

APLICACIÓN DE TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS DE PLACA EN PROCESOS DE AGLOMERACIÓN DE PARTÍCULAS EN EL MARCO DEL PROYECTO EUROPEO PASSAM

PACS: 43.35.Zc.

Enrique Riera¹, J.A. Gallego-Juárez¹, Luís Herranz², Germán Rodríguez¹, Víctor M. Acosta¹, Alfonso Blanco¹, Alberto Pinto¹, Ignacio Martínez¹, Roque R. Andrés¹

¹Dpto. Sensores y Tecnologías Ultrasónicas (DSSU), ITEFI, CSIC, Serrano 144, E28006-Madrid, España, <u>enrique.riera@csic.es</u>

²Unidad de Seguridad Nuclear, División de Fisión Nuclear, CIEMAT, Avda. Complutense, 22, E28040-Madrid, España

ABSTRACT

During the last years a great effort has been done by the Group of Ultrasonic Systems and Technologies (GSTU) CSIC towards the introduction of innovative industrial processes based on the application of airborne ultrasonic plate transducers. This technology has been specifically designed for the treatment of multiphase gaseous media characterized by its low specific acoustic impedance and high absorption. In this work the main effects induced by the application of power ultrasound (UdP) to an aerosol together with the movement and interaction between fine particles are presented. Besides the development of an experimental facility to study the acoustic agglomeration of fine particles similar to those generated by a nuclear plant in case of severe accident, in the frame of the European PASSAM project, will be showed. This application has great potential for the treatment of air pollution by particulate matter.

RESUMEN

Durante los últimos años se ha realizado un gran esfuerzo por parte del Grupo de Sistemas y Tecnologías Ultrasónicas (GSTU) del CSIC hacia la introducción de procesos industriales novedosos basados en la aplicación de transductores ultrasónicos de placa para radiación en aire. Esta tecnología ha sido diseñada específicamente para el tratamiento de medios gaseosos multifásicos caracterizados por su baja impedancia acústica específica y su elevada absorción. En este trabajo se presentan los principales efectos inducidos por la aplicación de los ultrasonidos de potencia (UdP) a un aerosol junto con el movimiento e interacción entre partículas finas. Además se mostrara el desarrollo de una instalación experimental para estudiar la aglomeración acústica de partículas finas semejantes a las generadas por una central nuclear en caso de accidente severo en el marco del proyecto Europeo PASSAM. Esta aplicación tiene un gran potencial para el tratamiento de contaminación atmosférica por materia particulada.



INTRODUCCIÓN

La aplicación de campos acústicos de elevada intensidad a un aerosol puede inducir efectos de interacción entre las partículas suspendidas en el gas que dan lugar a colisiones y aglomeración, resultando partículas de mayor tamaño que pueden ser eliminadas o precipitadas más fácilmente. Este cambio en la distribución de tamaños de partícula favorece la precipitación de las partículas y mejora la eficiencia en la retención de los sistemas de filtración convencional (precipitadores electrostáticos, depuradores por vía húmeda, filtros de manga, multiciclones, etc.).

Se considera que una gran variedad de mecanismos están involucrados en el proceso de aglomeración. Actualmente se piensa que las interacciones ortocinéticas e hidrodinámicas son los mecanismos predominantes, mientras que otros efectos tales como las corrientes acústicas inducidas y la turbulencia, pueden jugar un papel importante al promover estas interacciones [1,2]. Por consiguiente, la aglomeración acústica (AA) de partículas finas tiene el potencial de mitigar la contaminación del aire generada por las centrales eléctricas, las acerías de arco eléctrico, las industrias cementeras, y por accidentes nucleares severos tales como los ocurridos en Chernóbil y en Fukushima.

En el marco del proyecto europeo EU-PASSAM (No. 323217 – Euratom PP7) dos instituciones españolas CIEMAT y CSIC están involucradas en investigar la eficiencia de un sistema ultrasónico innovador para mitigar el término fuente resultante de un hipotético accidente severo en una central nuclear [3]. El principal objetivo de este trabajo es investigar el comportamiento de un sistema de aglomeración acústica a escala de laboratorio bajo condiciones semejantes a las que prevalecen en el proceso de venteo en un reactor nuclear. Para alcanzar este objetivo, se han planteado las siguientes etapas: a) diseñar, desarrollar e integrar un sistema de AA a 21 kHz en una instalación experimental para la generación y caracterización de aerosoles (PECA, CIEMAT); b) medir el crecimiento y precipitación del aerosol antes y después de la aglomeración ultrasónica y c) encontrar las condiciones óptimas de operación del sistema experimental para trabajar con aerosoles de referencia similares a los presentes en los escenarios de un accidente.

En este trabajo se presentan por una parte los fundamentos teóricos de la aglomeración acústica de aerosoles, haciendo especial hincapié en los dos principales mecanismos involucrados: el efecto ortocinético (EO) y el efecto de la estela acústica (EA), y por otra el desarrollo de una instalación experimental CIEMAT-CSIC para estudiar el efecto de las ondas ultrasónicas de elevada intensidad en el proceso de aglomeración acústica de partículas finas semejantes a las generadas por una central nuclear en caso de accidente severo.

FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA AGLOMERACIÓN ULTRASÓNICA

La aglomeración ultrasónica se rige por varios mecanismos complejos de interacción que, por lo general, se activan de manera combinada [4-9]. Cuando una partícula está suspendida en un campo acústico intenso, numerosas fuerzas actúan sobre ella haciendo que se mueva fuera de su posición inicial de equilibrio. Las interacciones onda-partícula se pueden clasificar en función de efectos lineales y no lineales, así como de procesos de interacción individual y múltiple. Los procesos de interacción lineal incluyen, arrastre de partículas por la onda acústica primaria, y/o por la onda de scattering inducida por la presencia de un obstáculo cercano (interacción de primer orden). En el dominio acústico no lineal, la onda primaria y la onda de scattering ejercen una fuerza constante sobre los obstáculos que se conoce como la fuerza de radiación (FR). El mecanismo hidrodinámico conocido como el efecto de la estela acústica (EA), debido a la asimetría de los campos de flujo que rodean dos partículas adyacentes bajo condiciones de flujo Oseen, también pertenece a este dominio.



Procesos de interacción lineal. Movimiento de vibración de las partículas de un aerosol

Los mecanismos lineales involucrados en el proceso de aglomeración han sido ampliamente estudiados en la bibliografía. El efecto básico para producir colisiones entre partículas es debido a los diferentes arrastres acústicos que induce la vibración sobre las partículas de diferente tamaño y peso durante su propagación a través del aerosol. Concretamente, el movimiento de las partículas en un campo acústico viscoso se determina por su inercia, las partículas más grandes y pesadas sufren menor arrastre que las más pequeñas y ligeras que tienden a moverse con el movimiento del fluido. Este concepto es válido tanto para ondas estacionarias como para ondas progresivas. El movimiento relativo resultante entre las partículas puede conducir a la colisión de partículas y aglomeración. Las partículas más grandes actúan como núcleos de aglomeración de las partículas más pequeñas. Las partículas más grandes barren un cierto volumen en cada ciclo acústico. La colisión se produce si las partículas más pequeñas a2 entran dentro del llamado "volumen de aglomeración" de la partícula más grande a_1 , que consiste en un cilindro de radio igual a la suma de los radios de las dos partículas y longitud igual al doble de la diferencia entre las amplitudes de los desplazamientos que las partículas experimentan durante la vibración a la largo de un ciclo acústico [4].

Suponiendo la propagación de una onda monocromática, la velocidad acústica puede expresarse como:

$$u_g(t) = U_0 sin(\omega t)(1)$$

Donde U_0 es la amplitud de la velocidad y $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular, f es la frecuencia en Hz y t es el tiempo. En el caso de que la ecuación del movimiento de la partícula se limite a la fuerza viscosa dada por le ecuación de Stokes

$$F_p = \frac{du_p}{dt} = 6\pi\eta a \big(u_g - u_p \big) \quad (2)$$

siendo $u_g y u_p$ las velocidades del gas y de la partícula. La expresión del movimiento relativo entre la partícula y el medio oscilante puede expresarse como

$$u_{gp} = u_g - u_p = U_0 \sqrt{1 - |H|^2} \cos(\omega t - \varphi) (3a)$$

$$tan\varphi = \omega\tau_p = \frac{2\rho_p a^2 \omega}{9\eta} y |H| = \frac{U_p}{U_g} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_p)^2}} (3b)$$

donde |H| es el factor de arrastre de la partícula, τ_p el tiempo de relajación de la partícula y φ el ángulo de fase entre la velocidad del gas y la de la partícula [2].

El factor de arrastre constituye la base del modelo de interacción ortocinético que veremos a continuación. De la ecuación (3b) se puede obtener el valor de la frecuencia óptima para que una partícula vibre con su máxima amplitud. En aire a temperatura ambiente este valor es igual a

$$f_{OPTIMA} = \frac{22.4}{a^2 \rho_p} (4)$$

En la Figura 1 se presenta la variación con el tamaño de partículas de factor de arrastre y del ángulo de la fase entre la velocidad del gas y de la partícula para tres frecuencias acústicas determinadas, 5, 10 y 20 kHz.





Figura 1. Variación del factor de arrastre |H|(a), y de la fase $\varphi(b)$ con el radio de partículas de densidad unidad a tres frecuencias: 5, 10 y 20kHz.

Interacción entre las partículas de un aerosol sometidas a un movimiento de vibración. Efecto Ortocinético

Según Mednikov [4], si hay partículas pequeñas dentro del volumen de aglomeración, estas chocaran con la partícula más grande a lo largo de un ciclo acústico. Después de este ciclo, no habrá más partículas pequeñas en el volumen por lo que no se producirá la aglomeración. Así pues, la interacción ortocinética no puede predecir por sí misma un mecanismo de aglomeración en continuo. De hecho, el efecto ortocinético (EO) no puede explicar ni la aglomeración de aerosoles monodispersos ni el modo en el que el volumen de aglomeración se rellena una vez se ha vaciado al cabo de un ciclo. Los posibles mecanismos de relleno incluyen otros efectos tales como la dispersión, la fuerza de radiación (FR), y la estela acústica (EA) debida la asimetría del campo de flujo alrededor de las partículas, entre otros.

Sobre la base de este "volumen aglomeración" (ver Figura 2), Mednikov obtiene una expresión de la velocidad de aglomeración que se ha utilizado en los modelos posteriores desarrollados por Shaw y Tu [10], Song [11], Volk [12] y Tiwary [13]. En efecto, si la velocidad de las partículas en el medio sigue la ley dada por la ecuación (1), y suponiendo por simplicidad que el aerosol es un sistema constituido por solo dos partículas esféricas de radios diferentes, $a_1 >> a_2$, la diferencia entre las velocidades de las dos partículas o el valor de su velocidad relativa será



Figura 2. Volumen de aglomeración

$$u_{21} = u_2 - u_1 = |H_2| U_0 sin(\omega t - \varphi_2) - |H_1| U_0 sin(\omega t - \varphi_1)(6a)$$
$$U_{21} = U_2 - U_1 = |H_{21}| U_0 = U_0 \frac{\omega(\tau_1 - \tau_2)}{\sqrt{(1 + (\omega\tau_1)^2) - (1 + (\omega\tau_2)^2)}} = U_0 |H_{21}|$$
$$= U_{21\,MEDNIKOV}^{ORTO}(6b)$$



Posteriormente, Song [11] y Hoffmann [14] propusieron el mecanismo de la estela acústica (EA) para justificar el proceso de rellenado del volumen de aglomeración. Teniendo en cuenta este efecto Song obtuvo una nueva expresión para la amplitud de la velocidad relativa entre las dos partículas, dada por la expresión

$$U_{21\,SONG}^{ORTO} = U_0 |H_{21} + G_{21}| = U_0 q_{s12}(7)$$

donde G_{21} es la función de interacción por dispersión que depende del número de onda longitudinal $k = \omega/c_0$ y el número de onda viscoso $K = (1 + i)\sqrt{\omega\rho_0/2\eta}$, c_0 la velocidad del sonido en el fluido, ρ_0 su densidad, y q_{s12} un factor de arrastre relativo modificado para partículas esféricas.

Procesos de interacción no lineal. Interacción hidrodinámica entre las partículas de un aerosol

Efecto de la fuerza de radiación mutua.

Este efecto está basado en el principio hidrodinámico de Bernoulli y fue propuesto en 1891 por König [15]. Establece que cuando dos partículas se encuentran situadas en dirección normal a la dirección de propagación se manifiesta una fuerza de atracción entre ellas. La composición de ambos campos produce un efecto de interacción mutua entre las partículas debidos a la fuerza de radiación. Esta interacción puede ser atractiva o repulsiva dependiendo de que la línea que une sus centros sea o no sea paralela a la dirección de propagación de la onda acústica (ver Fig3-I). Este efecto es reseñable cuando las partículas son de tamaños muy diferentes y se encuentran próximas entre sí. Song [11] obtuvo la expresión de la fuerza de interacción entre dos partículas debida a la interacción mutua de los campos acústicos secundarios debidos a la fuerza 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

$$u_{REL12} = \frac{1}{32\pi^2} \frac{\rho_0 U_0^2}{\eta} \frac{(a_1 a_2)^2}{d^4} (3\cos^2\theta - 1)(a_1 G_{21r} - a_2 G_{12r})(8)$$

en donde los índices 1 y 2 se refieren a las partículas, d a la separación entre ellas mientras que las funciones de interacción G representan los campos acústicos secundarios que contienen los efectos debidos al arrastre y a la componente rotacional de las ondas de difusión. La velocidad relativa es positiva cuando hay atracción y negativa cuando hay repulsión. De la ecuación (8) se deduce que la velocidad relativa aumenta con el cuadrado de la amplitud de la excitación y con el producto del radio de las partículas. Es de notar que este efecto está presente tanto para partículas de diferente como del mismo tamaño.



Figura 3. Zonas de atracción y repulsión de las dos fuerzas de interacción hidrodinámica debidas al: (I) efecto de la fuerza de radiación mutua (dispersión), y (II) efecto de la estela acústica



En la figura 3 se presentan las zonas de atracción y de repulsión entre partículas, dependiendo de su orientación respecto a la dirección de propagación, debidas a la fuerza de radiación mutua y a la estela acústica.



Figura 4. Convergencia entre partículas debido al efecto de la estela acústica durante medio ciclo acústico. Partículas alineadas paralelamente a un campo acústico

Efecto de la estela acústica.

Dianov [16] y Tiwary [13] 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 efecto de una onda acústica siendo la línea que une sus centros paralela a la dirección de propagación, la partícula de "cabeza" (ver figura 4) 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 las dos partículas se invierte durante el segundo semiciclo en el que las velocidades cambian no de dirección pero si de sentido. El resultado es un movimiento relativo entre las partículas, de carácter atractivo cuando ambas están alineadas con la dirección de propagación de la onda acústica, y de carácter repulsivo cuando están en dirección ortogonal (Figura 3-II).





Figura 5a. Visualización del proceso de atracción entre dos partículas debido al efecto de la estela acústica (EA)

Figura 5b Validación numérico-experimental de las trayectorias de convergencia entre dos partículas (EA)



Resultados experimentales y cálculos teóricos llevadas a cabo por González años más tarde confirmaron experimentalmente por primera vez a principios del siglo XXI que el efecto de la estela acústica es el mecanismo dominante de atracción para partículas de igual tamaño separadas a distancias mayores a sus desplazamientos acústicos [17-19] (ver Figuras 5a y 5b). Sin embargo, la fuerza de radiación mutua actúa sobre partículas cercanas (con una separación de pocos diámetros) y puede producir un efecto de repulsión opuesto al de atracción debido al de la estela acústica [19]. Este efecto podría ser la causa de la formación de pseudo-aglomerados donde las partículas se precipitan juntas por gravedad pero sin llegar a colisionar entre sí.

La expresión de la velocidad relativa entre partículas obtenida por Dianov viene dada por

$$u_{12} = \frac{3}{2} \frac{U_0}{\pi d} (a_1 l_1 + a_2 l_2)(9)$$

en donde l_1 y l_2 son los coeficientes de deslizamiento de las partículas en condiciones de flujo de Oseen que son función del radio y densidad de partícula, de la viscosidad del fluido, de la velocidad de vibración y de la frecuencia de la onda acústica.

MODELADO DEL PROCESO DE AGLOMERACIÓN ACÚSTICA BASADO EN EL MECANISMO ORTOCINÉTICO

La ecuación dinámica de un aerosol formado por partículas de dos tamaños diferentes, está basada en la primera ley de difusión de Fick. Esta ley establece que la velocidad de producción de colisiones n_{12} entre partículas de tamaño 1 y de tamaño 2 se expresa como

$$\frac{dy}{dx} = -K_{12}n_1n_2 \quad (10)$$

en donde K_{12} es *el coeficiente* (*o kernel*) *de aglomeración* para partículas de los grupos de tamaños 1 y 2; n_1 y n_2 son las concentraciones iniciales para los dos grupos respectivamente.

Mednikov [4] definió el coeficiente de aglomeración ortocinético para el caso particular en el que la concentración de partículas finas sea mucho mayor que el de las partículas grandes $n_2 >> n_1$ y que $a_2 << a_1$, mediante la siguiente expresión:

$$K^* = 2\varepsilon\beta a_1^2 n_1 U_0 = \sqrt{H_1^2 + H_1^2 - 2H_1 H_2 (H_1 H_2 + B_1 B_2)} (11)$$
$$n = n_0 e^{-K^* t}$$

donde las funciones $H_1 y H_2$, representan los coeficientes de arrastre de las partículas, y $B_1 y B_2$ sus coeficientes de fluidez, ε el factor de captura y β el factor de relleno del volumen de aglomeración. Estas funciones dependen del tamaño de partícula (a_1, a_2) , de la frecuencia acústica de la onda emitida (f), de la amplitud de la onda acústica (U_0) , del tiempo de relajación de la partícula (τ_1, τ_2) el cual a su vez es función de la densidad de la partícula (ρ_1, ρ_2) .

DESARROLLO DE SISTEMA EXPERIMENTAL PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE AGLOMERACION ACÚSTICA (AA)

En las pruebas experimentales a llevar a cabo en el marco del proyecto PASSAM el CIEMAT y el CSIC estudiarán la influencia de los principales parámetros acústicos y de los aerosoles



involucrados en el proceso de AA. Estos parámetros incluyen la intensidad acústica, el tiempo de tratamiento (como una función de la velocidad del gas), la humedad del gas, el patrón del campo acústico, la densidad de las partículas y su tamaño. Es importante subrayar que los ensayos se llevarán a cabo en condiciones similares a las esperadas durante un hipotético venteo filtrado de contención en caso de accidente severo en un reactor nuclear [20].



Figura 6. Vista frontal de la planta experimental PECA del CIEMAT







Figura 7b. Esquema de la integración del MSAA en el interior del PECA

Para este estudio se está utilizando el acoplamiento PECA-MSAA. PECA es una instalación experimental multipropósito del CIEMAT usada para la generación y caracterización del comportamiento de aerosoles sometidos a diferentes condiciones de accidente (ver Figura 6). Por su parte, MSAA es un sistema desarrollado por el CSIC para inducir la aglomeración a través de la aplicación de campos ultrasónicos intensos al aerosol. Se llevaran a cabo experiencias bajo condiciones dinámicas de flujo. El sistema MSAA consta básicamente de: a) una cámara ultrasónica de aglomeración modular de sección rectangular; b) dos transductores



ultrasónicos de potencia con radiador de placa circular escalonada, y c) dos generadores electrónicos de potencia. Se trabajara a una frecuencia de 21 kHz en condiciones de campo estacionario. Se ha medido un valor medio del NPS de 155 dB lo que garantiza la generación del proceso de AA. Para ello cada transductor trabajará con una potencia eléctrica aplicada de 300W. La figura 7a presenta una vista del sistema experimental MSAA colocado en su posición de trabajo (vertical) en las instalaciones del CSIC para las medidas de campo acústico. La figura 7b muestra el esquema del montaje e instalación del MSAA en el interior de la vasija del PECA para el desarrollo de la fase experimental de estudio del proceso de AA.



Figura 8. Diagrama del sistema experimental PECA-MSAA para las pruebas de AA a 21 kHz

Para finalizar, en la Figura 8 se presenta el sistema experimental completo desarrollado, construido e integrado para la realización de las pruebas experimentales. La campaña de ensayos para estudiar la influencia de los principales parámetros del aerosol y del campo ultrasónico involucrados en el proceso se llevara a cabo a lo largo del último trimestre del 2014 y del primero del 2015.

CONCLUSIONES

En el marco del proyecto europeo PASSAM se ha desarrollado un trabajo teórico sobre los fundamentos físicos del proceso de aglomeración acústica (AA) de las partículas de un aerosol que pone de manifiesto que el mecanismo responsable del proceso de AA en aerosoles polidispersos es el efecto ortocinético (EO), mientras que el mecanismo responsable del proceso de AA en aerosoles monodispersos es el efecto hidrodinámico de la estela acústica (EA). Además se ha presentado el desarrollo y construcción de un sistema experimental innovador para el estudio del efecto de las ondas ultrasónicas de elevada intensidad en el proceso de AA a escala de planta piloto (MSAA) que ha sido integrado en una instalación experimental para el estudio de aerosoles (PECA), con el objetivo de mitigar el término fuente en caso de accidente severo en una central nuclear.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida del Proyecto Europeo PASSAM 323217 del FP7-Fission-2012.

BIBLIOGRAFIA



- [1] Riera, E., Gallego-Juárez, J.A., Mason, T.J., Airborne ultrasound for the precipitation of smokes and powders and the destruction of foams, Ultrasonics Sonochemistry, 13 (2006) 107-116
- [2] Riera, E., González, I., Rodríguez, G., Gallego-Juárez, J.A. (2015) 'Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications' (Chapter 34) in Power Ultrasonics, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, Ed. J.A. Gallego-Juárez and K.F. Graff, (httb://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-028-6.00034-X), 1023-1061
- [3] Albiol, T., Herranz, L., Riera, E., Guieu, S., Lind, T., Manzini, G., Auvinen, A., Losch, N.: (2013) New studies on passive and active systems towards enhanced severe accident source term mitigation – The PASSAM Project, Eurosave Forum – November 5-6, 2012, Bruxelles (Belgium)
- [4] Mednikov, E.P. (1965) 'Acoustic coagulation and precipitation of aerosols', New York, Consultants Bureau
- [5] Shirokova, N.L. (1973) 'Aerosol coagulation', in Rozenberg LD, Volume 2, Physical Principles of Ultrasonic Technology, New York, Plenum Press, 475-539
- [6] Temkin, S. (1994) 'Gas dynamic agglomeration of aerosols. I. Acoustic waves', Phys Fluids, 6, 2294– 2303
- [7] Shaw, D.T. (1978), 'Acoustic agglomeration of aerosols', in Shaw DT, Recent developments in aerosol science, New York, John Wiley and Sons, 279-319
- [8] Fuchs, N.A. (1989) 'The mechanics of aerosols', New York, Dover Publications Inc.
- [9] Temkin, S. (1981) 'Elements of Acoustics', New York, John Wiley & Sons
- [10] Shaw, D.T. and Tu, K.W. (1979) 'Acoustic particle agglomeration due to hydrodynamic interaction between monodisperse aerosols', J Aerosol Sci, 10, 317-328
- [11] Song, L. (1990) '*Modelling of acoustic agglomeration of aerosol particles*', Ph.D. Dissertation, The Pennsylvania State University
- [12] Volk, M. (1977) 'Sonic agglomeration of aerosol particles', Ph.D. Dissertation, The Pennsylvania State University
- [13] Tiwary, R. (1985) 'Acoustic agglomeration of micron and submicron fly-ash aerosols', Ph.D. Dissertation, The Pennsylvania State University
- [14] Hoffmann, T.L. (1993) ^{(Visualization of particle interaction and agglomeration in an acoustic field', Ph.D. Dissertation, The Pennsylvania State University}
- [15] König, W., Hydrodynamisch-akustische Untersuchungen: II. Über die Kräfte zwischen zwei Kugeln in einer schwingenden Flüssigkeit und über die Entethung der Kundt'schen Staubfiguren, Annalen der Physik und der Chemie, 2 (4) (1891) 549-563.
- [16] Dianov, D.V., Podolskii, A.A., Turubarov, V.I.*Calculation of the hydrodynamic interaction of aerosol particles in a sound field under Oseen flow conditions*, Sov. Phys. Acoust. 13 (1968) 314-319.
- [17] I. González, T.L. Hofmann, J.A. Gallego-Juárez, Theory and calculation of sound induced particle interaction of viscous origin, ActaAcustica united with Acustica 86 (5) (2000) 784-797.
- [18] I. González, T.L. Hofmann, J.A. Gallego-Juárez, *Visualization of hydrodynamic particle interaction: Validation of a numerical model*, ActaAcustica united with Acustica 88 (1) (2002) 19-26.
- [19] I. González, J.A. Gallego, E. Riera (2003), Experimental study of hydrodynamic interactions acoustically induced on aerosols at diverse acoustic entrainments: Influence of the particle entrainment, Journal of Aerosol Science 34, 1611-1631
- [20] L.E. Herranz, T. Albiol, T. Lind, K. Dieschbourg, E. Riera, S. Morandi, P. Rantanen, M. Chebbi, N. Losch, *Technical bases for experimentation on source term mitigation: The EU-PASSAM project*, The 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and safety (NUTHOS-10), Okinawa, Japan, December 14-18, 2014