

Correlación del factor R_i en lechos de base cónica para fluidización de carbón en aire

Karina Martinez¹, Cezar Garcia^{2,3}, Jose Gonzalez⁴, Juan Hernandez⁴ y Gabriela Carruyo⁴.

¹Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela. karinaisabelmartinez@hotmail.com

²División de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia.

³Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Rafael Urdaneta.

⁴Laboratorio de Carbón, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia.

Recibido: 19-06-2019

Aceptado: 22-10-2019

Resumen

El objetivo de esta investigación fue obtener una correlación generalizada para una columna de base plana y cónica para fluidización en aire del carbón proveniente de la mina Cerrejon. Se determinaron las propiedades de fluidización, velocidad mínima y caída de presión en un lecho de forma cilíndrica y base cónica con ángulos de 30, 45 y 60 grados, incorporando un distribuidor tipo sombrero, variando la altura del lecho y el tamaño de partículas de carbón con granulometrías de -20+40, -45+50, -40+90. La comparación entre datos experimentales y calculados indica que su aplicabilidad está limitada a los efectos cilíndricos de base plana y al sistema fluido-sólido correspondiente, exceptuando la correlación de Wen Yu que mostró desviaciones de 0.34% para $D_i/D_c=0.6053$ y 6.96% para $D_i/D_c=0.2763$. Las pruebas realizadas muestran que al incrementarse el valor de la relación diámetro del distribuidor al diámetro del cono D_i/D_c , el valor de la velocidad disminuye en esa medida.

Palabras clave: Fluidización, velocidad mínima, sistema gas-sólido, carbón Cerrejon.

Correlation of R_i factors in beds of conic base for air-coal fluidization

Abstract

The objective of this research was to obtain a generalized correlation for a flat base column and conical for fluidization in air of coal from the mine Cerrejon. Properties of fluidization, minimum velocity and pressure drop in a bed of cylindrical form and conical base were determined with angles of 30, 45 and 60 degrees, incorporating a cap type distributor, varying the bed height and size of coal particles with particle sizes of -20 +40, -45 +50, -40 +90. The comparison between experimental and calculated data indicates that its applicability is limited to flat-bottomed cylindrical effects and the corresponding fluid-solid system, except the correlation of Wen Yu who showed deviations of 0.34% for $D_i/D_c=0.6053$ and 6.96% for $D_i/D_c = 0.2763$. Tests show that by increasing the value of the ratio diameter of the distributor to the diameter of the cone D_i/D_c , the value of the velocity decreases to that extent.

Keywords: Fluidization, minimum velocity, gas solid system, Cerrejon coal.

Introducción

El desarrollo de técnicas de manipulación de sólidos ha permitido el establecimiento de nuevos procesos químicos, la comercialización exitosa de los sólidos fluidizados en la industria del petróleo, en la gasificación del carbón y en la extracción de metales entre otros. La habilidad operacional del lecho fluidizado para aproximarse a condiciones isotérmicas es una ventaja vigente de control de temperatura sobre otras maneras de conducir procesos de conversión de energía, física o química (1-5)

Debido a los fenómenos de transporte de momento de los sólidos y los fluidos, además de los procesos de transferencia de calor y masa, se dificulta la obtención de criterios uniformes de diseño para lechos fluidizados. El diseño a gran escala de lechos fluidizados se basa primordialmente en experiencias y en pruebas de ensayo y error con los carentes criterios de diseño uniforme (6-8)

Muchas investigaciones han demostrado que el contacto gas-sólido es más eficiente en la vecindad del distribuidor que en niveles superiores del lecho, por lo que es importante su diseño en el comportamiento físico y químico del lecho. Es así como Manieh et al. (9) en 1976 estudiaron la velocidad mínima de fluidización para partículas de mineral de carbón del Guasare y hierro de Matanzas utilizando como agentes fluidizantes aire y agua y una base cónica de 80°. Ellos concluyeron que la velocidad mínima de fluidización aumenta con el diámetro de la partícula, con la altura y el peso del lecho, con la densidad de los sólidos y con la densidad y velocidad del fluido. A pesar de usar geometría de base de lecho cónica no incluyeron esta variable en el modelo matemático.

Por otra parte, García et al. (10) estudiaron las propiedades de fluidización del mineral de hierro de Matanzas en lechos cilíndricos de base cónica usando aire como agente fluidizante para partículas con tamaños entre los tamices 30 y 50, con factor de forma 0.94 y porosidad del lecho estático de 0.39. Entre las variables analizadas se incluyen columnas con diferentes relaciones diámetro del distribuidor y diámetro de columna. Los resultados experimentales demuestran que la disminución de la relación Distribuidor/Columna determina una mayor velocidad de fluidización y una disminución en la caída de presión.

Ferrer (11) estudió los mecanismos de transferencia de momento en lechos fluidizados de base cónica, formulando un modelo matemático que toma en cuenta como variable la geometría cónica del lecho, donde concluye que las correlaciones para determinar los valores de velocidad mínima de fluidización dados por la literatura sólo son aplicables a los lechos cilíndricos de base plana con algunas excepciones; con respecto al ángulo del cono, el que represento un proceso uniforme de fluidización fue el ángulo de 45°.

Debido a lo antes expuesto se considera estudiar las condiciones mínimas de fluidización en lechos de base cónica, con tres ángulos de cono diferentes, variando el diámetro de partículas del carbón proveniente de las minas del Cerrejón para determinar el mejor ángulo de cono que permita un régimen de fluidización uniforme y establecer un modelo matemático que tome en cuenta los parámetros involucrados en esta modificación del diseño del equipo de fluidización.

Metodología

El desarrollo del proceso experimental consiste en determinar para cada geometría cónica los parámetros de velocidad lineal y caída de presión con la finalidad de determinar las condiciones mínimas de fluidización, en función de variables, diámetro del cilindro diámetro del distribuidor, altura del lecho de carbón y granulometría.

Las pruebas de fluidización se realizan usando carbón mineral extraído de las minas del Cerrejón con granulometría de -20+40, -45+50 y -40+90. El agente fluidizante es aire y se efectúan pruebas con carga de mineral en tres recipientes cónicos de 60°, 45° y 30° y en base plana; todas las pruebas se hacen por triplicados.

1.1 Parámetros del proceso de fluidización

Para cada tamaño de partícula en el lecho de la base cónica se analiza el efecto de la altura: 2; 3.5; 5; 7 y 9 cm por intermedio de la variación de la velocidad del agente fluidizante con un rango entre 4.25 y 37.38 m³/h y la caída de presión para cada uno de los ángulos de la base cónica. Este procedimiento se realiza para cada granulometría hasta obtener la relación entre la caída de presión y la velocidad. Posteriormente se procede a la construcción de la columna de fluidización con el siguiente ángulo de la base cónica y se repiten los ensayos. Finalmente se incorporara el efecto comparativo para las diferentes granulometrías para los lechos cilíndricos de base plana a las mismas condiciones operacionales

1.2. Propiedades Físicas

- i. Agente fluidizante: aire atmosférico, densidad, viscosidad absoluta.
- ii. Sólido a fluidizar: Carbón Mineral, Densidad, porosidad, esfericidad (factor de forma) y diámetro promedio.

Las determinaciones del caudal se realizarán mediante un rotámetro estándar previamente calibrado y la caída de presión mediante un manómetro diferencial en U conectado uno en la parte cónica y el otro a la parte cilíndrica y conteniendo agua como líquido indicador.

1.3 Unidad de Fluidización

La unidad de fluidización del mineral de carbón, se encuentra constituida por: una caja de aire o soplado, un soporte de lecho, una sección cónica y una sección cilíndrica además de las tuberías de conexión al compresor, el rotámetro y el manómetro diferencial.

Descripción del equipo de fluidización

a. Caja de aire: La caja de aire o de soplado, esta formada por dos secciones, una a continuación de la otra. Una sección cilíndrica y otra cónica la cual está ubicada debajo de la malla de soporte. La caja de soplado tiene por función distribuir el flujo del agente fluidizante de una forma más uniforme sobre la malla de soporte

b. Envase del lecho: Está constituido por una sección inferior cónica con la relación de diámetro del distribuidor al diámetro de la sección cilíndrica constante, seguida de una sección cilíndrica de 120 cm de altura y 38 cm de diámetro.

c. Tope: Consiste de una tapa en forma cónica con un orificio en la parte superior externa y una campana en su parte interna, la cual sirve para evitar el arrastre de las partículas hacia el medio exterior.

d. Tomas de presión y velocidad: Se encuentran colocadas a lo largo de todo el equipo, tanto en la sección cilíndrica como en el cono.

Calibración del rotámetro

Consiste en tomar el cilindro de vidrio y colocar un flotador capaz de medir el rango de velocidades necesario para el desenvolvimiento de los ensayos experimentales luego se procede a medir con un medidor de velocidad lineal o un medidor de volumen húmedo el 10% del caudal máximo fijado inicialmente para los ensayos o pruebas, luego se procede a graduar el cilindro de vidrio hasta llegar al 100% del caudal máximo.

1.4 Selección y caracterización del mineral

Selección del tamaño de las partículas

Para lograr obtener los resultados adecuados del experimento para el mineral escogido, se necesitará primero fijar una técnica adecuada de preparación y selección de las muestras. Este proceso de preparación conlleva a una serie de etapas tales como: reducción mecánica del tamaño de partículas, tamizado y separación de fracciones con el propósito de elaborar muestras representativas en cantidad y calidad

Caracterización del mineral

- a. Determinación de la densidad

La densidad del mineral de carbón se determinará por el método del desplazamiento miscible. El cual consiste en medir un volumen de un líquido de densidad menor al sólido, luego se procede a medir el peso de la muestra previamente secada a 105°C, se agrega a un cilindro graduado y se observa el volumen de líquido desplazado el cual representa el volumen real de sólido.

$$\rho_r = \frac{m}{V_b - V_d} \quad (1)$$

Donde:

ρ_r = Densidad real del sólido, gr/ml

V_{L_0} = Volumen inicial del líquido, ml.

V_d = Volumen desplazado, ml

m = Peso de la muestra, gr

b. Determinación de la fracción vacía.

La fracción de vació se determina por un método similar al de la densidad que consiste en medir el volumen desplazado por el sólido usando un líquido de menor densidad, dicho valor representa el volumen real que ocupa el sólido y luego se mide el volumen aparente determinándose el volumen ocupado por los intersticios o volumen vació midiendo dicho volumen se conoce la fracción de vació por la relación entre el volumen vació y el volumen aparente.

$$\epsilon = \frac{V_{\text{vacío}}}{V_{\text{aparente}}} = \frac{V_{\text{aparente}} - V_{\text{real}}}{V_{\text{aparente}}} \quad (2)$$

c. Determinación del factor de forma

El factor de forma se determina a partir de la densidad real y el peso de una partícula de carbón, éste se obtiene por la media aritmética del peso de mil partículas escogidas aleatoriamente. Una vez obtenido el peso promedio se divide por la densidad real del sólido y así se obtiene el volumen promedio de una partícula. Luego se calcula el volumen de una partícula esférica con un diámetro promedio igual al promedio de la abertura de los dos tamices donde quedan atrapadas las partículas, según la siguiente expresión:

$$V_e = \frac{\pi * D_p^3}{6} \quad (3)$$

Una vez obtenidos ambos volúmenes descritos anteriormente se calculó el factor de forma por la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{V P}{V e} \quad (4)$$

Resultados y Discusión

Los principales parámetros para el diseño de una unidad de fluidización son la velocidad mínima de fluidización y la caída de presión, no solo para el diseño sino para su operación. Se han demostrado las ventajas de esta técnica en lo que respecta al intercambio o transferencia tanto de masa como de calor, sin embargo la geometría del equipo, tamaño y esfericidad de partícula y la buena distribución del fluido en la base o soporte de lecho producen variaciones o afecta significativamente la velocidad relativa fluido-sólido

Selección de la muestra

Luego de cumplidas las etapas de reducción mecánica y tamizado se obtuvo la proporción de diámetros que se indica en la tabla 1. De los resultados obtenidos se puede apreciar que el mayor porcentaje de partículas de carbón esta en el rango de diámetros de granulometría de 40, 50 y 90 mesh.

Tabla 1. Análisis granulométrico de las partículas de carbón

Tamiz (mesh)	Tamiz (mm)	Peso (gr)	%Retenido	%Acumulado
20	0.841	1250	4.00	4.00
40	0.420	5843	18.73	22.73
45	0.354	3615	11.59	34.32
50	0.297	6021	19.30	53.62
30	0.160	11450	36.70	90.32
Receptor		2025	6.49	96.81
Pérdida		996	3.19	100
Total		31200	100	

Propiedades físicas de la muestra

Siguiendo la metodología experimental se obtuvieron a partir de las muestras de carbón la densidad real y aparente del mismo, necesarias para el cálculo de los parámetros de fluidización como lo son la fracción de vacío y factor de forma, para los diferentes tamaños de partículas resumiéndose en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades físicas de la muestra

Diámetro de partícula (mm)	Densidad (ρ) (g/ml)	Fracción de vacío (ϵ)	Factor de forma (ϕ)
-0.841+0.420	1.1054	0.50	0.69
-0.354+0.297	1.1273	0.53	0.83
-0.420+0.160	1.1250	0.48	0.76

De los resultados obtenidos puede decirse que la fracción de vacío estuvo en rango comprendido entre 0.48 y 0.53 observándose con esto que el fluido tendría poca dificultad para fluir y las caídas de presión encontradas serian bajas para el sólido estudiado. El factor de forma presentó valores entre 0.69 y 0.83, correspondiente a partículas de forma paralelepípeda y esférica.

Comportamiento de las variables del proceso

Para un mismo diámetro de partículas y un mismo ángulo de cono, se observo que a medida que se aumenta la altura del lecho se incrementa la caída de presión de la misma manera velocidad mínima de fluidización aumenta con dicha altura, tal como se observa en las Tablas 3-5.

Tabla 3. Parámetros experimentales de fluidización para $D_p=0.631\text{mm}$

Ángulo	Altura (cm)	Di/Dc	V_{mf} (cm/s)	ΔP (cm H_2O)	Remf
30°	2	0.2763	2.7045	0.8	1.0607
	3.5	0.2763	2.9125	0.8	1.1422
	5	0.2763	3.3286	1.0	1.3045
	7	0.2763	3.5419	1.1	1.3891
	9	0.2763	3.7447	1.2	1.4686
45°	2	0.6053	2.4964	1.1	0.9791
	3.5	0.6053	2.5801	1.3	1.0119
	5	0.6053	3.1206	1.5	1.2239
	7	0.6053	3.4594	1.5	1.3567
	9	0.6053	3.5419	1.6	1.3891

Cont. de la Tabla 3.

60°	2	0.7763	2.0804	1.2	0.8159
	3.5	0.7763	2.3720	1.3	0.9303
	5	0.7763	2.9125	1.5	1.1422
	7	0.7763	3.1206	1.7	1.2239
	9	0.7763	3.3707	2.0	1.3219
Base Plana	2	1	3.0378	0.8	1.1914
	3.5	1	3.2459	0.9	1.2730
	5	1	3.5419	1.0	1.3891
	7	1	3.8285	1.2	1.5015
	9	1	4.3688	1.2	1.7134

Al comparar para el mismo tamaño de partículas el efecto de las diferentes bases cónicas se observo que al incrementarse el ángulo del cono, la caída de presión se incrementa para la misma altura de lecho mientras que la velocidad mínima de fluidización disminuye.

En relación a la variación del tamaño de partículas sobre la caída de presión y la velocidad mínima de fluidización para condiciones operacionales de igual altura de lecho y ángulo de cono, se aprecia que el aumento del tamaño de partículas genera disminución de la caída de presión y aumento de la velocidad mínima de fluidización

Los ensayos de fluidización en columnas de base plana para la misma granulometría y altura de lecho de carbón mineral muestra el comportamiento anterior en columnas de base cónica, esto es, la caída de presión aumenta con la altura de columna y la disminución del tamaño de partícula, mientras la velocidad de fluidización mínima aumenta con el incremento de la altura del lecho y con el aumento del tamaño de partícula. Al comparar los diferentes ángulos con los valores para base plana, se observo que la caída de presión en columna de base plana resulto similar a la caída de presión en columna cónica de 30°, para los distintos diámetros de partículas, en tanto la velocidad mínima de fluidización fue mayor que las obtenidas con la base cónica.

Tabla 4. Parámetros experimentales de fluidización para $D_p=0.326\text{mm}$

Ángulo	Altura (cm)	Di/Dc	Vmf (cm/s)	ΔP (cm H ₂ O)	Remf
30°	2	0.2763	2.9464	0.9	0.5058
	3.5	0.2763	2.7045	1.1	0.5480
	5	0.2763	2.9962	1.5	0.6071
	7	0.2763	3.3286	1.7	0.6744
	9	0.2763	3.5419	2.0	0.7177
45°	2	0.6053	2.4136	1.1	0.4890
	3.5	0.6053	2.5801	1.5	0.5228
	5	0.6053	2.8297	1.7	0.5734
	7	0.6053	3.0794	1.9	0.6239
	9	0.6053	3.7447	2.0	0.6744
60°	2	0.7763	1.8723	1.3	0.3794
	3.5	0.7763	2.1636	1.6	0.4384
	5	0.7763	2.6633	2.1	0.5396
	7	0.7763	2.9546	2.2	0.5987
	9	0.7763	3.2004	2.8	0.6485

Cont. de la Tabla 4

Base Plana	2	1	2.8297	1.2	0.5734
	3.5	1	3.0794	1.2	0.6239
	5	1	3.3707	1.4	0.6830
	7	1	3.6204	1.3	0.7336
	9	1	3.8701	1.7	0.7842

Al analizar los resultados obtenidos cuando se mantiene constante la altura del lecho y el ángulo de cono, variando el diámetro de partícula, se observó que a medida que se incrementa el tamaño de partícula la velocidad mínima de fluidización aumenta y la caída de presión disminuye, este comportamiento de la caída de presión puede explicarse, ya que a medida que se incrementa el tamaño de partículas aumenta también la fracción de vacío que se traduce en mayor espacio libre para que el fluido, en este caso el aire, fluya con menos dificultad, por lo cual la menor resistencia a flujo es percibida como una menor caída de presión.

En general al incrementarse el ángulo de cono la caída de presión aumenta y la velocidad mínima disminuye para un diámetro de partícula y una altura constante. Una explicación de este fenómeno podría estar ligado con las distintas fuerzas a las que están sometidas las partículas de sólido, que influyen en la forma como estas se aglomeran en los límites del soporte de lecho, esto quiere decir que a medida que la base cónica tenga una mayor pendiente, las partículas superiores tienden a ejercer más peso sobre las inferiores y como resultado una mayor compactación que se traduce en un incremento de la caída de presión.

Tabla 5. Parámetros experimentales de fluidización para $D_p=0.290\text{mm}$

Ángulo	Altura (cm)	D_i/D_c	V_{mf} (cm/s)	ΔP (cm H ₂ O)	Remf
30°	2	0.2763	2.2471	1.2	0.4050
	3.5	0.2763	2.4964	1.7	0.4499
	5	0.2763	2.7045	2.0	0.4875
	7	0.2763	3.0378	2.2	0.5475
	9	0.2763	3.4123	2.4	0.6150
45°	2	0.6053	2.0804	1.4	0.3750
	3.5	0.6053	2.2055	1.6	0.3975
	5	0.6053	2.4552	2.0	0.4425
	7	0.6053	2.6217	2.3	0.4725
	9	0.6053	2.9962	2.6	0.5400
60°	2	0.7763	1.7894	1.9	0.3225
	3.5	0.7763	2.1636	2.0	0.3899
	5	0.7763	2.3300	2.2	0.4199
	7	0.7763	2.4964	2.3	0.4499
	9	0.7763	2.8297	3.0	0.5100
Base Plana	2	1	2.6217	1.3	0.4725
	3.5	1	2.9125	1.8	0.5250
	5	1	3.2043	2.03	0.5776
	7	1	3.5419	2.2	0.6384
	9	1	3.7036	2.4	0.6676

Se establecieron comparaciones entre los valores experimentales de velocidad mínima de fluidización con valores calculados a partir de las ecuaciones teóricas dadas por la literatura para las condiciones de fluidización del carbón mineral en lechos de base cónica y aire atmosférico como agente fluidizante. Del análisis comparativo de las ecuaciones de Kunii-Levenspiel (12), Wen Yu (13), Leva

(14), Johnson (15), Baerg et al. (16), Van Hereden et al. (17), Frantz (18), Pillai-Raja Rao (19), Miller-Logwinuk (20), Kumar-Sen Gupta (21) Broadhurst-Becker (22), Talkwalker et al (23), Todes (24), Goroshko et al (25), Davies- Richardson (26) y Ergun (27), tabla 6; se destaca:

i) Todas las correlaciones teóricas o empíricas fracasaron en la predicción de la velocidad mínima de fluidización del sistema carbón mineral-aire en lechos de base cónica para tamaños de partículas entre 0.631 mm y 0.326 mm;

ii) Para partículas de carbón de tamaño 0.290 mm y altura de lecho de 7 cm, la ecuación de Wen Yu se aproxima al valor experimental con un error del 1% para la columna cónica de 30°, 13% para el ángulo de 45° y 17% para la columna cónica de 60°

iii) Otras correlaciones con errores comparables con la ecuación de Wen-Yu para el lecho de partículas de tamaño 0.290 mm, Miller Logwinuk con 2.58% de error, Todes con 4.7% y Pallai.Raja Rao con 12.6%.

Tabla 6. Comparación de la velocidad mínima de fluidización experimental y teórica para el ángulo de 30° y altura del lecho de 7 cm.

	Dp=0.0631 cm; Vmf,E=3.5419 cm/s		Dp=0.0326 cm; Vmf,E=3.3286 cm/s		Dp=0.029 cm; Vmf,E=3.0378 cm/s	
Autor	V m f , T (cm/s)	%Desviación	V m f , T (cm/s)	%Desviación	V m f , T (cm/s)	%Desviación
Kunii y Levenspiel	18.3114	80.6574	9.1385	63.5761	4.0626	25.2252
Wen y Yu	13.9859	74.6752	3.8071	12.5686	3.0065	1.0304
Leva	56.1015	93.6866	31.6870	89.4954	11.5062	73.5986
Johnson	210.3197	98.3159	112.2059	97.0335	44.3693	93.1534
Baerg <i>et al.</i>	13.8486	74.4241	6.2966	47.1365	4.4389	44.1458
Van Hereden <i>et al.</i>	1.5787.10	33.5543	4.4667.10 ⁻³	99.8658	3.2012.10 ⁻³	99.8946
Frantz	24.5767	85.5884	6.6900	50.2451	5.2833	42.5018
Pillai- Raja Rao	16.1768	78.1051	4.4035	24.4101	3.4775	12.6441
Miller y Logwinuk	14.5313	75.6257	3.9478	16.68747	3.1183	2.5815
Kumar-Sen Gupta	124.6142	97.1577	33.9213	90.1873	26.7883	88.6600
Broadhurst-Becker	4.3432.10 ⁻⁴	99.9877	1.1540.10 ⁻⁴	99.9965	9.0555.10 ⁻⁵	99.9970
Talwalker et al	17252.9122	99.9795	1880.5438	99.8230	1144.6923	99.7346
Todes	12.1674	70.8902	3.9602	15.9487	3.188	4.7114
Goroshko et al	5.0530.10 ⁻⁵	99.9986	5.2024.10 ⁻⁵	99.9984	4.9509.10 ⁻⁵	99.9984
Davies-Richardson	17.9998	80.3226	4.8997	32.0652	3.8694	21.4917
Ergun	0.5821	83.5653	0.2905	91.2696	0.1291	95.7802

Correlación propuesta: Ecuación modificada de la ecuación de Ergun para lecho de base cónica.

La mayor parte de la información básica concerniente al estado incipiente de fluidización, ha sido obtenida a través de pruebas experimentales desarrolladas por muchos investigadores, y quienes han propuesto un número de correlaciones de predicción de las condiciones mínimas de fluidización basándose en el establecimiento de modificaciones a la ecuación de Ergun; ajustando las constantes A y B al sistema en particular y a los criterios de cada autor.

En virtud a lo antes expuesto se consideró ajustar las constantes A y B de la ecuación de Ergun (27) utilizando los valores experimentales obtenidos de la geometría cónica.

Así, de la ecuación de Ergun se recomienda para la fluidización incipiente del mineral de carbón, las siguientes expresiones para el número de Reynolds mínimo de fluidización de base cónica

A=6.6851 y B=-0.3904

Al reescribir la ecuación de Ergun, resulta:

$$g_c * \frac{\Delta P}{L o_{mf}} \frac{\rho_f * \varphi^3 * D_p^3}{\mu^2 * (1 - \epsilon_{mf})} = 6.6851 * \frac{(1 - \epsilon_{mf}) * \varphi * R_{emf}}{\epsilon_{mf}^3} - 0.3904 * \frac{\varphi^2 * R_{emf}^2}{\epsilon_{mf}^3}$$

Correlación ajustada de la caída de presión para lechos de base cónica

Al considerar el balance de fuerzas entre el fluidizante y el peso del lecho en cada geometría cónica, resulto el siguiente factor geométrico donde:

$$\frac{\Delta P}{L} = \beta * (1 - \epsilon_{mf}) * (\rho_s - \rho_g) * \frac{g}{g_c}$$

Por consiguiente, de manera simplificada, la caída de presión de base cónica en el punto de fluidización mínima, se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha * (1 - \epsilon_{mf}) * (\rho_s - \rho_g) * \frac{g}{g_c} * (Di / Dc)^n$$

Con Dc, diámetro de la sección cilíndrica y Di, diámetro del distribuidor

$\alpha=1.428299$ y $n=0.2968$, obtenidos por ajustes de los datos experimentales, correspondientes a la geometría cónica.

Al reescribir la ecuación de la caída de presión en el punto de fluidización mínima resulta:

$$\frac{\Delta P}{L} = 1.428299 * (1 - \epsilon_{mf}) * (\rho_s - \rho_g) * \frac{g}{g_c} * (Di / Dc)^{0.2968}$$

Ecuación generalizada para columnas de base cónica

En el presente trabajo se propone una correlación generalizada, el factor Ri definido como el cociente entre la velocidad mínima de fluidización para lechos de base cónica y la velocidad mínima para lechos de base plana, a las mismas condiciones de operación para el sistema gas-sólido.

$$Ri = \frac{Remf, Cónica}{Remf, Plana} = \alpha * (Di / Dc)^k + \beta$$

Los coeficientes α , β y k se obtienen por mínimos cuadrados, obteniéndose la siguiente correlación:

$$Ri = -0.3222 * (Di / Dc)^{3.1656} + 0.8939$$

En comparación con la correlación Ri obtenida para el mineral de hierro por García et al. (10)

$$Ri = -0.39942 * (Di / Dc)^{3.000} + 0.60058$$

Donde:

Remf, Cónica = Número de Reynolds en el punto de fluidización mínima para lechos de base cónica.

Remf, Plana= Número de Reynolds en el punto de fluidización mínima para lechos de base plana

Di= Diámetro del orificio de entrada del fluido

Dc= Diámetro de la sección cilíndrica

α , β y k = Coeficientes dependientes del ajuste de los datos experimentales

Conclusiones

1. La fluidización del mineral de carbón con aire como agente fluidizante en lechos de base cónica, para diámetros de partículas de 0.631, 0.326 y 0.290 cm, factores de forma de 0.69, 0.83 y 0.76 y porosidad del lecho estático de 0.50, 0.53 y 0.48, muestra un comportamiento de fluidización agregativa uniforme, sin presencia del spouting y del slugging.

2. La velocidad mínima de fluidización mostró el siguiente comportamiento con las variables del sistema carbón aire:

Aumenta al aumentar el diámetro promedio de la partícula de carbón

En la base plana la velocidad mínima de fluidización es mayor que en la base cónica

Disminuye con el incremento del ángulo del cono

3. La caída de presión para el sistema carbón-aire exhibió el siguiente comportamiento con las variables de fluidización:

Para un mismo diámetro de partícula y un mismo ángulo de cono, la caída de presión aumenta a medida que aumenta la altura del lecho durante el proceso de fluidización y de la misma manera la velocidad mínima de fluidización aumenta con la altura del lecho.

La caída de presión aumenta al aumentar el ángulo de cono

La caída de presión en el punto mínimo de fluidización disminuye al aumentar el diámetro promedio de partícula

4. El ángulo de cono que represento un proceso uniforme de fluidización fue el de 60° y partículas de carbón de 0.631 y 0.326 mm con respecto a la caída de presión y velocidad mínima de fluidización

5. Al comparar los valores experimentales de velocidad mínima de fluidización con los valores estimados por las diferentes correlaciones de la literatura, se concluye que las ecuaciones existentes, no son aplicables para estimar la velocidad mínima de fluidización en lechos cónicos, cada correlación ofrece valores diferentes.

6. Las diferentes correlaciones ajustadas para estimar las condiciones mínimas de fluidización en lechos de base cónica para el sistema carbón mineral-aire se presentan a continuación:

Ecuación modificada de Ergun para lechos cónicos

$$g_c * \frac{\Delta P}{L o_{mf}} \frac{\rho_f * \varphi^3 * D_p^3}{\mu^2 * (1 - \epsilon_{mf})} = 6.6851 * \frac{(1 - \epsilon_{mf}) * \varphi * R_{emf}}{\epsilon_{mf}^3} - 0.3904 * \frac{\varphi^2 * R_{emf}^2}{\epsilon_{mf}^3}$$

Caída de presión en el estado incipiente de fluidización

$$\frac{\Delta P}{L} = 1.428299 * (1 - \epsilon_{mf}) * (\rho_s - \rho_g) * \frac{g}{g_c} * (Di / Dc)^{0.2968}$$

Ecuación generalizada para columnas cilíndricas de bases cónicas

$$Ri = -0.3222 * (Di / Dc)^{3.1656} + 0.8939$$

Referencias Bibliograficas

- [1] Wen-Ching Yang, (Noyes Publications), Fluidization, Solids handling, and processing, Industrial Applications , New Jersey, (1998).
- [2] Epstein N., Applications el liquid-solid fluidization, International Journal of Chemical Reactor Engineering, Volume 1, Reviews, (2003).
- [3] Smith P.G., (Wiley-Blackwell) Applications of Fluidization to food processing, New York, (2007).
- [4] Luckos A., Denton G. and Den Hoed P., Current and Potential applications of Fluid-bed Technology in the ferroalloy Industry, INFACON XI, , New Delhi, India, (2007), 123-132
- [5] Pugsley T. and Mahinpey N., Review of fluidized bed gasification technology, 4th International Freiburg Conference on IGCC and Xtl technologies, May 3-6, Dresden, Germany, (2010).
- [6] Davidson J. and Harrison D., (Academic Press), Fluidization, London (1971).
- [7] Wakao N. and Kagueli S.,(Rout ledge Editorial) Heat and Mass transfer in Packed Beds, First Edition, New York (1982).
- [8] Wen-Ching Yang (Marcel Dekker Publisher), Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems, (2003).
- [9] Manich A. (Asesor), Melendez A. y Arambulo G., Propiedades de Fluidization del carbón de Guasare y del Mineral de Hierro de Matanzas, Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Luz, Maracaibo, (1976).
- [10] García C., Ferrer J. and Rodríguez D., Fluidization en lechos de base cónica, Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia, Volumen 3, N° 2, (1990), 95-104
- [11] Ferrer J. L., Mecanismos de transferencia de momento en lechos fluidizados de base conica, Tesis de Maestría en Ingenieria Quimica, LUZ, Maracaibo (1995).
- [12] Kunni D. and Levenspiel O., (Elsevier), Fluidization Engineering, Butterworth-Heinemann, Newton, MA, Second Edition, (1991).
- [13] Wen C.Y. and Yu Y.H., Mechanics of Fluidization, Chem Eng. Progress. Symp. Series, 62, 100-111, 1996.
- [14] Lev. M., Fluidization, McGraw-Hill Book Co, New York, 1959.
- [15] Johnson E., Institute of Gas Engineers Report, Publication N° 318/719, London, 1949-1950.
- [16] Baerg A., Klassen J. and Gisher P.E., Heat Transfer in a Fluidized Solids Bed, Canadian J. Res., F28, 187-307, 1950.
- [17] Van Heerder C., Nobel A.P. and Van Krevelen D. W. Studies on Fluidization I-The Critical Mass Velocity, Chem. Eng. Sei, 1(1), 38-49, 1951.

- [18] Frantz J., Minimum Fluidization Velocities and Pressure Drop in Fluidized Beds, Chem. Eng. Prog. Symp. Series, 62, 21-31, 1966.
- [19] Pillai b. C. and Roja Rao H., Pressure Drop and Minimum Fluidization Velocities en Air-Fluidized Beds, Indian J. Technology, 9, 77-86, March 1971.
- [20] Miller C.O and Logwinuk A.K, Fluidization Studies on Solid Particles, Ing. Eng. Chem., 43(5), 1220-1226, 1951.
- [21] Kumar A. and Sen Gupta P., Prediction of Minimum Fluidization Velocity for Multicomponent Mixtures, Ind. J. Technology, 12(5), 225(1974).
- [22] Broadhurst T.E. and Becker H.A., Onset of Fluidization and Slugging in Beds of Uniform Particles, AICHE, 21(2), 287-247, 1975.
- [23] Talkwalkar A., Babu S.P. and Shah B., Fluidization: Application on Coal Conversion Process, AICHEJ Symposium Series, 74, 176-186, 1978.
- [24] Todes O.M. and Tsitovich O.B., Apparatuses with a Fluidized Granular Bed, Khimiya, Leningrad, Russia, 1981.
- [25] Goroshko V.D., Rozenbaum R.B., and Todes O.M., Approximate Hydraulic Relationships for suspended beds and hindered Fall, Izvestiya Vuzov, Neft. i. Gaz Interchange between bubbles and the continuous phase in a Fluidized Bed, Trans. Inst. Chen. Eng., 44, 293-305, 1966.
- [26] Davies- Richardson FALTA REFERENCIA
- [27] Ergun S., Fluid flow through packed columns, Chem. Eng. Progress, 48, 89-94, 1952.