1) emplea una entrada axial con las paletas que dan vuelta fijas para alcanzar un flujo que tuerce en espiral. La fuerza y la inercia centrífugas causan que las partículas se muevan hacia fuera, chocan con la pared externa, y después resbalan hacia abajo hacia el fondo del dispositivo. Cerca del fondo del ciclón, el gas invierte su espiral hacia arriba y se mueve hacia arriba en un espiral interno más pequeño. El gas limpio sale de la tapa a través de un vortex-buscador, el tubo, y las partículas salen del fondo del ciclón a través de una pipa sellada por una válvula de aleta por resorte o una válvula rotatoria.

Cuadro 1



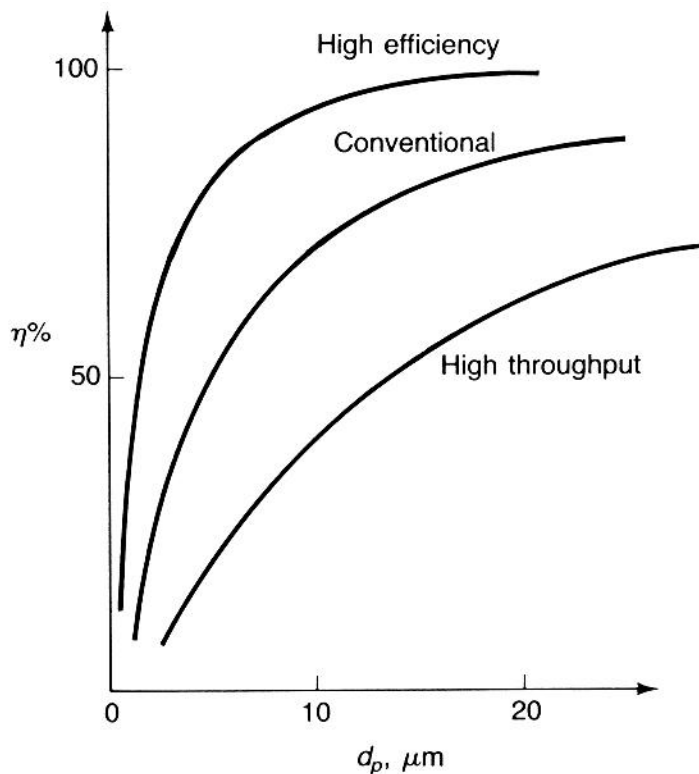
Los ciclones por sí mismos no son generalmente adecuados para resolver regulaciones rigurosas de la contaminación atmosférica, sino que responden a un propósito importante. Su costo de capital bajo y su operación sin necesidad de mantenimiento los hacen ideales para el uso como pre-limpiadores para dispositivos finales más costosos del control tales como baghouses o precipitators electrostáticos. Además del uso para el trabajo del control de la contaminación, los ciclones se utilizan extensivamente en industrias de proceso; por ejemplo, se utilizan para recuperar y reciclar ciertos

catalizadores en refinerías del petróleo y para recuperar el café liofilizado en plantas de la transformación de los alimentos.

En el pasado, los ciclones se han mirado a menudo como colectores de la bajo-eficacia. Sin embargo, la eficacia varía grandemente con tamaño de partícula y con diseño del ciclón. Durante la última década, el trabajo de diseño avanzado ha mejorado grandemente funcionamiento del ciclón. ¿La literatura actual de algunos de los fabricantes del ciclón anuncia el ciclón que tienen eficacias mayor el de 98% para las partículas más en gran parte de 5 micrones, y otros que alcancen rutinariamente eficacias de el 90% para las partículas más en gran parte de 15? 20 micrones.

De general, los gastos de explotación aumentan con eficacia (sobre todo debido a las gotas de presión más altas requeridas), y tres categorías de ciclones están disponibles: eficacia, convencionales altos, y alto rendimiento de procesamiento. Las curvas generalizadas de la eficacia para estos tres tipos de ciclones se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2



Nota: La eficacia contra tamaño curva las actuales amplias generalizaciones, relaciones no exactas.

Las ventajas de ciclones son:

1. Coste de capital bajo
2. Capacidad de funcionar en las altas temperaturas
3. Requisitos de mantenimiento bajos porque no hay piezas móviles.

Las desventajas de ciclones son:

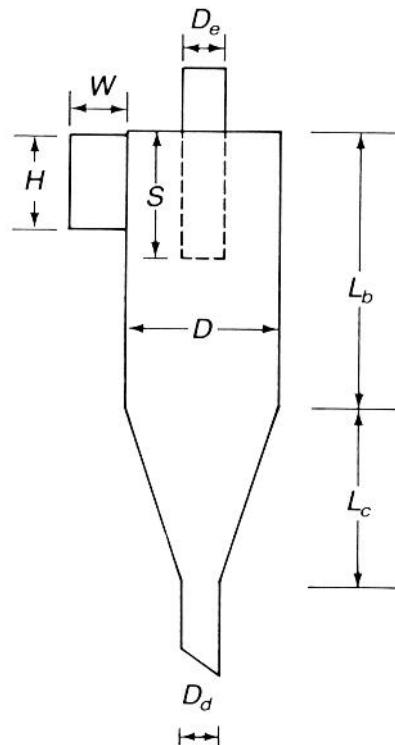
1. Bajos rendimientos (especialmente para las partículas muy pequeñas)
2. Altos gastos de explotación (debido a la energía requerida para superar gota de presión).

Tabla 1 Dimensiones estándar del ciclón

	Tipo Del Ciclón					
	Eficacia Alta		Convencional		Alto Rendimiento de procesamiento	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Diámetro Del Cuerpo, D/D	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Altura de la entrada, H/D	0,5	0,44	0,5	0,5	0,75	0,8
Anchura de la entrada, W/D	0,2	0,21	0,25	0,25	0,375	0,35
Diámetro de la salida del gas, D_e/D	0,5	0,4	0,5	0,5	0,75	0,75
Longitud del buscador del vórtice, S/D	0,5	0,5	0,625	0,6	0,875	0,85
Longitud del cuerpo, L_b/D	1,5	1,4	2,0	1,75	1,5	1,7
Longitud del cono, L_c/D	2,5	2,5	2,0	2,0	2,5	2,0
Diámetro del enchufe del polvo, D_d/D	0,375	0,4	0,25	0,4	0,375	0,4

FUENTES: Columnas (1) y (5) = Stairmand, 1951; columnas (2), (4) y (6) = Swift, 1969; columnas (3) = Lapple, 1951.

Cuadro 3



Fuente: Lapple, 1951

Dimensiones Estándares Del Ciclón

El trabajo extenso se ha hecho para determinarse en qué dimensiones de la manera de ciclones afectan funcionamiento. ¿En un cierto trabajo clásico que todavía se utiliza hoy, el óptimo resuelto de Shepherd y de Lapple (1939, 1940)? dimensiones para los ciclones. Todas las dimensiones fueron relacionadas con el diámetro del cuerpo del ciclón de modo que sus resultados se pudieran aplicar generalmente. ¿Los investigadores subsecuentes divulgaron el trabajo similar, y el?standard supuesto? los ciclones fueron llevados. La tabla 1 resume las dimensiones de los ciclones estándares de los tres tipos mencionados previamente. El cuadro 3 ilustra las varias dimensiones usadas en la tabla 1.

2. Teoría

Eficacia De la Colección

Un modelo muy simple se puede utilizar para determinar los efectos del diseño y de la operación del ciclón en eficacia de la colección. En este modelo, el gas hace girar con un número de revoluciones N_e en el vórtice externo. El valor de N_e puede ser aproximado cerca

$$N_e = \frac{1}{H} \left[L_b + \frac{L_c}{2} \right]$$

donde

N_e = número de vueltas eficaces

H = altura del conducto de la entrada (m o pie)

L_b = longitud del cuerpo del ciclón (m o pie)

L_c = longitud (vertical) del cono del ciclón (m o pie).

Ser recogido, las partículas deben pulsar la pared dentro de la cantidad de tiempo que el gas viaja en el vórtice externo. *El tiempo de residencia del gas adentro él vórtice externo está*

$$\Delta t = 2\pi R N_e / V_i$$

donde

Δt = tiempo de residencia del gas (sec)

R = radio del cuerpo del ciclón (m o pie)

V_i = velocidad *de la entrada* del gas (m/s o ft/s).

La distancia radial máxima viajó por cualquier partícula es la anchura del conducto *W de la entrada*. La fuerza centrífuga acelera rápidamente la partícula a su velocidad terminal en la dirección (radial) exterior, con la fuerza de fricción de oposición igualando la fuerza centrífuga. La velocidad terminal que apenas permitirá que una partícula sea recogida en tiempo Δt es

$$V_i = W / \Delta t$$

donde V_t = velocidad terminal de la partícula en la dirección radial (m/s o ft/s).

La velocidad terminal de la partícula es una función del tamaño de partícula. Asumiendo alimenta flujo del régimen y las partículas esféricas sujetadas a una fuerza centrífuga, obtenemos

$$V_t = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g) V_i^2}{18 \mu R}$$

donde

- V_t = velocidad terminal (m/s o ft/s)
- d_p = diámetro de la partícula (m o pie)
- ρ_p = densidad de la partícula (kg/m³)
- μ = viscosidad del gas (kg/m.s)
- ρ_g = densidad del gas (kg/m³).

La substitución de la 2da ecuación en la 3ro elimina Δt . Entonces, fijando las dos expresiones para V_t iguale el uno al otro y cambiando para solucionar para el diámetro de la partícula, obtenemos

$$d_p = \left[\frac{9 \mu W}{\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)} \right]^{1/2}$$

Vale el observar de eso en esta expresión, d_p es el tamaño de la partícula más pequeña que será recogida si comienza en el borde interior del conducto de la entrada. Así, en teoría, todas las partículas del tamaño d_p o más grande debe ser recogido con la eficacia 100%.

Observe que en Eqs. (2) - (5), las unidades debe ser constante. Un sistema constante es m para d_p , R y W ; m/s para V_i y V_t ; kg/m.s para μ ; y kg/m³ para ρ_p y ρ_g . Un sistema equivalente en unidades acostumbradas inglesas es pie para d_p , R y W ; ft/sec para V_i y V_t ; libra m/ft.sec para μ ; y libra m/pie³ para ρ_p y ρ_g .

3. Consideraciones Del Diseño

Eficacia De la Colección

De la ecuación precedente, vemos entre que, en teoría, el diámetro más pequeño de las partículas recogidas con la eficacia 100% está relacionado directamente con la anchura del conducto de la viscosidad y de la entrada del gas, y relacionado inverso con el número de vueltas, de la velocidad del gas de la entrada, y de la diferencia eficaces de la densidad las partículas y el gas. En la práctica, la eficacia de la colección, en hecho, depende de estos parámetros. Sin embargo, el modelo tiene un defecto importante:

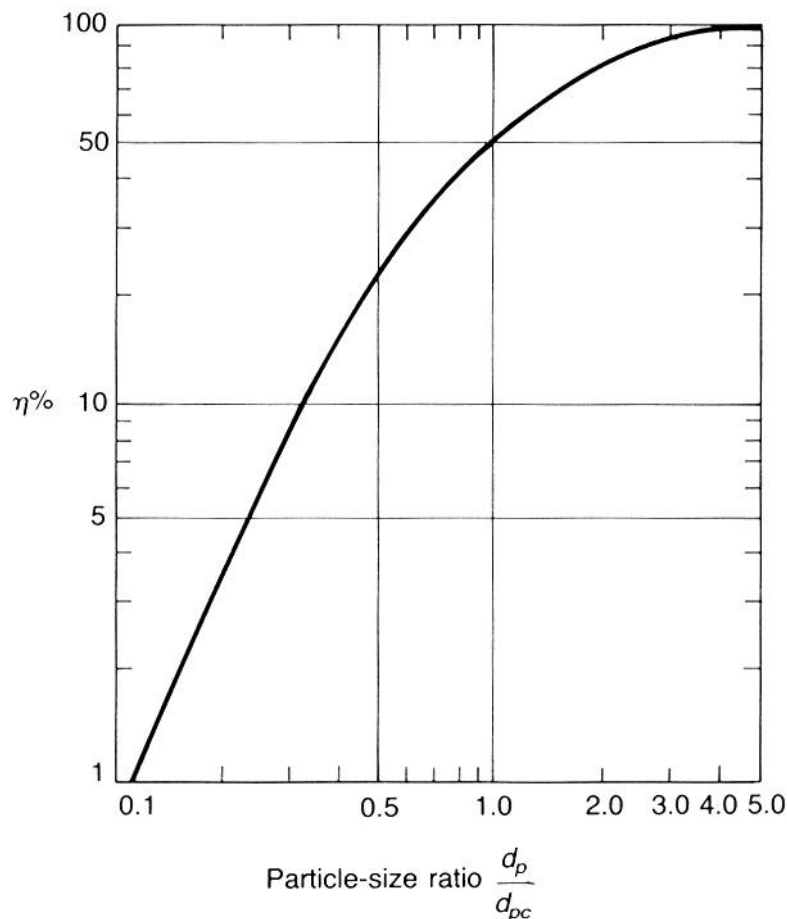
predice que *todas las* partículas más grandes que d_p será recogido con la eficacia 100%, que es incorrecta.

Lapple (1951) desarrolló una relación semi-empírica para calcular un 50% cortado diámetro d_{pc} cuál es el diámetro de las partículas recogidas con la eficacia del 50%. La expresión es

$$d_{pc} = \left[\frac{9\mu W}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)} \right]^{1/2}$$

donde d_{pc} = el diámetro de la partícula recogió con la eficacia del 50%.

Cuadro 4. Eficacia de la colección de la partícula contra el cociente del tamaño de partícula para los ciclones convencionales estándares



Observe la semejanza entre las dos ecuaciones pasadas. (la única diferencia es un factor 2 en el denominador.) Lapple entonces desarrolló una curva general para que los ciclones convencionales estándares predigan la eficacia de la colección para cualquier

tamaño de partícula (cuadro 4). Si la distribución de tamaño de partículas se sabe, la eficacia total de la colección de un ciclón puede ser predicha usando el cuadro 4. Theodore y DePaola (el año 80) han cabido una ecuación algebraica para figura 4, que hace el acercamiento de Lapple's más exacto y más conveniente para el uso a las computadoras. La eficacia de la colección de cualquier tamaño de la partícula se da cerca

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left(d_{pc} / \bar{d}_{pj} \right)^2}$$

donde

η_j = eficacia de la colección para *la gama* del tamaño de partícula del th de j (en μm)

d_{pj} = diámetro característico *de la gama* del tamaño de partícula del th de j (en μm).

La eficacia total del ciclón es un promedio cargado de las eficacias de la colección para las varias gamas del tamaño, a saber

$$\eta_o = \frac{\sum \eta_j m_j}{M}$$

donde

η_o = cabalmente eficacia de la colección,

m_j = fórmese de partículas en *la gama* del tamaño del th de j,

M = masa total de partículas.

El uso de las ecuaciones anteriores se ilustra en el uso abajo.

Uso

Considere un ciclón convencional de proporciones estándares según lo descrito por Lapple (columna (3) de la tabla 1), con un diámetro del cuerpo de 1,0 m. Para el aire con un caudal de $150 \text{ m}^3/\text{minuto}$ en $T = 350 \text{ K}$ y 1 atmósfera, conteniendo partículas con una densidad de 1600 kg/m^3 y una distribución de tamaño según lo dado abajo, calcula la eficacia total de la colección.

Gama Del Tamaño De Partícula, μm	Por ciento totales en gama del tamaño
0 - 2	1,0
2 - 4	9,0
4 - 6	10,0
6 - 10	30,0
10 - 18	30,0
18 - 30	14,0

30 - 50
50 - 100

5,0
1,0

SOLUCIÓN:

Primero, calculamos d_{pc} . Para esto, tomamos la viscosidad del gas igual a 0,075 kg/m.hr y a la densidad del gas como 1,01 kg/m³. La velocidad de la entrada es

$$V_i = \frac{150m^3}{\text{min}} \times \frac{1}{(0.5m)(0.25m)} = \frac{1200m}{\text{min}}$$

Para un ciclón estándar de Lapple, $N_e = 6$ y

$$d_{pc} = \left[\frac{9 \left(0.075 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{hr}} \right) (0.25m)}{2\pi(6) \left(1200 \frac{\text{m}}{\text{min}} \right) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} \right) \left[(1600 - 1) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} \right]^{1/2}$$

$$d_{pc} = 6.26(10)^{-6} m = 6.3 \mu\text{m}$$

Después, determinamos la eficacia de la colección para cada gama del tamaño del cuadro 4 o la ecuación de acompañamiento. El punto mediano aritmético de la gama se utiliza a menudo como el tamaño de partícula característico. Es conveniente proceder con la construcción de una tabla, como sigue.

j	Gama Del Tamaño, μm	$\bar{d}_{pj}, \mu\text{m}$	\bar{d}_{pj} / d_{pc}	η_j	$\frac{m_j}{M}, \%$	Los Por ciento Totales Recogieron $\eta_j \frac{m_j}{M}, \%$
1	0 - 2	1	0,159	0,025	1,0	0,02
2	2 - 4	3	0,476	0,185	9,0	1,66
3	4 - 6	5	0,794	0,39	10,0	3,9
4	6 - 10	8	1,27	0,62	30,0	18,6
5	10 - 18	14	2,06	0,81	30,0	24,3
6	18 - 30	24	3,81	0,94	14,0	13,2
7	30 - 50	40	6,35	0,98	5,0	4,9
8	50 - 100	75	11,9	0,99	1,0	1,0
						67.6%

Finalmente, según lo demostrado en la tabla,

$$\eta_o = \sum_{j=1}^8 \frac{\eta_j m_j}{M} = 67.6\%$$

La eficacia total de la colección de este ciclón para esta mezcla aire-de partículas particular es el aproximadamente 68%, o 0,68.