

Estudio del comportamiento de la película de líquido en flujo anular aire-agua vertical ascendente al variar la tensión superficial mediante mezclas agua-1-butanol

Y. Rivera, J.L. Muñoz-Cobo, J.L. Cuadros, C. Berna, A. Escrivá,
Susana M. Iglesias, Dany S. Domínguez.
Instituto de Ingeniería Energética
Universitat Politècnica de València (UPV)
Camino de Vera s/n, 46022 València (Spain)
Tel: 0034-963879245, Email: yaridu@upv.es

Resumen – El documento recoge el estudio llevado a cabo en la instalación VAFF (Vertical Annular Flow Facility) donde se estudia el comportamiento del régimen de flujo anular vertical ascendente aire-agua. Se han llevado a cabo un conjunto de tests con un rango de caudales de aire de 2000 – 3500 l/min y de agua de 4 – 7 l/min. Estos tests se han repetido un total de cuatro veces variando la proporción de 1-butanol que se le adiciona al agua con objeto de variar su tensión superficial manteniendo prácticamente inalteradas el resto de propiedades. De esta forma las tensiones superficiales obtenidas fueron de $72 \cdot 10^{-3}$, $68.5 \cdot 10^{-3}$, $55 \cdot 10^{-3}$ y $45 \cdot 10^{-3}$ N/m. En el documento se muestran algunos de los resultados, así como el error cometido.

Palabras clave – Flujo anular, 1-butanol, disturbance waves, ripple waves, película de líquido, sondas de conductancia.

1. INTRODUCCIÓN

En los reactores BWR ocurre que en casi la totalidad de su longitud vertical se produce flujo anular, por tanto, la película de líquido es delgada y la velocidad de las gotas alta, esto produce que los fenómenos de salpicado y emergencia de fluido de la interfase resulten ser los fenómenos dominantes [1] [2].

El proceso de secado o dryout es un fenómeno indeseable en la mayor parte de las instalaciones ya que afecta directamente al coeficiente de transmisión de calor de los elementos combustibles. Dada la importancia de este proceso es necesario estudiar correctamente la película de líquido, así como el arranque de gotas de la misma.

En el flujo anular, la velocidad del gas es normalmente superior a la del líquido lo que produce arranque de gotas y la generación de ondas superficiales muy pronunciadas denominadas *Disturbance Waves* (DW). Estas ondas, que se mueven en la dirección del flujo, se mueven a una velocidad aproximadamente constante, de acuerdo con Azzopardi et al. y Belt et al. Adicionalmente aparecen ondas mucho más pequeñas que denominamos ondas de rizado o *Ripple Waves* (RW) [3] [4] [5] [6] [7] [8].

En este estudio se muestra los resultados de los experimentos realizados en la instalación VAFF (Vertical Annular Flow Facility) en el régimen de flujo anular vertical ascendente continuando previos estudios [9]. Para analizar los efectos de la tensión superficial a temperaturas elevadas se ha añadido 1-butanol, sustancia que varía sustancialmente la tensión superficial sin afectar prácticamente al resto de propiedades del agua (densidad y viscosidad). El caudal de aire se introduce en el rango de 2000 – 3500 l/min mientras que el agua se inyecta con caudales entre 4 – 10 l/min. La tensión superficial varía de $45 \cdot 10^{-3}$ N/m (correspondiente a agua pura) hasta los $72 \cdot 10^{-3}$ N/m. Para medir la película de líquido se ha utilizado una sonda de conductancia aprovechando la relación entre

la corriente eléctrica y espesor de agua. Con los valores medidos se han obtenidos correlaciones para la amplitud de las ondas más importantes (disturbance waves), espesor de la capa base y otras magnitudes.

2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL VAFF

2.1. Descripción de la instalación.

La instalación VAFF (*Vertical Annular Flow Facility*) está compuesta de un ciclo aire-agua y equipada con diferentes sensores con el objetivo de medir el espesor de película del flujo anular. Adicionalmente cuenta con un sistema de medida para conocer si el flujo se encuentra desarrollado. En la figura 1 puede observarse un esquema de la instalación. Las dimensiones principales de la misma son aproximadamente 5 metros de tubería vertical en la que el agua y el aire son introducidos por su parte inferior y extraídos por la superior. El diámetro de la tubería es de 44mm y para facilitar la entrada del agua y aire en forma de flujo anular se utiliza un inyector (detallado en la figura 1).

Para medir las distintas variables se dispone de sensores colocados de forma estratégica a lo largo de toda la instalación. La operación de la instalación es la siguiente:

1. El aire es inyectado en el sistema a través de un compresor, cuya presión de trabajo máxima y caudal volumétrico son 8 bares y 3750 l / min respectivamente.
2. El agua se inyecta a través de una bomba de agua, cuya presión de descarga máxima es de 4,2 bares.
3. Se utiliza un sistema de inyección de agua presurizada diseñado específicamente para crear una película líquida en forma de anillo justo antes de la parte inferior de la sección de prueba. El principio de funcionamiento del inyector de agua se basa en la diferencia de presión entre ambos lados del tubo de acero inoxidable sinterizado con un valor de porosidad dado. El sistema de inyección de agua es un tanque cilíndrico que se muestra también en la figura 1, con una parte central hueca y un tubo de acero inoxidable sinterizado. La parte externa del cilindro está presurizada, mientras que a través de su parte interna circula la corriente de aire a presión casi atmosférica. Debido a la porosidad del material sinterizado, la corriente de agua puede pasar a través de él, siendo el caudal volumétrico del agua función de la diferencia de presión entre los lados interno y externo del material de acero inoxidable sinterizado.
4. El flujo de dos fases atraviesa la sección de prueba, en la que se toman la mayoría de las mediciones experimentales.
5. En la parte superior el agua del anillo de líquido se retira a través del tanque de extracción. El principio de funcionamiento del tanque de extracción es el mismo que en el sistema de inyección de agua.
6. El agua se devuelve a un tanque de almacenamiento, desde el cual la bomba de recirculación aspira el agua y la conduce nuevamente al sistema del inyector, comenzando un nuevo ciclo de agua.
7. La mezcla de dos fases, compuesta por la fase gaseosa y las gotas arrastradas, se separa a través de un ciclón centrífugo.
8. El aire se ventila a la atmósfera a través de la sección final del ciclón centrífugo.
9. El compresor inyecta aire fresco nuevamente a la instalación experimental y el ciclo del aire comienza nuevamente.

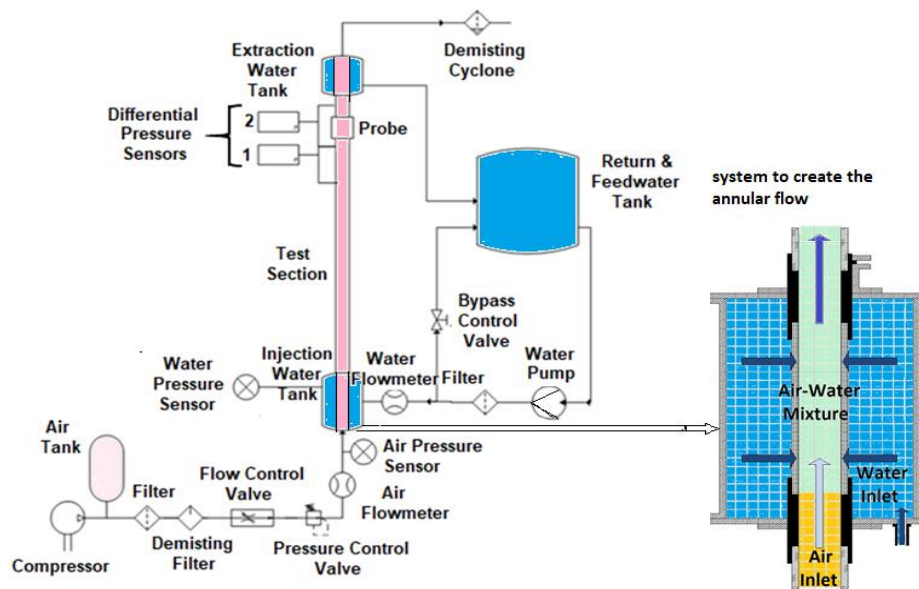


Figura 1. Esquema de la instalación experimental VAFF (Vertical Annular Flow Facility). A la derecha se puede observar en detalle el inyector de agua.

2.2. Instrumentación y sistema de adquisición de datos.

La instrumentación de la instalación puede dividirse en dos tipos. Por un lado, aquella instrumentación necesaria para controlar las condiciones en las que se desarrollan los experimentos y por otro, la sonda encargada de medir la película de líquido.

Los dispositivos de medida más importantes utilizados para medir las condiciones experimentales son:

- Sensores de presión diferencial localizados en la parte superior de la sección de medida. Rango de medida 0-2 kPa, precisión $\pm 1.0\%$ del fondo de escala y error de linealidad igual o inferior a $\pm 0.5\%$ del fondo de escala.
- Sensores de presión relativa localizados tanto en los tanques de inyección y extracción como en varios puntos a lo largo de la instalación. Estos sensores tienen una medición de rango de presión entre 0 y 1 bar, con un error de linealidad, histéresis y errores de repetibilidad inferiores a $\pm 0.3\%$ F.S. y precisión de ajuste de error punto cero y escala completa inferior a $\pm 0.3\%$ F.S.
- Las medidas de temperatura se llevaron a cabo utilizando termopares tipo T (cobre constantán), que son adecuados en el rango de -200 a 350 °C. Su error, para mediciones superiores a 0°C , es el mayor valor entre 1.0°C y 0.75% de la temperatura medida.
- Las mediciones de caudal volumétrico de agua se realizan con un medidor de flujo electromagnético Kroni Optiflux 4300 C Series. Su intervalo de medición de caudal volumétrico varía de 0 a 20 l/min y tiene una precisión superior a $\pm 0.3\%$ del intervalo.
- Las mediciones del caudal volumétrico de gas de alta velocidad se realizan con un medidor de flujo magnético SMC PF2A706H. Su rango de medición de caudal volumétrico cubre de 300 a 6000 l/min, el medidor de flujo tiene una linealidad de ± 1.5 de escala completa (F.S.) o menos y una repetibilidad de ± 1.0 F.S. o menos.

Para estimar las características de las ondas interfaciales utilizamos una sonda de conductancia. La sonda de conductancia utilizada en estas mediciones se describe en la referencia [11]. La base física de los sensores de conductancia es la dependencia de la conductividad del agua del valor del espesor de la película [12]. El diseño de las sondas de conductancia consta de tres

electrodos montados en la pared y alineados en la misma dirección de flujo de la película líquida y el flujo de gas. El electrodo central está conectado a tierra. El electrodo transmisor está excitado, con una señal sinusoidal de 300 KHz y 4 Vpp. El electrodo receptor es responsable de recoger la corriente eléctrica que conduce la película de agua.

La cantidad total de corriente recogida por el receptor es proporcional al espesor de la película líquida entre ambos electrodos, es decir, entre el transmisor y el receptor. Esta dependencia es causada por la correlación existente entre el grosor de la película líquida y las líneas de campo eléctrico, debido a que un mayor grosor de la película se traduce en un mayor número de líneas de campo eléctrico que el receptor puede recoger. En consecuencia, la señal eléctrica recogida por el receptor cambia cuando una onda interfacial cruza la región del sensor, y este cambio permite la determinación de las variaciones de espesor de la película líquida con el tiempo.

Finalmente, la señal del receptor se rectifica y amplifica mediante un circuito electrónico y luego se registra en el sistema de adquisición de datos. Al mismo tiempo, esta señal nos da la forma de la onda cuando se traza frente al tiempo.

3. MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS

Las medidas experimentales se componen de cuatro series de datos experimentales. Cada serie de datos se realizó con una concentración diferente de 1-butanol en agua, lo que provoca el agua varíe muy poco sus propiedades a excepción de una, la tensión superficial. De esta manera, cada serie de datos consistió en varias medidas con diferentes condiciones de contorno, es decir, diferentes caudales volumétricos de aire y agua, respectivamente, que se muestran en la tabla 1.

Inicialmente se hizo una serie de medidas para el agua pura con tensión superficial igual a $72 \cdot 10^{-3}$ N/m, a 25°C y las tres adicionales se obtuvieron agregando una pequeña cantidad de 1-butanol, lo que produce tensiones superficiales de $68.5 \cdot 10^{-3}$, $55 \cdot 10^{-3}$ y $45 \cdot 10^{-3}$ N/m. Para cada solución de agua-1-butanol se realizaron 49 tests experimentales, que se obtuvieron mediante la combinación de siete caudales volumétricos de aire y líquido. Los siete caudales de líquido van de 4 a 10 l/min, con incrementos de 1 l/min. Mientras que los siete caudales volumétricos de aire variaron entre 2000 l/min y 3500 l/min (es decir, $0.0333 - 0.0583$ m³/s), incrementando 250 l/min entre cada test.

Este procedimiento se repitió para el resto de 3 mezclas de agua-1-butanol. El objetivo principal de cambiar la tensión superficial del agua es estudiar los fuertes efectos que sufre el comportamiento de la onda interfacial, en respuesta a la variación en la tensión superficial. Disminuir el valor de la tensión superficial del agua es muy parecido al efecto del aumento de la temperatura. Durante todas las mediciones experimentales, la presión en la parte superior de la instalación se mantuvo en condiciones atmosféricas, las temperaturas del agua y del aire se mantuvieron aproximadamente constantes a aproximadamente 30 y 25 °C respectivamente.

Tabla 1. Condiciones de contorno de los 49 tests realizados para cada tensión superficial. Unidades de los caudales de gas y líquido Q_g y Q_l en litros/minuto.

Tensión superficial de cada conjunto de tests $\sigma = [45, 55, 68.5 \text{ y } 72] \times 10^{-3} \text{ N/m}$						
$Q_g \times Q_l$	$Q_g(\text{litros/min}) \times Q_l(\text{litros/min})$					$Q_g \times Q_l$
2000x4	2250x4	2500x4	2750x4	3000x4	3250x4	3500x4
2000x5	2250x5	2500x5	2750x5	3000x5	3250x5	3500x5
2000x6	2250x6	2500x6	2750x6	3000x6	3250x6	3500x6
2000x7	2250x7	2500x7	2750x7	3000x7	3250x7	3500x7
2000x8	2250x8	2500x8	2750x8	3000x8	3250x8	3500x8

2000x9	2250x9	2500x9	2750x9	3000x9	3250x9	3500x9
2000x10	2250x10	2500x10	2750x10	3000x10	3250x10	3500x10

Las variables más importantes del experimento fueron medidas en tiempo real durante las 49 pruebas de cada una de las cuatro series de datos. Las principales variables que se midieron y almacenaron durante los sesenta segundos de cada ejecución experimental fueron: caudales volumétricos de aire y agua, temperaturas y presiones, y la señal de voltaje de la sonda de conductancia, que se convirtió en mm utilizando unas curvas de calibración previamente calculadas.

Para eliminar la fluctuación de ruido de la señal, se aplicó un filtro Savitzky-Golay a las señales cruda [13]. La Figura 2 muestra el espesor de la película frente al tiempo obtenido para tres mezclas diferentes de agua y 1-butanol y agua pura, manteniendo los caudales volumétricos de las constantes de aire y agua a (2250 l/min) y (7 l/min) respectivamente. Se observa que la altura de las ondas de perturbación disminuye continuamente al aumentar la concentración de 1-butanol.

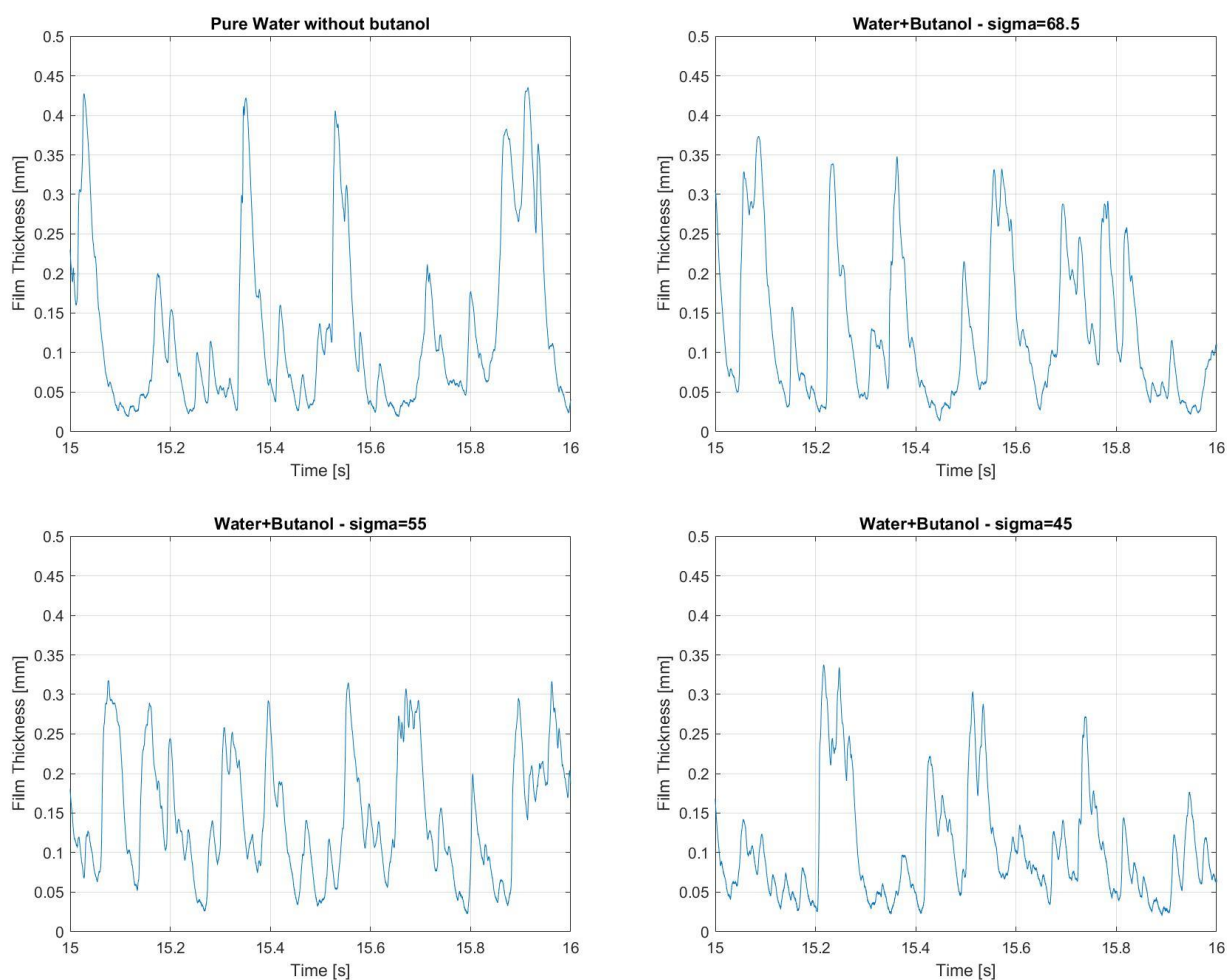


Figura 2. Evolución de la película de líquido durante un segundo para las distintas mezclas de agua-1-butanol manteniendo constante el caudal de aire (2250 l/min) y de agua (7 l/min).

Las variables que se obtuvieron a partir de los datos de la señal fueron:

- El valor medio de la amplitud de las ondas de perturbación, durante el intervalo de tiempo considerado para cada test con condiciones límite dadas, denotado por A_{DW} .
- El valor medio de la frecuencia de las ondas de perturbación denotado por ν_{DW} .
- El grosor de la película base denotado por $\bar{\delta}_b$.
- El grosor medio de la película $\bar{\delta}_m$
- El valor medio del grosor de la película en las ondas de perturbación denotadas por $\bar{\delta}_{DW}$.

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos para el test con 1-butanol y $\sigma = 55 \cdot 10^{-3}$ N/m, para $Q_{gas} = 2500$ l/m, y diferentes valores del caudal de líquido, mientras que la tabla 3 muestra los mismos resultados obtenidos para el agua sin agregar 1-butanol, para los mismos casos.

Tabla 2. Resultados experimentales para agua-1-butanol con $\sigma = 55 \cdot 10^{-3}$ N/m. Todas las variables están representadas en mm excepto los caudales Q_{gas} y $Q_{líquido}$ que están en l/min.

$Q_g \times Q_l$	$\bar{\delta}_b$	$\bar{\delta}_{DW}$	$\bar{\delta}_{ripples}$	ν_{DW}	$A_{ripples}$	A_{DW}	$\bar{\delta}_m$
2500x4	0.12680	0.53267	0.14103	8.966	0.00712	0.4094	0.19057
2500x5	0.13107	0.54601	0.14297	9.416	0.00595	0.4179	0.20957
2500x6	0.13405	0.54833	0.14545	10.36	0.00570	0.4171	0.22747
2500x7	0.13719	0.54720	0.14778	11.13	0.00530	0.4126	0.24316
2500x8	0.13790	0.52920	0.14683	10.88	0.00447	0.3935	0.24623
2500x9	0.14065	0.52677	0.14950	10.15	0.00443	0.3883	0.25594
2500x10	0.14269	0.50716	0.15181	10.06	0.00456	0.3667	0.26088

Tabla 3. Resultados experimentales para agua pura con $\sigma = 72 \cdot 10^{-3}$ N/m. Todas las variables están representadas en mm excepto los caudales Q_{gas} y $Q_{líquido}$ que están en l/min.

$Q_g \times Q_l$	$\bar{\delta}_b$	$\bar{\delta}_{DW}$	$\bar{\delta}_{ripples}$	ν_{DW}	$A_{ripples}$	A_{DW}	$\bar{\delta}_m$
2500x4	0.12904	0.61000	0.14447	10.39	0.00771	0.48480	0.20590
2500x5	0.13365	0.62178	0.14750	11.22	0.00692	0.49158	0.22304
2500x6	0.13814	0.62931	0.15170	12.41	0.00678	0.49456	0.24312
2500x7	0.14285	0.63207	0.15614	13.52	0.00664	0.49253	0.25654
2500x8	0.13423	0.64154	0.14630	13.93	0.00603	0.51032	0.26493
2500x9	0.13559	0.64150	0.14692	14.19	0.00566	0.50874	0.26800
2500x10	0.13483	0.64811	0.14874	14.74	0.00695	0.51676	0.27814

El error aproximado se ha calculado mediante un test de repetibilidad compuesto de 10 ensayos. Asumiendo una distribución de probabilidad normal, el error accidental calculado se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Error accidental para las distintas variables.

	$\varepsilon_{acc}(\delta_m)$ (μm)	$\varepsilon_{acc}(\delta_b)$ (μm)	$\varepsilon_{acc}(A_{DW})$ (μm)	$\varepsilon_{acc}(V_{DW})$ (Hz)
ε_{acc}	29.3	5.12	53.4	0.92
$\pm\varepsilon_{rel,acc}$, %	± 6.2	± 1.76	± 7.9	± 4.5

4. CONCLUSIONES

El documento recoge los detalles más importantes de la instalación VAFF (*Vertical Annular Flow Facility*). Esta instalación está destinada a medir el espesor de película en un flujo anular aire-agua, y así analizar el comportamiento que sigue en especial la interfase entre ambos fluidos. Se indica la diferente instrumentación utilizada, en concreto las sondas de conductancia, encargadas de medir el espesor de película

Para reproducir el comportamiento del agua a altas temperaturas se ha añadido 1-butanol en pequeñas proporciones y así variar la tensión superficial dejando casi inalteradas el resto de propiedades. Se puede observar fácilmente que el espesor de película va reduciéndose a medida que disminuye la tensión superficial. Procesando la señal se han calculado diferentes variables relacionadas con la película de líquido como son la amplitud de las *Disturbance Waves* o Ondas de perturbación que aparecen, su frecuencia y el espesor de la película de líquido de base o inalterada.

Finalmente se ha calculado el error cometido a partir de un test de repetibilidad de diez casos. Los valores de error son relativamente bajos obteniendo el más alto en la amplitud de las *Disturbance Waves* con un máximo aproximado de $\pm 8\%$.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el apoyo de la Agencia Nacional de Investigación de España al proyecto EXMOTRANSIN, ENE2016-79489-C2-1-P.

REFERENCIAS

- [1] Book: Collier, J.G., Convective Boiling and Condensation, Second Edition, McGraw-Hill International Book Company, 1981.
- [2] Book: Stephan, K., Heat Transfer in Condensation and Boiling, Edited by Springer Verlag, English Edition, 1992
- [3] Berna, C., Escrivá, A., Muñoz-Cobo, J.L., Herranz, L.E., “Review of droplet entrainment in annular flow: interfacial waves and onset of entrainment”. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 74, p.p. 14-43, 2014.
- [4] Berna C., Escrivá A., Muñoz-Cobo J.L., Herranz L.E., “Review of droplet entrainment in annular flow: characterization of the entrained droplets”. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 79, p.p. 64-86, 2015.
- [5] Alekseenko, S., Antipin, V., Cherdantsev, A., Kharlamov, S., Markovich, D., “Two-Wave Structure of Liquid Film and Wave Interrelation in Annular Gas-Liquid Flow with and without Entrainment”. *Physics of Fluids*, Vol. 21 N°1, Ner 061701, 2009.
- [6] Belt, R.J., Van’t Westende, J. M.C., Prasser, H.M., Portela, L.M., “Time spatially resolved measurements of interfacial waves in vertical annular flow”. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 36, pp. 570-587, 2010.
- [7] Azzopardi, B.J., “Drops in annular two-phase flow”. *Int. J. Multiphase Flow* 23, 1-53 (1997)

- [8] Alekseenko, S., Antipin, V., Cherdantsev, A., Kharlamov, S., Markovich, D., “Investigation of Waves Interaction in Annular Gas-Liquid Flow Using High-Speed Fluorescent Visualization Technique”. *Microgravity Science Technology*, Vol. 20 N°1, pp .271, 2008.
- [9] Cuadros J.L., Rivera Y., Berna C., Escrivá A., Muñoz-Cobo J.L., Monrós-Andreu G., Chiva S., “Experimental Investigation of the Gas-Liquid Interfacial Waves in Vertical Upward Concurrent Annular Flows”. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. Submitted for publication, 2019.
- [10] Muñoz-Cobo, J.L., Miquel, A., Berna, C., Escrivá, A., Spatial and time evolution of non-linear waves in falling liquid films by the harmonic expansion method with spatial integration. Published in the proceedings of the International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics HEFAT 2016.
- [11] Muñoz-Cobo, J.L, Chiva, S., Méndez, S., Monrós, G., Escrivá, A., Cuadros, J.L., “Development of Conductivity Sensors for Multi-Phase flow Local Measurements at the Polytechnic University of Valencia (UPV) and University Jayme I of Castellon (UJI)”. *Sensors* 2017, 17, 1077; doi:10.3390/s17051077 (2017).
- [12] Wayne, C., “The Interfacial Characteristics of Falling Film Reactors”. Ph.D. Thesis, University of Nottingham, Nottingham, UK (2001).
- [13] Savitzky, A.; Golay, M.J.E. (1964). "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures". *Analytical Chemistry*. 36 (8): pp 1627–16393.