

Estudio del comportamiento de la película de líquido en flujo anular aire-agua en caída libre vertical

Y. Rivera, J.L. Muñoz-Cobo, A. Escrivá, C. Berna, 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 los detalles de la instalación experimental GEPELON (GGeneración de PELícula ONdulatoria) cuyo objetivo principal es la realización y modelización de experimentos de caída libre aire-agua. La instalación tiene dos opciones, una de tamaño 3.8m y 42mm de diámetro y la otra de 3.8m y 30mm de diámetro. Se han llevado a cabo medidas del espesor de película de líquido utilizando varias sondas de conductancia en distintas posiciones (tanto antes como después de la zona de desarrollo del fluido). El agua se introduce mediante un inyector con caudales entre 1 – 20 l/min y 1 – 10 l/min respectivamente. Se espera obtener correlaciones de las magnitudes más importantes, así como ampliar el rango de medidas experimentales en tubos de 19 mm.

Palabras clave – Flujo anular, caída libre, disturbance waves, película de líquido, sondas de conductancia.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de películas de líquido deslizándose en caída libre sobre superficies constituyen una categoría importante dentro de los sistemas líquido-vapor que se aprovechan de la gravedad para conseguir el movimiento del fluido. La existencia de una película de líquido deslizándose sobre la pared es indispensable para obtener un correcto coeficiente de transferencia de calor. El desarrollo de ondas superficiales en la interfase propicia la aparición de remolinos que favorecen el intercambio tanto de calor como de masa.

Esta pequeña introducción sirve a explicar el interés del estudio de este tipo de sistemas no solo en aplicaciones en energía nuclear (Alekseenko, S., 2008), y (Alekseenko, S., 2009), sino también en numerosos sistemas térmicos como condensadores, evaporadores, refrigeradores, columnas de destilación, reactores químicos, etc. La investigación en este campo tiene interés también en la validación de códigos tanto CFD como otros códigos termo-hidráulicos nucleares.

La principal ventaja de estos sistemas frente a otras configuraciones, como por ejemplo el flujo forzado en conductos a presión, es que poseen un muy buen desempeño en los procesos de transferencia de calor ya que se ahorra en costes al no tener que bombear el flujo a través de elementos que producen caídas de presión elevadas (la propia gravedad se encarga de dirigir el flujo), minimizan la resistencia térmica a la conducción en la película (especialmente para películas de líquido delgadas y laminares), mejoran la transferencia capitalizando los remolinos turbulentos (especialmente para regímenes de alto flujo de líquido en la película), mejoran la transferencia de calor, entre un 40% y un 80%, debido a las ondas superficiales que se producen en la inter-fase y que además favorecen el intercambio de masa entre la película y el vapor circundante, y su carácter pasivo (la gravedad es la única fuerza que impulsa estos flujos) los hace especialmente aptos para garantizar la viabilidad de la energía nuclear en el futuro (Berna et al., 2014).

En este estudio se muestran los resultados de los experimentos realizados en la instalación GEPELON (GEneración de PELícula ONdulatoria). En ella tendrá lugar el flujo anular por caída libre y se podrá medir con la instrumentación instalada tanto las condiciones de contorno como el espesor de la película de líquido.

2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL GEPELON

2.1. Descripción de la instalación.

La instalación experimental está diseñada fundamentalmente para lograr flujo anular por caída libre en un tubo experimental donde los fenómenos serán similares a los presentes en los circuitos de refrigeración pasiva de los reactores nucleares de tercera generación, pero a nivel hidráulico únicamente y no a nivel termohidráulico ya que la instalación carece de aportación de calor al agua en esta primera fase de su desarrollo.

La instalación está formada por un *loop* donde el agua es bombeada a un inyector en la parte superior de la misma y, tras descender por la zona de test es recolectada en un tanque donde se reinicia el ciclo (Figura 1).

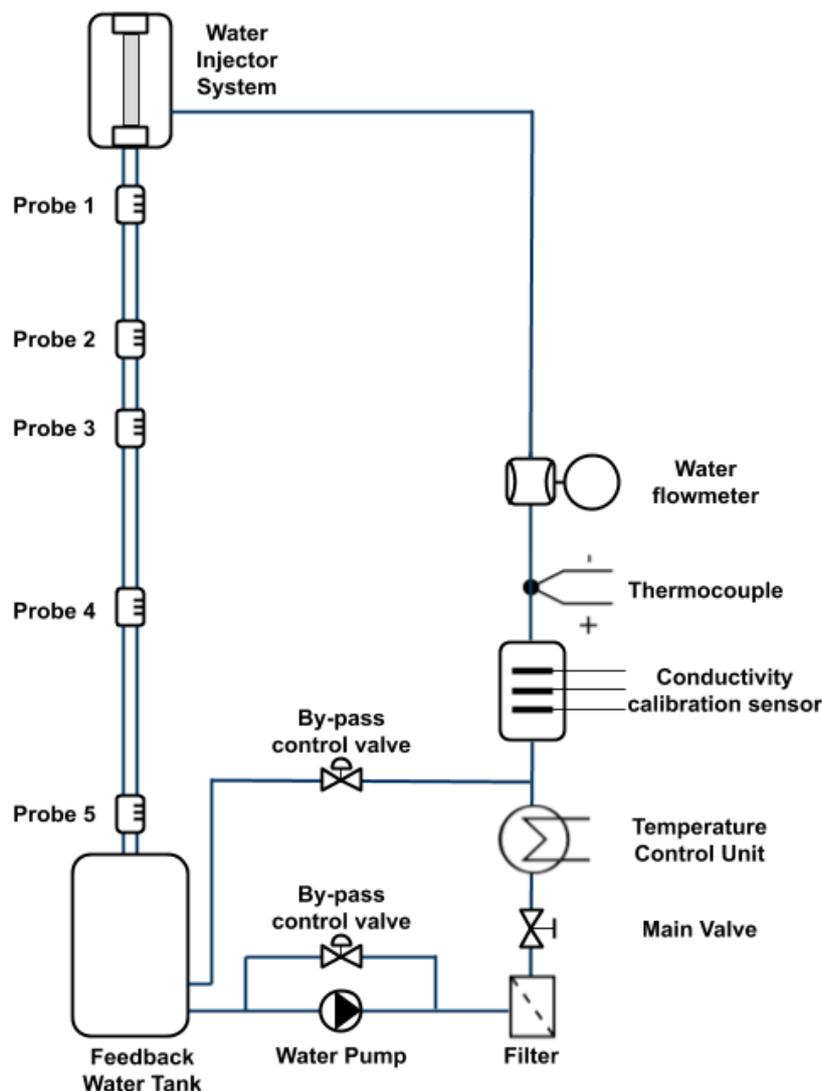


Figura 1. Esquema de la instalación experimental GEPELON

En su camino hacia el inyector, el agua se encuentra con diversos dispositivos, tanto de control como de medida, entre los que destacamos:

- Bomba de agua para impulsarla hasta el inyector superior.
- Válvulas de regulación de caudal y de seguridad.
- Filtro para eliminación de partículas.
- Estación de control de temperatura para evitar el calentamiento del agua como consecuencia de su paso por la bomba.
- Sensor de calibración de conductividad. Este sensor se comunica con la adquisición de datos y sirve para ajustar in-situ las curvas de calibración de los diferentes sensores (ajuste de la conversión voltios – milímetros de espesor de película de líquido).
- Termopar para registrar la temperatura
- Caudalímetro de agua para registrar el caudal inyectado.
- Sistema de inyección de agua. Consiste en un depósito de agua a presión en la que se coloca un cilindro de material poroso del mismo diámetro que la sección de test. La diferencia de presión entre el agua del depósito y el interior del poroso hace que aparezca una corriente de agua hacia el interior de éste, lo que inicia la caída de un anillo de agua hacia la sección de test.

2.2. Sistema de medida y de adquisición de datos.

El elemento más importante para llevar a cabo la medida en la instalación GEPELON son las sondas de conductancia (Muñoz-Cobo, J.L, et al., 2017), representadas en la figura 2 a). Estos dispositivos aprovechan las propiedades conductivas del agua para detectar el valor del espesor de película cerca de la pared. La sonda se compone de tres electrodos de 1,5mm colocados como se observa en figura 2 b), uno para emitir la señal, otro para recibirla y el último conectado a tierra.



Figura 2. Sonda de conductancia en a) el aspecto real y en b) el corte longitudinal en el que se pueden apreciar la colocación de los tres electrodos.

Con ayuda de un circuito electrónico diseñado para amplificar, rectificar y filtrar, la señal llega al sistema de adquisición de datos y es registrada en la base de datos. Dado que la señal cruda en voltios no ofrece directamente información, es necesario calibrar las sondas previamente para traducir esa señal en términos de espesor de película. Para ello, en la figura 3 puede observarse el sistema de calibración que se ha desarrollado compuesto por el sistema de posicionamiento de alta precisión, el posicionador del cilindro dieléctrico, el generador de señales, la electrónica de la sonda y el sistema de adquisición de datos.

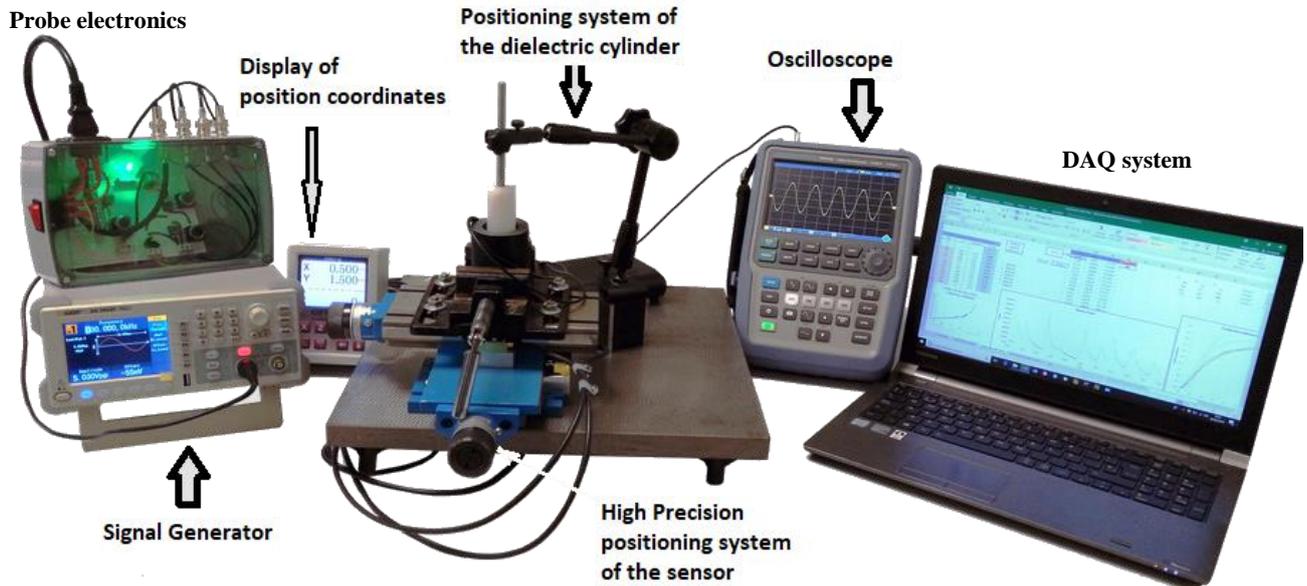


Figura 3. Sistema completo de calibración.

Para observar mejor el comportamiento de la película de líquido a lo largo del tubo, se ha provisto a la instalación de 5 sondas repartidas a lo largo de la instalación (figura 4). La primera se ha colocado cerca de la inyección para detectar el flujo casi laminar sin perturbar. La segunda y la tercera equidistantes del punto teórico de flujo desarrollado (Zadrazil et al. 2014 y Takahana e Kato, 1980). La cuarta y la quinta se encuentran en zona desarrollada.

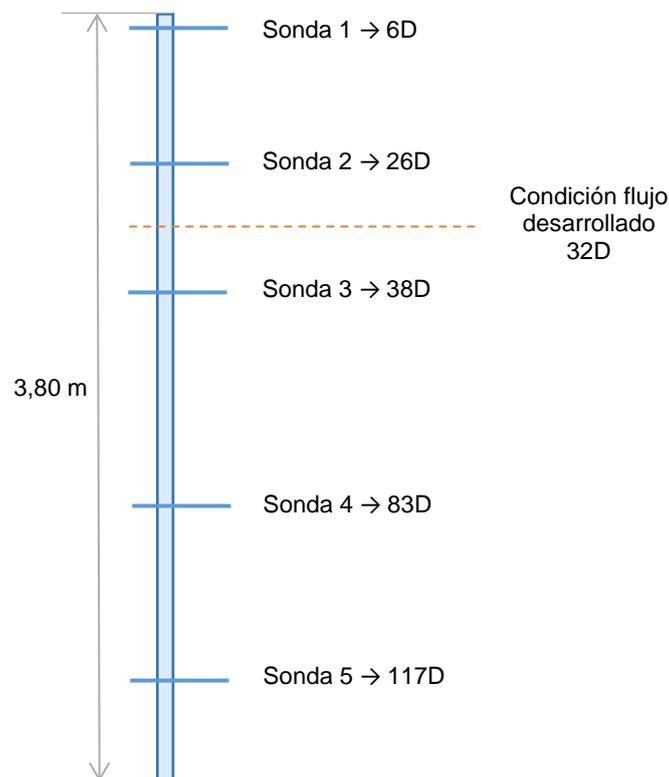


Figura 4. Posición de las sondas instalación GEPELON D=30mm.

Para aumentar la base de datos se dispone de dos instalaciones, una de 42mm y la otra de 30mm de diámetro. Reducir el diámetro permite aumentar el número de diámetros de desarrollo y así obtener valores estacionarios. Sin embargo, reducir el diámetro también conlleva una mayor dificultad en el desarrollo de las sondas y en su medición. Para la instalación de 42mm se dispone de 3 sondas mientras que la de 30mm está provista de 5 sondas.

3. MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS

Se ha medido una serie de test en cada una de las instalaciones, variando el punto de medida y los caudales de líquido. Para la instalación de 42mm se ha medido con las tres sondas en un rango de caudales de 1 – 20 l/min mientras que en la de 30mm se ha medido con las cinco sondas en un rango de 1 – 10 l/min. En este documento se presentarán los resultados de la instalación de 30mm.

En la tabla 1 se muestran los números de Reynolds estimados para cada uno de los tests. Habitualmente hay discrepancias en la definición del número de Reynolds por lo que todos los Re que aparecen en este documento están definidos de la siguiente manera.

$$Re = \frac{\rho Q}{\pi D \mu} \quad (1)$$

siendo Q el caudal volumétrico [m^3/s], D el diámetro [m], ρ la densidad en [kg/m^3] y μ la viscosidad dinámica [$Pa \cdot s$].

Tabla 1. Numeros de Reynolds de película para los diámetros $D_1=42mm$ y $D_2=30mm$.

Q [L/min]	Q [m^3/s]	Q [Kg/s]	Re ₁	Re ₂
0	0	0	0	0
1	1.67E-05	0.017	141	371
2	3.33E-05	0.033	283	743
3	5.00E-05	0.050	424	1114
4	6.67E-05	0.066	566	1485
5	8.33E-05	0.083	707	1857
6	1.00E-04	0.100	849	2228
7	1.17E-04	0.116	990	2599
8	1.33E-04	0.133	1132	2970
9	1.50E-04	0.150	1273	3342
10	1.67E-04	0.166	1414	3713

La señal obtenida en los diferentes tests es transformada a espesor de película utilizando la curva de calibración corregida por la sonda de conductancia in-situ. Adicionalmente, la señal es filtrada utilizando un filtro Savitzky-Golay de orden 8 (Savitzky, A. and Golay, M.J.E., 1964).

En la figura 5 se muestra la evolución temporal del espesor de película en la sonda 5 (situada a 117 diámetros de la entrada) a lo largo de 1 segundo. Adicionalmente, se muestran los picos de la señal, obtenidos utilizando un algoritmo que los detecta atendiendo a su prominencia y a la distancia entre picos consecutivos. Se puede observar a simple vista que al aumentar el caudal aumenta tanto el espesor medio de película como la frecuencia con la que aparecen las *disturbance waves* (Muñoz-Cobo, J.L et al., 2016).

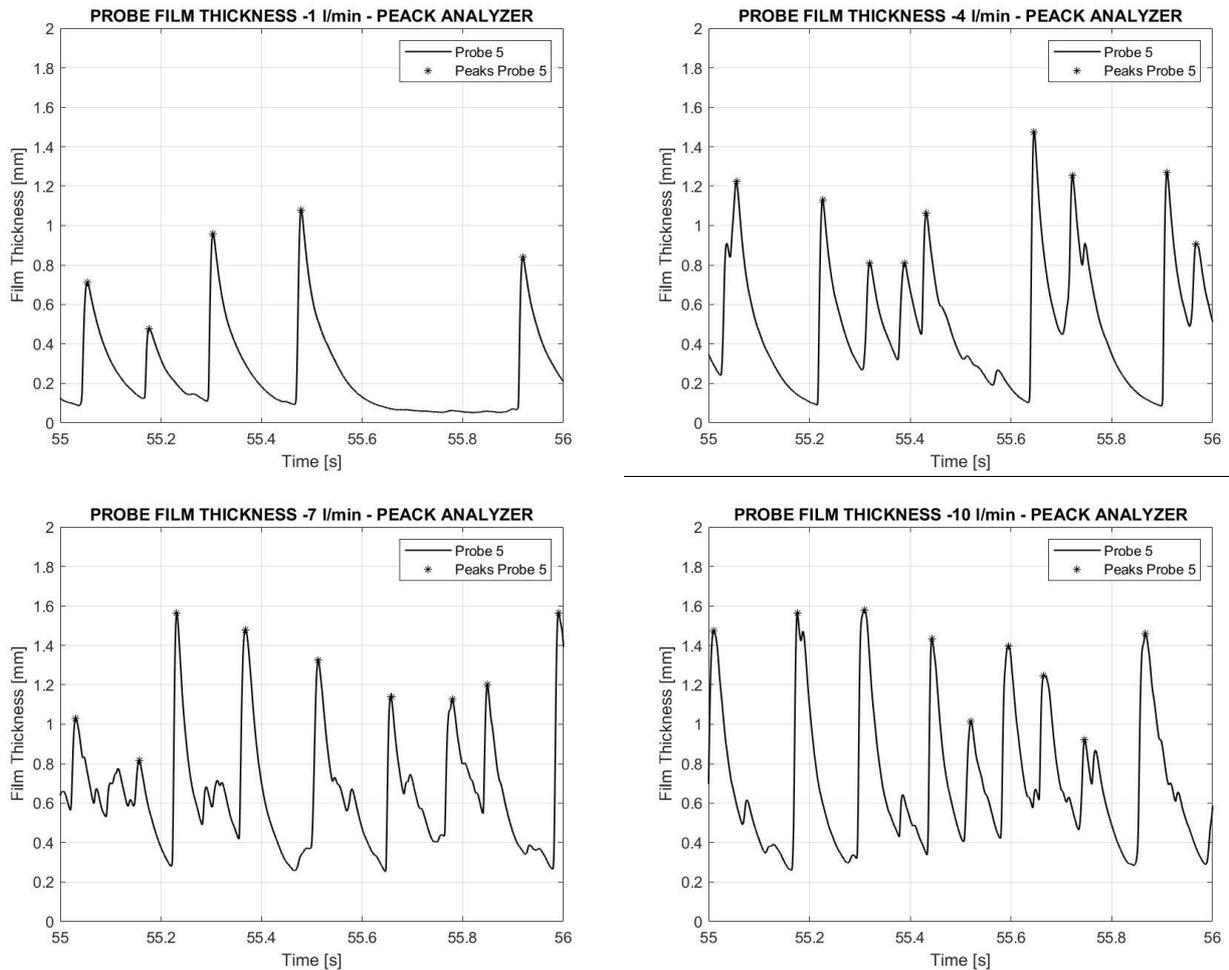


Figura 5. Espesor de película en la sonda 5 (a 117D de la entrada) para distintos caudales (1, 4, 7 y 10 l/min).

Para llevar a cabo un análisis más profundo se han calculado las siguientes variables:

- Espesor medio de la película o δ_m . Corresponde a la media aritmética de toda la señal.
- Espesor de película no perturbado o δ_u . Representa la altura de la película por debajo de la cual nunca deja de haber agua (*unperturbed film thickness*).
- Altura media de las *Disturbance Waves* o δ_{DW} que corresponde al espesor medio de las ondas respecto de la pared.
- Amplitud media de las *Disturbance Waves* o A_{DW} . Altura de las ondas respecto de la película no perturbada ($A_{DW} = \delta_{DW} - \delta_u$).
- Frecuencia de las ondas o ν . Número de ondas que pasan en un segundo.

En la figura 6 se representa el espesor medio de la película atendiendo al caudal de líquido introducido. Adicionalmente se ha representado una línea en azul claro representando el espesor teórico de (W. Nusselt et al., 1916). Esta ecuación está aceptada por la mayoría de los autores como solución inicial o aproximada (S. Kalliadasis et al., 2012) o (J. Shu, 2012).

$$h_0 = \left(\frac{3\mu Q}{2\pi r g \rho} \right)^{1/3} \quad (2)$$

El espesor de película, como vemos en figura 6, aumenta tanto con el caudal de líquido como con la distancia de medida respecto a la inyección. La sonda 1 y 2 muestran un espesor claramente inferior lo que nos hace pensar que el flujo se encuentra en transición entre laminar y turbulento. Las sondas 3, 4 y 5 muestran una evolución mucho más parecida. De este gráfico puede apreciarse también que a medida que aumenta el caudal, el flujo llega a un estado turbulento más rápido, probablemente debido a la reducción en la importancia de los efectos de pared. Este efecto puede observarse en la sonda 2 que a medida que aumenta el caudal se aproxima mucho más al comportamiento de las siguientes.

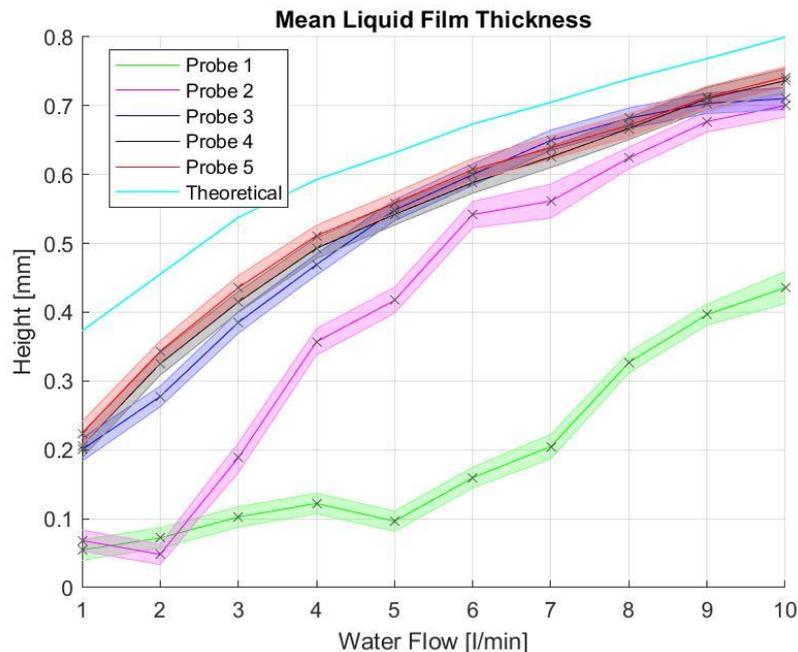


Figura 6. Espesor de película en la sonda 5 (a 117D de la entrada) para distintos caudales (1, 4, 8 y 12 l/min).

Las bandas coloreadas en la figura 6 representan el error cometido calculado mediante un intervalo de confianza al 95% con 5 grados de libertad (repetición del ensayo 6 veces durante 10s).

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una instalación experimental para la medida del comportamiento del flujo aire-agua en caída libre llamada GEPELON (GENERación de PELícula ONdulatoria). Esta instalación está compuesta por 2 zonas de test, una tubería de 42mm y otra de 30mm. En este documento se describe las partes más importantes de la instalación, su instrumentación y se muestran los resultados para la instalación de 30mm con un rango de caudales de 1 a 10 l/min.

Utilizando las sondas de conductancia desarrolladas y calibradas se ha obtenido la evolución temporal del espesor de película. Al representar esta variable se puede observar la aparición de ondas que viajan a lo largo de la interfase a una velocidad mayor a la del líquido denominadas *Disturbance Waves*. El espesor de película medio aumenta correctamente con el aumento de caudal y los valores obtenidos se encuentran cercanos a la expresión teórica de Nusselt.

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] 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.
- [2] 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.
- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] I. Zadrazil, O. K. Matar, and C. N. Markides, "An experimental characterization of downwards gas-liquid annular flow by laser-induced fluorescence: Flow regimes and film statistics," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 60, pp. 87–102, 2014.
- [8] J.-J. Shu, "Laminar Film Condensation Heat Transfer on a Vertical, Non-Isothermal, Semi-Infinite Plate," *Arab J Sci Eng*, vol. 37, pp. 1711–1721, 2012.
- [9] 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.
- [10] 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 Jaime I of Castellon (UJI)". *Sensors* 2017, 17, 1077; doi:10.3390/s17051077 (2017).
- [11] S. Kalliadasis, C. Ruyer-Quil, B. Scheid, and M. G. Velarde, *Falling Liquid Films*, no. 163. Springer, Applied Mathematical Sciences, 2012.
- [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.
- [14] W. Nusselt, "Die oberflächenkondensation des wasserdampfes," *Zeitschrift des Vereines Dtsch. Ingenieure*, vol. 60, no. 28, pp. 569–575, 1916.
- [15] W. Nusselt, "Die oberflächenkondensation des wasserdampfes," *Zeitschrift des Vereines Dtsch. Ingenieure*, vol. 60, no. 27, pp. 541–546, 1916.