

Influencia de la aglomeración ultrasónica de partículas en procesos de separación sólido-líquido

Enrique Riera Franco de Sarabia, José Antonio García Fernández, Luis Elvira Segura
Departamento de Señales, Sistemas y Tecnologías Ultrasonicas,
CSIC, Serrano 144, 28006 Madrid

Introducción

La propagación de ondas ultrasónicas de amplitud finita a través de una suspensión acuosa de partículas sólidas produce una serie de efectos no-lineales como son la aglomeración de partículas, la cavitación y el viento acústico. Estos efectos modifican las características acústicas del medio al producir alteraciones permanentes en sus propiedades físico-químicas. Estos efectos controlados de manera adecuada pueden producir un incremento en el rendimiento de los sistemas de separación sólido-líquido por filtración en suspensiones⁽¹⁻⁴⁾. El desarrollo de sistemas de filtración asistidos ultrasónicamente abre un nuevo campo de aplicación industrial que abarca las industrias farmacéutica, química, electrónica (obtención de productos sólidos y líquidos ultrapuros), médica (riñón artificial) y minera entre otras.

En este trabajo se presenta un estudio teórico-experimental llevado a cabo sobre la aglomeración de partículas finas en suspensiones no diluidas, con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso de separación sólido-líquido en sistemas de filtración.

Antecedentes

En una suspensión acuosa, el medio suele estar constituido por partículas sólidas dispersas en el líquido. La fase líquida está presente en forma de agua libre ($\approx 40\%$), agua atrapada en capilares o microporos ($\approx 40\%$), agua atrapada en la superficie de las partículas ($\approx 10\%$) y agua absorbida por las partículas ($\approx 10\%$). En los procesos de filtra-

ción por ósmosis inversa, microfiltración, ultrafiltración, presión, vacío, centrifugación, etc., se elimina el agua libre pudiendo permanecer una gran cantidad de líquido atrapado entre las partículas. Los ultrasonidos al propagarse a través del medio, generan intensas fuerzas inerciales y elásticas capaces de producir el fenómeno de la aglomeración. Dichas fuerzas actúan sobre las interfases sólido-líquido, lo que produce a su vez una disminución de la viscosidad efectiva y de la tensión superficial debido a la diferencia de impedancia entre ambas fases. Por consiguiente, la aglomeración puede favorecer la difusión y migración del líquido desde los microporos y la superficie de las partículas, lo que mejora la eficiencia del proceso de filtración al aumentar el caudal de fluido obtenido. Esto conlleva a una modificación de las propiedades físicas de las suspensiones tanto a nivel microscópico como macroscópico. En los trabajos de Wakeman y Tarleton⁽¹⁾ y de Muralidhara y Senapati⁽²⁻⁴⁾ se indica además que los ultrasonidos de cierta intensidad ayudan a evitar el ensuciamiento y atascos de los filtros. Ello se debe por una parte a la aglomeración de las partículas finas principales responsables del proceso de adhesión y obturación de los poros, y de otra a la presencia de cavitación.

Mecanismos responsables de la colisión acústica entre partículas.

El proceso de colisión y posterior aglomeración acústica entre partículas se presenta como un fenómeno bastante complejo ya que no solo depen-

de del campo acústico aplicado, sino también, y muy directamente de las características de la suspensión (número de partículas por unidad de volumen, tamaño medio de las partículas, densidad de las partículas,...etc.). Además, la existencia de los campos de flujo alrededor de las partículas y la turbulencia del medio vibrante tienen un efecto importante sobre el desarrollo del fenómeno.

Los mecanismos responsables de la colisión y posterior aglomeración ultrasónica de partículas son los siguientes:

Interacción ortocinética

Las partículas dispersas en una suspensión sometida a un campo acústico $u_g = U_o \cos(\omega t - kx)$, experimentan un movimiento vibratorio inducido en el que tanto sus desplazamientos como sus velocidades de vibración dependen de su tamaño. Así, mientras las partículas más grandes permanecen prácticamente en reposo, las más pequeñas siguen el movimiento vibratorio del medio. En consecuencia las partículas se moverán con diferente amplitud dependiendo de su tamaño, favoreciendo la colisión entre ellas y su posterior aglomeración.

La interacción ortocinética entre partículas se basa como vemos en el movimiento vibratorio inducido de una partícula esférica en un fluido viscoso incompresible. La ecuación del movimiento que la onda ejerce sobre la partícula está dada por la ecuación BBO⁽⁵⁾ (Basset-Boussinesq-Oseen). Esta ecuación es una generalización de la ecuación de Stokes y para el caso de números de Reynolds acústicos bajos ($R_e < 1$, siendo $R_e = 2aU_{gp}/\nu$, a es el radio de partícula, U_{gp} la amplitud de la

velocidad relativa entre la partícula y el medio, y (ν la viscosidad cinemática del fluido) su solución es de la forma:

$$up(t,x) = |\hat{H}|U_0 \cos(\omega t - kx - \vartheta) \quad (1)$$

En esta expresión el módulo de la función compleja

$$\hat{H} = \hat{U}_p / \hat{U}_0 = \{1 + y - i [2/3y^2 + y]\} / \{1 + y - i [(1 + 1/2\delta) \omega \tau + y]\};$$

$$y = \sqrt{a^2 \omega / 2\nu} \quad (2)$$

representa el coeficiente de arrastre de la partícula. En estas expresiones ϑ es el desfase entre el movimiento del líquido y el de la partícula, δ es la relación entre la densidad del líquido y la de la partícula, τ es el tiempo de relajación de la partícula y ω es la frecuencia angular.

Basándose en este modelo vibratorio se proponen los conceptos de volumen de aglomeración y los mecanismos de relleno para explicar el fenómeno de la aglomeración acústica entre partículas. En su modelo el volumen define el espacio ocupado por una partícula durante un ciclo acústico. Despreciando los efectos gravitacionales, las partículas más pequeñas que siguen el movimiento vibratorio del medio penetran en el volumen de aglomeración de las partículas mayores (o núcleos de aglomeración) que permanecen prácticamente estacionarias en el medio fluido. Se produce así su colisión y posterior aglomeración. Suponiendo que de cada colisión resulta aglomeración, los volúmenes de los núcleos de aglomeración se vaciarán al cabo de un ciclo acústico. Por ello no se producirán colisiones y aglomeraciones hasta que nuevas partículas sean transportadas dentro de este volumen. Este transporte de nuevas partículas constituye el proceso denominado relleno del volumen de aglomeración. Los fenómenos considerados relevantes en este proceso de relleno incluyen los mecanismos de interacción mutua de los campos acústicos secundarios debidos a la presión de radiación, y los efectos debidos a la asimetría de los campos de flujo viscoso al rededor de las partículas bajo condiciones de flujo de Oseen.

Sin embargo este modelo de interacción no explica la aglomeración en suspensiones monodispersas, fenóme-

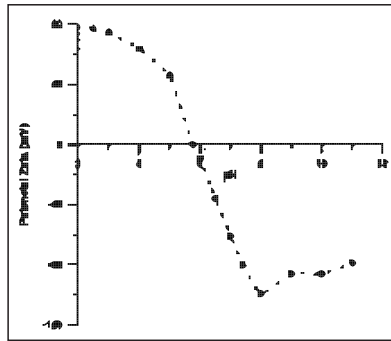


Figura 1. Curvas de potencial zeta-pH para TiO_2 .

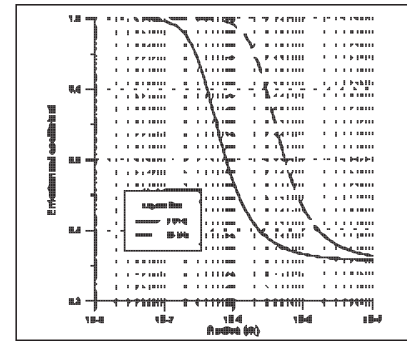


Figura 2. Coeficiente de arrastre en función del radio (interacción ortocinética).

no observado experimentalmente por diversos autores.

Efecto de la presión de radiación

Es uno de los principales mecanismos involucrados en el proceso de relleno del volumen de aglomeración. Este efecto basado en el principio hidrodinámico de Bernoulli fue propuesto en 1891 por König, y establece que cuando dos partículas se encuentran situadas en dirección normal a la dirección de propagación se manifiesta una fuerza de atracción entre ellas. Song⁽⁶⁾ obtuvo la expresión de la fuerza de interacción entre dos partículas debida a la interacción mutua de los campos acústicos secundarios debidos a la presión de radiación, al suponer que las partículas se mueven en un fluido viscoso de acuerdo con la ley de Stokes. La expresión de la velocidad de arrastre relativa entre partículas es:

$$u_{rel12} = \frac{(\rho_0 U_0^2 / 32\pi^2)(1/\nu)}{[(a_1 a_2)^2 / d^4] (3\cos^2 \theta - 1)} (a_1 g_{21r} - a_2 g_{12r}) \quad (4)$$

en donde las funciones g representan los campos acústicos secundarios. Esta velocidad es negativa cuando las partículas se atraen (la línea de sus centros perpendicular al campo acústico) y positiva cuando se repelen (la línea de sus centros paralela al campo acústico). De esta expresión se deduce que la amplitud de la excitación y el tamaño de las partículas favorecen el movimiento relativo. Este efecto sólo está presente para partículas de diferente tamaño.

Efecto hidrodinámico de la estela

Este es otro de los principales me-

canismos involucrados en el proceso de relleno del volumen de aglomeración. Dianov⁽⁷⁻⁸⁾ y Tiwary⁽⁹⁾ establecieron modelos de interacción hidrodinámica entre partículas basados en la asimetría del flujo viscoso que rodea a una partícula en movimiento para números de Reynold moderados. En efecto, si tenemos dos partículas próximas que se mueven por la acción de una onda acústica, siendo la línea que une sus centros paralela a la dirección de propagación, la partícula de "cabeza" perturbará el medio que está detrás de ella. Se produce entonces una onda secundaria semejante a la estela que deja tras de sí un barco, reduciendo la fuerza de arrastre que ejerce el medio viscoso sobre la partícula de "cola" durante el primer semiciclo. El papel que juegan ambas partículas se invierte durante el segundo semiciclo en el que las velocidades cambian de sentido. El resultado es un movimiento relativo entre partículas, de carácter atractivo cuando ambas están alineadas con la dirección de propagación de la onda acústica, y de carácter repulsivo cuando lo están en dirección ortogonal.

La expresión de la velocidad relativa entre partículas obtenida por Dianov es

$$u_{12} = \frac{(2/\pi) [(3alU_0 / 2d) \{1 + (alU_0 / \pi\nu)\} - (1/d^2)\{(6a\nu / \pi) + (9a^2 l U_0 / 16)\}]}{1} \quad (5)$$

en donde l es el coeficiente de deslizamiento de las partículas en condiciones de flujo de Oseen y es función del radio y densidad de partícula, de la viscosidad del fluido y de la velocidad de vibración y frecuencia de la onda acús-

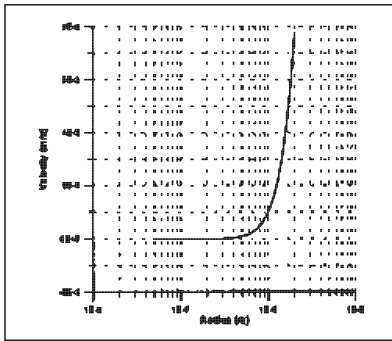


Figura 3. Velocidad de aproximación entre dos partículas en función del radio a 20kHz (efecto hidrodinámico de la estela)

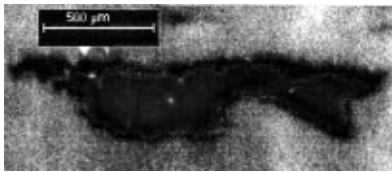


Figura 4. Aglomerado de Zinc en un nodo de presión al cabo de 3 segundos de tratamiento.

tica. Un estudio paramétrico de la solución muestra que para una pareja de partículas dada, la velocidad de convergencia aumenta con la frecuencia, aproximándose a un valor constante. Por encima de esta frecuencia el coeficiente λ tiende a la unidad por lo que la velocidad de convergencia es independiente de la frecuencia. Este proceso de aglomeración fue observado experimentalmente por Hoffmann⁽¹⁰⁾ en aerosoles monodispersos.

Factores que influyen negativamente en la colisión entre partículas en una suspensión.

El comportamiento de una partícula en una suspensión acuosa difiere del que tendría en un aerosol debido a que casi todas las sustancias en contacto con un medio polar adquieren una carga eléctrica superficial. Los mecanismos que intervienen en la aparición de esta carga son: la ionización, la absorción selectiva de iones, la disolución selectiva de iones, etc. Debido al movimiento térmico aleatorio del líquido y a la influencia que la carga superficial ejer-

ce sobre los iones próximos a la superficie de las partículas se forma a su alrededor una doble capa eléctrica. Consecuencia de la aparición de esta doble capa es que la suspensión adquiere un potencial eléctrico global denominado potencial zeta. Este potencial depende de la temperatura y del pH de la suspensión. Así pues, en una suspensión además de las fuerzas de Van der Waals a la hora de producir aglomeración hay que tener en cuenta la influencia de las fuerzas electrostáticas de carácter repulsivo. En la figura 1 se muestra el potencial zeta medido por Tarleton⁽¹¹⁾ para diferentes valores del pH en una suspensión de partículas muy finas de TiO_2 . El punto isoeléctrico se alcanza para un $pH=5.8$. Para este valor la carga eléctrica de la suspensión se anula, lo que indica que la carga superficial es igual a cero. En estas condiciones la fuerza repulsiva entre las superficies de las partículas sufre una drástica reducción lo que favorece la aglomeración entre partículas.

5. Estudio y visualización de algunos efectos del campo ultrasónico sobre las partículas en una suspensión diluida.

Se han estudiado las principales interacciones entre partículas en disoluciones acuosas diluidas de partículas finas, analizando el efecto de la frecuencia acústica y del tamaño de partícula. En la figura 2 se presenta el coeficiente de arrastre en función del tamaño para frecuencias de 20kHz y de 1MHz. Las partículas menores de $1\mu m$ son arrastradas por el fluido, mientras que las de $10\mu m$ presentan un coeficiente de 0.5. Por consiguiente para producir el efecto ortocinético en partículas de $1\mu m$ se necesitan partículas de radios iguales o superiores a $10\mu m$ que actúen como núcleos de aglomeración.

Otra solución es incrementar la frecuencia. Así para 1MHz, el coeficiente de arrastre para partículas de $1\mu m$ decrece notablemente. La figura 3 muestra las diferentes velocidades de atracción para dos partículas calculadas mediante el efecto hidrodinámico de la estela (interacción axial). Los cálculos se

realizaron para partículas en agua con una densidad de 4300 Kg/m^3 ($TiONa$), una velocidad del fluido de 1 m/s y una separación mutua de $100\mu m$. Se observa en la figura que el efecto hidrodinámico de la estela es más intenso para partículas grandes a altas frecuencias. Esto no es una sorpresa ya que para estas condiciones, el campo de flujo se hace asimétrico. La fuerza debida a la presión de radiación desplaza a las partículas de tamaños superiores a las $20\mu m$ hacia los nodos de presión de un campo estacionario. La presión de radiación decrece mucho en intensidad para tamaños inferiores. Así partículas de diámetros entre $1-2\mu m$ no pueden alcanzar los nodos ya que prevalecen otros efectos (en el rango MHz).

Se ha usado una técnica de visualización microscópica para estudiar la interacción entre partículas en un campo ultrasónico a una frecuencia de 21kHz. Se utilizó un equipo de microfotografía para capturar las imágenes junto a una fuente de luz blanca para iluminar la zona bajo estudio. Como predice la teoría, las partículas más pequeñas permanecen en todo el fluido y únicamente las más grandes ($10-100\mu m$) son desplazadas a los nodos de presión. Se observaron además comportamientos muy distintos dependiendo del tipo de partícula. Así mientras las partículas de $TiONa$ no se unen, las partículas de Zn sí lo hacen, aunque la adhesión de los aglomerados no parece muy fuerte. Se ha observado que los aglomerados mostrados en la figura 4 permanecen unidos mientras el campo ultrasónico está actuando, pero que estos pseudo-aglomerados desaparecen cuando el campo ultrasónico se desconecta. Esto confirma la importancia de las fuerzas electrostáticas de carácter repulsivo que se oponen a la aglomeración de las partículas en un medio acuoso.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido llevado a cabo en el marco del Proyecto de Investigación del Plan Nacional de I+D AMB96-1211-C02-01.

Referencias

- [1] R.J.Wakeman, E.S.Tarleton, 1991, *TranslChemE*, 69(A), 386-397.
- [2] T.Tuori, 1993, *Proc. 6th World Filtration & Separation Congress*, Nagoya, Japan, 351-353.
- [3] B.H.Muralidhara, R.E.Beard, N.Senapati, 1987, *Filtration & Separation*, 24, 409-413.
- [4] N.Senapati, B.H.Muralidhara, 1989, *Flocculation & Dewatering*, 421-431.
- [5] S.Temkin, 1981, *Elements of acoustics*. New York: John Wiley & Sons: 421-455
- [6] L. Song, G. Koopmann and T. Hoffmann, *ASME: Journal of Vibration and Acoustics*,1994,116: 208-214.
- [7] D. B. Dianov, A. A. Podolskii and V. I. Turubarov, *Soviet Physics of Acoustics*, 1968,13(3): 314-319.
- [8] V. I. Timoshenko, *Soviet Physics of Acoustics*, 1965, 11(2): p. 183-186.
- [9] R. Tiwary, and G. Reethof, *Journal of Sound and Vibration*, 1986, 108(1): p. 33-49.
- [10] T.Hoffmann, 1993, "Visualization of particle interaction an agglomeration in an acoustic field", Ph.D. dissertation, The Pennsylvania State University.