

Aglomeración acústica de partículas

J.A. Gallego, G. Rodríguez, E. Riera*, L. Gaete, E. Andrés, F. Montoya^(a), L. Elvira, T. Hoffmann, F. Vázquez, J.C. Gálvez, I. González, L. Piñuel, J.A. García, V.M. Acosta
Departamento de Señales, Sistemas y Tecnologías Ultrasónicas
Instituto de Acústica, CSIC Serrano 144, 28006 Madrid
Tel. 91 561 88 06 Fax: 91 411 76 51
(a) Instituto de Física Aplicada, CSIC, Serrano 144, 28006 Madrid

* Coordinador de la recopilación y redacción del trabajo

PACS: 43.35, 43.25

Resumen

En este trabajo se presenta una recopilación de las principales aportaciones llevadas a cabo en el campo de la aglomeración acústica de partículas desde 1972. A lo largo de este periodo de tiempo se ha consolidado esta línea de investigación. Se han estudiado y simulado numéricamente los mecanismos básicos del proceso de aglomeración. Paralelamente se han desarrollado y validado nuevos sistemas macrosónicos a escala de laboratorio y de planta piloto para la retención de partículas finas (0.1-2.5 μm) en efluentes industriales. Los principales logros científicos llevados a cabo en esta temática han dado lugar a más de setenta publicaciones internacionales.

Abstract

A summary of the most relevant R+D contributions since 1972 on the acoustic particle agglomeration is presented in this paper. Along this period the research topic has been well consolidated. The basic mechanisms involved in the agglomeration process have been studied and simulated numerically. In parallel, new macrosonic systems at laboratory and pilot plant scale have been developed and validated to reduce fine particle emissions (0.1-2.5 μm). The main scientific results obtained were published in more than seventy international papers.

1. Aglomeración acústica de aerosoles

Los antecedentes de esta línea de investigación se basan en un hecho bien conocido experimentalmente: que al aplicar un campo acústico de elevada intensidad a un aerosol se origina un fenómeno de aglomeración de las partículas suspendidas en el gas. El aumento del tamaño de las partículas que así se produce facilita grandemente la precipitación de las mismas bien por gravedad o por cualquier tipo de sistema separador conocido. Los efectos que la energía acústica puede producir para mejorar los procesos de separación son debidos a una serie de fenómenos que acompañan a las altas intensidades, siendo los más relevantes: la presión de radiación, el viento acústico, el calor, etc. Ahora bien, el mecanismo específico para mejorar acústicamente los procesos de separación depende básicamente del medio tratado. Este fenómeno conocido a nivel de laboratorio por las experiencias de Patterson y Cawood en los años 30 [1], no había tenido a principios de los años setenta un desarrollo industrial por falta de generadores acústicos adecuados. Por otra parte, y a pesar de que numerosos investigadores se habían interesado en el estudio de los efectos que intervienen en la interacción energía acústica-aerosol, se apreció, junto a la existencia de diversas teorías la falta de un modelo global que permitiese predecir en función de los parámetros del aerosol y del campo acústico las condiciones óptimas del proceso de aglomeración. Estos hechos unidos a los prometedores resultados que Juan A. Gallego y Germán Rodríguez estaban

obteniendo en el estudio de fuentes ultrasónicas coherentes y que habían dado lugar en 1972 a la realización de un prototipo de emisor con elevado rendimiento y alta direccionalidad, abrieron nuevas posibilidades de aplicación en el campo de la aglomeración de micropartículas por ultrasonidos.

1.1. Primeros desarrollos de sistemas ultrasónicos a escala de laboratorio para el tratamiento de humos de combustión incompleta de hidrocarburos

El sistema como aglomerador-precipitador de partículas

El primer sistema desarrollado consistió en un nuevo tipo de emisor ultrasónico de potencia acoplado a una cámara resonante paralelepípedica de sección cuadrada y 0.2m^3 de volumen en cuyo interior se establece un campo de ondas estacionario. El emisor con una capacidad de potencia de 150W trabaja a una frecuencia de 21kHz. Entre 1973 y 1975 se publicaron los primeros resultados sobre la aglomeración y precipitación de partículas obtenidos con gases de escape de un motor de explosión (tamaño de partícula entre 0.2 y $2\mu\text{m}$), trabajando en condiciones estáticas de flujo [2,3]. La medida de la precipitación de partículas se lleva a cabo por un método óptico de transmisión de luz. Los NPS (niveles de presión sonora) medidos en la cámara presentan un valor medio de 143dB en el volumen, siendo 150.4dB el valor máximo alcanzado a lo largo del eje del emisor. La elección de la frecuencia de 21kHz favorece el mecanismo ortocinético de aglomeración de los humos tratados, de acuerdo con los trabajos de Brandt, Freund y Hiedemann [4]. Los resultados demuestran que mientras se precisan casi 25min. para que la concentración de partículas en la cámara pase a ser la décima parte de su valor inicial, bajo la acción del campo ultrasónico el proceso se acelera notablemente obteniéndose el mismo efecto al cabo de 2.3 min. con una presión de 7.750 μbar .

Con objeto de trabajar en condiciones dinámicas de flujo con campos acústicos más intensos y con tiempos de residencia mayores, se diseñó y desarrolló un nuevo prototipo de cámara de aglomeración (CA) de geometría cilíndrica y 0.44m^3 de volumen dotada de dos tomas tangenciales para entrada y salida de los humos. En este dispositivo los gases y las partículas atraviesan la cámara describiendo un movimiento helicoidal. El dispositivo consta de un quemador de hidrocarburos diseñado y realizado en el laboratorio, la CA de aglomeración en la que se establece un campo estacionario, un sistema colector de partículas tipo ciclón y en paralelo una cámara para el muestreo, medida y control de las partículas del aerosol. Esta cámara está dotada de un sistema de transmisión de luz para medida de la concentración másica de partículas y un sistema de toma de muestras de partículas (para microscopía óptica y electrónica) situado en su parte

inferior. La distribución axial del NPS medio obtenido en el interior de la nueva cámara fue de 160dB, siendo de 173dB el valor máximo alcanzado. Se realizaron pruebas con la CA trabajando como sistema aglomerador-precipitador con partículas de $0.5\mu\text{m}$ de radio medio, caudales de hasta $60\text{m}^3/\text{h}$ y concentraciones másicas comprendidas entre 4 y $14\text{g}/\text{m}^3$. En estos ensayos se obtuvieron rendimientos en la retención másica de la materia particulada comprendidos entre el 89% y el 93%, incrementándose entre cuatro y cinco veces el tamaño medio de partícula detectada en el humo a la salida de la cámara. Estos prometedores resultados se presentaron al 9th ICA celebrado en Madrid en 1977 [5] en donde tuvieron una notable repercusión ya que hasta la fecha nunca se había trabajado con humos industriales a frecuencias ultrasónicas con tan buenos resultados. En ese mismo año se publicó una patente [6]. Sin embargo, el consumo energético medio del sistema fue de $3.5\text{kWh}/1000\text{m}^3$ lo que representa un valor alto frente a los sistemas de filtración convencional ($1.5\text{kWh}/1000\text{m}^3$). Como consecuencia, el siguiente objetivo fue reducir el consumo energético del sistema ultrasónico de aglomeración. La solución elegida consistió en estudiar el consumo y el crecimiento dinámico de partícula cuando la CA opera como sistema preacondicionador de partículas aguas arriba de un colector.

El sistema como aglomerador-preacondicionador de partículas

El estudio del comportamiento del sistema ultrasónico como preacondicionador de partículas implicó la realización de un trabajo teórico-experimental sobre los fenómenos físicos básicos que intervienen en la aglomeración de aerosoles por ultrasonidos. Se analizó la influencia relativa que tanto los parámetros del campo acústico (intensidad, frecuencia, tiempo de tratamiento) como los del aerosol (tamaño de partícula, desviación geométrica, concentración másica) tienen en la cinética del proceso de crecimiento relativo del tamaño de partícula. Para ello se abordó la experimentación en condiciones estáticas y dinámicas de flujo. En la fase estática se estudió la influencia de la intensidad y del tiempo de tratamiento para lo que fue necesario desarrollar dos métodos de análisis de aerosoles basados: en la microscopía electrónica de transmisión y en el análisis de imagen; y en una técnica de fotosedimentación. A partir de la distribución de la presión en la cámara se seleccionaron tres puntos de trabajo para la toma de muestras de los aglomerados en distintos instantes de tiempo y con diferentes NPS. Así se determinó que el tamaño medio de las partículas aumenta en un orden de magnitud al cabo de sólo 1s de tratamiento y que la relación de crecimiento después de 5s es de 58 con 157dB y 66 con 159.5dB [7].

De las pruebas estáticas se dedujo la posibilidad de aumentar el tamaño de partícula hasta $10\mu\text{m}$ con tan sólo 2s ó 3s de tratamiento. Ello supuso la posibilidad de emplear el siste-

ma de pretratamiento con caudales 2 ó 3 veces superiores a los establecidos en las experiencias de precipitación. Las distribuciones de tamaños de partículas obtenidas en pruebas dinámicas con caudales de 100m³/h (tiempo de residencia del humo en CA de 2.5s) demuestran que con partículas de tamaño medio a la entrada de la cámara de 0.5mm, se obtiene a la salida una ganancia igual a 20, es decir un tamaño de 10µm. Consecuencia de estos resultados y de la reducción del consumo de energía a 1,5kWh/1000m³ es la idoneidad del sistema desarrollado. La determinación y cuantificación por primera vez a frecuencias ultrasónicas (20kHz) de la influencia de los parámetros físicos que intervienen en la formación y crecimiento de los aglomerados a partir de partículas primarias (0.035-1.5µm) con alto grado de dispersión dio lugar al establecimiento empírico de una expresión general. Estos trabajos dieron lugar a la realización de una Tesis Doctoral [8,9]. La divulgación de estos resultados facilitaron un primer contacto entre nuestro Dpto. y el Prof. G. Reethof de la Universidad de Pennsylvania el cual se plasmaría años más tarde en la presentación de una conferencia invitada al Congreso anual de ASME y a la posterior estancia del Dr. Hoffmann en nuestro Instituto.

1.2. Desarrollo de sistemas macrosónicos para el tratamiento de aerosoles radioactivos con baja concentración másica

Una característica de la mayoría de los accidentes relacionados con el medio ambiente es el que gran cantidad de materia particulada puede ser liberada a la atmósfera en forma de aerosoles. El proceso de formación de estas nubes tóxicas puede durar unas horas como fue el caso en Bopal o prolongarse incluso durante varios días como ocurrió en el caso de Tschernobyl. Otra característica de estos accidentes es que poco puede hacerse para combatir la difusión en el aire de este tipo de aerosoles. Estos accidentes y el prestigio alcanzado por el Departamento en el campo de la aglomeración de partículas impulsaron en 1987 la firma de un Contrato de Colaboración Científica con el JRC de la UE en Karlsruhe durante un periodo de 4 años con el fin de poner a punto una nueva tecnología capaz de ayudar a resolver el problema de la aglomeración-retención de partículas finas en accidentes nucleares.

Estudio de la aglomeración en condiciones estáticas de flujo

Las investigaciones se llevaron a cabo durante este periodo en el JRC con tres tipos de aerosoles: (a) humos producidos por la combustión de caucho con tamaño medio de partícula de 0.6mm, (b) nieblas artificiales formadas por gotas de 0.8mm y (c) aerosoles mezcla de los dos anteriores. En todos los casos los aerosoles presentaban una concentración numérica de 10⁶part/cc y una concentración másica variable entre 0.4 y 1g/m³. Hasta ese momento nunca habíamos trabajado con aerosoles con tan baja concentración másica por lo que se plan-

teó un estudio inicial de viabilidad en condiciones estáticas de flujo. Se construyeron diversos tipos de cámaras de aglomeración de paredes transparentes de 0.6, 5 y 15m³ de capacidad dotadas de 1 y 3 transductores de 21kHz y 400W, respectivamente. La medida de la distribución de tamaños de partícula se llevó a cabo con un contador aerodinámico de partículas; la información sobre su geometría se obtuvo mediante procesado y análisis computerizado de imagen de las partículas muestreadas. Los NPS en las cámaras varían entre 160dB a lo largo del eje y 140dB en zonas alejadas de las fuentes.

Los resultados experimentales sobre aglomeración se llevaron a cabo con distintos tiempos de tratamiento (entre 2 y 20min.), separando claramente los efectos browniano y acústico. Para ello se esperan 10min. después de llenar la cámara con el humo antes de aplicar el campo acústico, prolongando las medidas del aerosol hasta 10min. después de haber apagado el campo acústico. Las conclusiones obtenidas fueron: (1) con nieblas, la concentración de gotitas decrece tres ordenes de magnitud desde 10⁶ hasta 10³part./cc al cabo de los 20min. de tratamiento, apreciándose un brusco cambio en la pendiente de la concentración al cabo de los 5 primeros minutos. En este tiempo, la concentración disminuye en 2 ordenes de magnitud manifestándose un segundo pico en la curva de distribución inicial de tamaños cercano a las 2.2µm, lo cual es totalmente consistente con el mecanismo ortocinético de aglomeración, cuya tasa de aglomeración es de la forma $dN/dt = -KN$. Durante los restantes 15min. domina el efecto del viento acústico siendo el responsable de la formación de gotas gigantes de hasta 40µm. (2) En comparación con las nieblas, la concentración de partículas de humo decrece mucho más lentamente. Para el mismo campo acústico y las mismas condiciones iniciales del aerosol, la concentración decrece en 2 ordenes de magnitud al cabo de los 20min. debido a que la densidad efectiva de los aglomerados es muy inferior a la de las gotas. La variación de la concentración con el tiempo confirma que los mismos mecanismos de aglomeración están presentes. Es importante destacar que el crecimiento de los aglomerados parece seguir una estructura tipo "fractal", con una densidad efectiva hasta 2 ordenes de magnitud menor que la de las partículas primarias, lo que permite que aglomerados de tamaños < 100mm puedan ser totalmente arrastrados por el campo acústico. Se ha observado también que la estructura de estos grandes aglomerados adopta forma de "escama" con un diámetro que puede alcanzar varios milímetros y cuya dimensión mayor se orienta siempre perpendicularmente al campo acústico. Los aglomerados de tamaño > 1mm "levitan" en los nodos de presión acústica. (3) Al mezclar ambos aerosoles, no aumenta la concentración de partículas, al unirse las gotitas a las partículas. La estructura de partícula ahora es muy similar a las de las partículas del humo pero su densidad efectiva es muy superior, por lo que la concentración disminuye más lentamente que la de la niebla, pero mucho más rápidamente que la del

humo. Estos y otros resultados fueron publicados entre 1988 y 1991 [10-13]. La influencia de la frecuencia acústica (9.4 y 20kHz) en el proceso de aglomeración se mostró acorde con el mecanismo ortocinético para concentraciones bajas ($< 10^6$ part/cc); sin embargo a concentraciones más altas, existen otros mecanismos también presentes pero no totalmente identificados. Estos trabajos permitieron determinar la dependencia del coeficiente de atenuación α (dB/m) con la concentración numérica de partículas y la frecuencia del campo acústico. Las investigaciones mostraron que la atenuación del sonido sigue el modelo de Cole y Dobbins [14]

Estudio de la aglomeración en condiciones dinámicas de flujo. Caracterización del sistema acústico combinado con precipitador electrostático (PE)

Una vez comprobada la viabilidad del proceso de aglomeración en condiciones estáticas de flujo, se pasó a la siguiente etapa de estudio del rendimiento en la retención de partículas de un PE combinado con la cámara acústica (CA) de aglomeración. El objetivo fue analizar el papel de los ultrasonidos en la mejora del rendimiento del PE (fabricado por la empresa Rotthemühle) en el rango (0.1 - 2.5 μ m). Se trabajó con nieblas de gotas de 0.8 μ m de tamaño medio, concentración numérica entorno a 10^6 part/cc y concentración másica entre 0.5 y 5g/m³. Para la fase experimental se construyó una planta piloto a nivel de laboratorio en la que el aerosol fluye desde el generador a través de la CA, del PE, de la unidad de muestreo y medida de partículas y, finalmente de un filtro absoluto antes de salir a la atmósfera. Los caudales varían entre 150 y 1.500m³/h, resultando que el gas fluye con una velocidad de 0.17-1.7m/s en CA y de 0.33-3.3m/s en PE. El rendimiento alcanzado en la separación de partículas de 0.8mm pasó del 87% al 92% al aplicar el campo ultrasonoro, siendo especialmente notable el efecto de retención másica al reducirse esta desde 103mg/m³ hasta 29mg/m³ [15,16]. De esta forma se validó el efecto de mejora experimentado por el PE por la acción de un campo acústico preacondicionador de partículas submicrónicas. En todos los ensayos se trabajó a la máxima potencia del transductor, 400W. Como consecuencia de los buenos resultados obtenidos se publicó una patente [17] y se acometió un cambio de escala del sistema acústico con vistas a la aglomeración de micropartículas presentes en humos de combustión de carbón en centrales térmicas a petición de la empresa ENDESA. El objetivo de este nuevo proyecto de investigación financiado por el Plan de Investigación Eléctrico a través de OCIDE fue el desarrollo de una nueva tecnología acústica para la mejora de la eficiencia de separación de partículas en el rango de 0.1-2.5 μ m de un PE (construido por la empresa Duro Felguera). En este proyecto que comenzó a mediados de 1993 participaron además la empresa ASINEL y el CIEMAT como entidad experta en temas de combustión y de muestreo y análisis de micropartículas.

1.3. Simulación del proceso de aglomeración basado en las interacciones ortocinética e hidrodinámica

Paralelamente a los trabajos de I+D se ha llevado a cabo en el Dpto. desde 1992 un importante trabajo teórico-experimental de la simulación del proceso de aglomeración basado inicialmente en la interacción ortocinética entre partículas desarrollado por Song en la Universidad de Pennsylvania [18]. Este trabajo se ha extendido al mecanismo de interacción hidrodinámico por efecto de la estela acústica. Para ello se ha partido de los trabajos de Hoffmann [19] y se ha desarrollado una técnica de visualización de las trayectorias descritas por partículas esféricas de 8 μ m de tamaño sometidas simultáneamente al campo gravitatorio y a un campo acústico estacionario. Las imágenes de las trayectorias son adquiridas y almacenadas para su estudio posterior en un Power Mac, a través de una cámara CCD y de un sistema óptico de lentes. Se ha observado que las partículas caen por la acción de la gravedad describiendo un movimiento sinusoidal, de manera que cuando dos partículas están suficientemente próximas interactúan en condiciones de flujo de Oseen debido a la aparición de fuerzas hidrodinámicas de atracción o de repulsión dependiendo de su posición relativa respecto de la dirección del campo acústico. Estas fuerzas tienen su origen en la asimetría del flujo hidrodinámico que rodea a las partículas. Los trabajos de visualización se complementaron con el estudio analítico y el desarrollo de un algoritmo numérico en 2-D, que han dado lugar a varias publicaciones y a la realización de una Tesis Doctoral en 1998 [20]. Entre las publicaciones citaremos el trabajo de simulación numérica del proceso basado en los mecanismos ortocinético e hidrodinámico de la estela acústica [21]. Actualmente esta en fase de elaboración el desarrollo de un código numérico que contemple los dos mecanismos que acabamos de citar. Por otro lado se ha extendido el estudio de la interacción ortocinética al caso de una onda acústica incidente 3-D. Así mismo se está poniendo a punto la técnica experimental para la visualización desarrollada al caso de la interacción hidrodinámica basada en la presión de radiación. De esta forma se espera poder disponer a medio plazo, de una potente herramienta de cálculo capaz de predecir el grado de aglomeración alcanzado en un proceso industrial como paso previo al desarrollo optimizado de nuevos sistemas acústicos de potencia.

1.4. Desarrollo de una instalación experimental combinada de preacondicionador acústico y separador electrostático en planta piloto de combustión de carbón y de gasoil

Dentro de la 1ª Fase del proyecto ENDESA-OCIDE mencionado anteriormente se ha desarrollado una instalación experimental en la planta piloto de combustión de

carbón del CIEMAT compuesta básicamente por el combustible de carbón, la CA, el PE y una estación para el muestreo y medida de las partículas del aerosol. La CA de aglomeración de 1,22m³ de capacidad, lleva instalado un sistema array de cuatro transductores de potencia. El array está situado a lo largo del eje de la cámara de 3.5m de largo, para alcanzar una distribución del NPS lo más homogéneo posible, y un tiempo de residencia del aerosol suficiente ("2s.). El diseño del aglomerador implicó el cálculo previo de la distribución de modos normales de vibración para geometrías de cámara cilíndrica y paralelepípedica; la aplicación de los métodos numéricos al cálculo del campo acústico, y a la elaboración de un código por elementos finitos que incluye perturbaciones no lineales de 2º orden presentes en el proceso de aglomeración. Este trabajo se complementó con la medida del campo acústico en las CA de aglomeración para lo que fue necesario el desarrollo de un banco de medidas en el laboratorio de Macrosonidos. Se desarrollaron 8 nuevos prototipos de transductores de potencia (4 de 10kHz y 4 de 20kHz) capaces de alcanzar NPS medios en la cámara en torno a los 150dB, con objeto de estudiar el efecto de la frecuencia acústica en el proceso. El humo procedente de un combustible de LFC de 0.5MWt entra en la CA a temperaturas de hasta 330°C, con un caudal de 1.600Nm³/h, pasa a través del PE y de un filtro lavador antes de salir a la atmósfera. El aerosol presenta una distribución inicial de partículas bimodal con dos picos centrados en 70nm y 0.9mm, respectivamente; una concentración numérica de 5x10⁵part/cc y una concentración másica de 6g/m³. La mejora introducida por el campo acústico en el rendimiento del PE es clara: reducción del 32% en submicrónicas y del 72% en micrónicas [22-27]. En 1995 el Instituto de Acústica a través del Dpto. consiguió con estos trabajos el Primer Premio a la Innovación Tecnológica de la Fundación Babcock [28], lo que avala el interés del sector industrial en nuestro país por el desarrollo de nuevas tecnologías para la reducción de materia particulada emitida a la atmósfera. Durante los tres últimos años se ha extendido el estudio de validación del sistema acústico a humos de gasoil, como paso previo al desarrollo en la 2ª Fase del proyecto ENDESA-OCIDE de una nueva instalación experimental en la Central Térmica de GESA-ENDESA en la isla de Menorca capaz de tratar caudales de 2500Nm³/h a 250°C. Para ello se ha trabajado como paso previo con humos de combustión de gasoil con y sin humedad. El aerosol presenta una concentración másica sumamente baja, dos órdenes de magnitud inferior a la del carbón; una distribución de tamaños unimodal centrada en 40nm (107part/cc) poco polidispersa. En estas condiciones tan poco favorables centramos los esfuerzos en estudiar el comportamiento de la CA funcionando sola como sistema aglomerador-separador de nanopartículas. En todos los ensayos se ha trabajado con el array a máxi-

ma potencia (4Tx400W), con caudales de gases de 900-1.000Nm³/h a 180°C, y se ha analizado el efecto de la frecuencia de 10kHz frente a 20kHz, con y sin un 6%v/v de humedad. Los mejores resultados se obtuvieron a 20kHz (confirmando el mecanismo de interacción ortocinética) y en presencia de humedad alcanzando una disminución en las concentraciones másica y numérica de nanopartículas superior al 55% [29]. Estos primeros resultados aunque positivos requieren de un estudio más controlado que confirme y permita cuantificar el papel que juega la humedad en el proceso. Con este fin se acaba de finalizar la instalación de un humidificador-dosificador ultrasónico a la entrada de la CA en la línea de proceso de la instalación experimental situada en el CIEMAT. Paralelamente a estos trabajos se acometió dentro de la 2ª Fase del proyecto ENDESA-OCIDE el estudio, diseño y realización de un nuevo prototipo modular de CA de 6m³ de capacidad, para tratar caudales de hasta 5.000Nm³/h a 250°C. La nueva CA para el pretratamiento de las partículas está dotada de tolvas para la eliminación de materia particulada y de un nuevo prototipo de transductor macrosónico de 7kHz y 2kW de capacidad de potencia. Este sistema acústico debe generar NPS medios Δ150dB para poder producir un proceso de aglomeración eficiente. Actualmente se está a la espera de la construcción del transductor para su experimentación y validación en Menorca este próximo otoño con humos de combustión de fuel-oil.

2. Aglomeración acústica de partículas en suspensiones acuosas

A continuación se expone algunos de los resultados obtenidos en el estudio llevado a cabo en el marco de dos proyectos de investigación europeos con suspensiones de TiO₂ y ZnS de origen industrial. En este caso la aplicación del modelo de simulación del proceso de aglomeración ha permitido cuantificar el arrastre relativo entre las partículas y el medio acuoso en presencia de un campo acústico estacionario. Se ha constatado que en una suspensión, el mecanismo ortocinético es poco relevante, el debido a la estela acústica prácticamente inexistente, siendo el más importante el debido al efecto de la presión de radiación. El estudio realizado en un campo ultrasónico estacionario a 20kHz mediante una técnica de visualización del proceso de aglomeración a escala microscópica ha confirmado las predicciones teóricas del modelo. Así se ha podido observar que mientras partículas <10mm permanecen distribuidas por todo el volumen de la cámara, las más grandes >(10-100µm) dependiendo de su densidad efectiva son desplazadas hacia los nodos de presión acústica dando lugar a la formación en estos planos de grandes agregados. Estos mecanismos tienen por finalidad acercar las partículas para facilitar su colisión y posterior

agregación pero no aseguran la formación de agregados estables, dado que casi todas las sustancias en contacto con un medio polar como es el agua, adquieren una carga eléctrica superficial que tiende a repeler a las partículas, y que puede ser mayor que las fuerzas de adhesión tipo Van der Waals. Esta carga eléctrica depende no sólo de los mecanismos que puedan desencadenarse en la interacción sólido-líquido, sino también del proceso de fabricación y tamaño de partícula. Existen métodos que eliminan o atenúan la carga de la partícula, pero implican la adición de terceras sustancias que pueden contaminar la suspensión y por tanto no pueden ser utilizadas en todos los casos. Se puede afirmar entonces que producir un proceso estable de agregación acústica entre partículas en una suspensión es bastante más complicado que en el caso de un aerosol [30].

3. Estado actual y perspectivas

Actualmente se continúa con la segunda fase del programa ENDESA-OCIDE, para aglomerar partículas muy finas (0,1 micras) provenientes de centrales térmicas con combustibles líquidos.

En un futuro próximo, la tecnología y conocimientos desarrollados en el campo de la aglomeración acústica nos permitirá establecer criterios para determinar la viabilidad técnico-económica de esta aplicación en cada uno de los numerosos procesos industriales, en los que existe el problema de las micropartículas. Esto facilitará la aplicación a casos concretos en plazos relativamente cortos, abriendo el campo de una nueva tecnología aún no explotada comercialmente. En esta tarea será preciso empeñarse en el inmediato futuro.

Referencias

1. H.S. Patterson, W. Cawood, *Nature* 124, 3209 1931.
2. J.A. Gallego, G. Rodríguez; 8th ICA, London 1974, Contributed Papers II, 424.
3. J.A. Gallego, G. Rodríguez, *Nederlands Akoestisch Genootshcap*, 33, 1975, pp 88-93.
4. O. Brandt, H. Freund, E. Hiedemann, *Kolloid Aeitschrift*, 77, 1 1936.
5. L. Gaete, J.A. Gallego, E. Riera, G. Rodríguez, 9th ICA, Madrid, 1977 Contributed Papers II, pp.619.
6. J.A. Gallego, L. Gaete, G. Rodríguez, Procedimiento y dispositivo ultrasónico de depuración de humos, Patente Española 459523, 1977.
7. J.A. Gallego, E. Riera and G. Rodríguez, *Ultrasonics International'79*, Editorial: IPC Science and Technology Press Limited, ISBN 0 86103 012 5, Guilford, Surrey, U.K. 1979, pp 227-232
8. E. Riera, Estudio del crecimiento relativo de los aglomerados de partículas de un aerosol por la acción de un campo ultrasónico, Tesis Doctoral, Dpto. Física Teórica y Fundamental, Facultad de Ciencias Físicas, UCM, 1984.
9. E. Riera, J. A. Gallego, *J. Sound and Vibration*, Vol.110(3), 413-427, 1986
10. J. Magill, S. Pickering, S. Fourcaudot, J. A. Gallego, E. Riera, G. Rodríguez, *J. Aerosol Sci*, Vol.19, 1377-1381, 1988
11. J. Magill, S. Pickering, S. Fourcaudot, J. A. Gallego, E. Riera, G. Rodríguez, *J. Nuclear Materials*, Vol.166, 208-213, 1989
12. J.A. Gallego, E. Riera, G. Rodríguez, J. Magill, K. Richter, S. Fourcaudot, P. Barraux, *Environmental Pollution 1-ICEP.1*, (ISBN: 0-907776-17-5), Edited by B. Nath, Inderscience Enterprises Ltd., Geneva, 1991, pp 220-227.
13. J.A. Gallego, E. Riera, G. Rodríguez, J. Magill, K. Ritchter, S. Fourcaudot, P. Barreaux, *ASME, WAINCA*, p. 1-6, December 1991
14. J. Magill, Ph. Caparan, J. Somers, K. Ritchter, G. Rodríguez, E. Riera, J. A. Gallego, *J. Aerosol Sci*, Vol. 22 suppl.1, s27-s30, 1991
15. J. Magill, Ph. Caperan, J. Somers, K. Richter, J. A. Gallego, E. Riera, G. Rodríguez, *J. Aerosol Sci*. Vol.23, S803-806, 1992
16. J. Somers, Ph. Caperan, J. Magill, K. Richter, S. Fourcaudot, P. Barreaux, P. Lafarge, E. Riera, G. Rodríguez, J. A. Gallego, N. Seyfert, *Staub - Reinhaltung der Luft (Air Quality Control)*, Vol. 54 (12), p. 451- 454, 1994.
17. J.A. Gallego, E. Riera, G. Rodríguez, Multifrequency Acoustic Chamber for the Agglomeration and Separation of Particles Suspended in Gaseous Effluents, Patente Española 9300507 (1993); Patente Europea EP 0640374.A1 (1994); Patente USA 5,769,913 (1998).
18. L. Song, G. Koopmann, T.L. Hoffmann, *Trans. ASME* 116, 208-214, 1994.
19. T.L. Hoffmann, G. Koopmann, *Rev. of Sci. Ins.*, 65(5), 1527-1536, 1994.
20. I. González, Estudio de las interacciones hidrodinámicas de origen viscosa en la aglomeración acústica de partículas, Tesis Doctoral, Dpto. de Física de Materiales, Facultad de Ciencias Físicas, UCM, 1998.
21. T.L. Hoffmann, *J. Aerosol Sci* Vol. 28(6), 919-936, 1997.
22. J.A. Gallego, E. Riera, L. Elvira, G. Rodríguez, F. Vázquez, T.L. Hoffmann, F. Montoya, *Coal Science*, Editorial: Elsevier Science B.V. Ltd, ISBN, Amsterdam, 1995, pp 1899-1902.
23. J. Rodríguez, F. J. Gómez, M. M. Espigares, A. Bahillo, M. Acha, J. A. Gallego, E. Riera, T. L. Hoffmann, G. Rodríguez, *J. Aerosol Sci* Vol. 27, Suppl. 1, pp. S621-S622, 1996.
24. J.A. Gallego, E. Riera, G. Rodríguez, J.C. Gálvez, T.L. Hoffmann, F. Vázquez, J.J. Rodríguez, F.J. Gómez, M.M. Espigares, M. Acha, F. Montoya, *High Temperature Gas Cleaning*, Editorial: E.Schmidt, ed. Inst. für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, (ISBN: 3-9805220-0-8), Karlsruhe, 1996, pp 60-68.
25. J.A. Gallego, E. Riera, G. Rodríguez, T. Hoffmann, J.C. Gálvez, J.R. Maroto, F.J. Gómez, A. Bahillo, M.M. Espigares, M. Acha, *Environmental Science & Technology*, Vol. 33 (21) Nov. 1999, pp.3843-3849.
26. J.A. Gallego, I. González, E. Riera, *J Acoust Soc Am*. Vol. 105 (2) Pt.2, February 1999, pp1016
27. E. Riera, J.A. Gallego, G. Rodríguez, L. Elvira, I. González, *Ultrasonics*, 38 (2000) 642-646.
28. J.A. Gallego, E. Riera, G. Rodríguez, Filtros acústicos para aglomeración de micropartículas en gases de combustión de carbón, Cuadernos para la Innovación Tecnológica - 4, Fundación Babcock, Serie Verde, p.7-39, 1995. Primer Premio a la Innovación Tecnológica de la Fundación Babcock 1995; *Revista Técnica de Medio Ambiente*, Julio/Agosto, p. 59-73, 1996; *Ibérica Actualidad Tecnológica*, 406, 118-124, 1998.
29. E. Riera, J.A. Gallego, G. Rodríguez, V.M. Acosta, J.J. Rodríguez, J.L. Donroso, D. Sanz, F.J. Gómez, M. Martín, Acoustic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts: First results of the influence of humidity at two acoustic frequencies, (aceptado para su publicación en el *Journal of Aerosol Science*).
30. J.A. Gallego, E. Riera, G. Rodríguez, L. Elvira, J.A. García, *Filtration and Separation II*, Editado por ETSII de Las Palmas, Universidad de las Palmas de Gran Canaria, (ISBN: 84-89528-29-2), 1998, 349-356.