

TERMOHIDRÁULICA Y NEUTRÓNICA

ESPESOR MEDIO DE LA PELÍCULA DE LÍQUIDO EN FLUJO ANULAR AIRE-AGUA EN CAÍDA LIBRE VERTICAL ANALIZADO DE FORMA EXPERIMENTAL Y MEDIANTE CÓDIGO CFD

Y. RIVERA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA (UPV)

J.L. MUÑOZ-COBO

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA (UPV)

C. BERNÀ

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA (UPV)

A. ESCRIVÀ

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA (UPV)

Y. CORDOVA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA (UPV)

Este artículo muestra las características más importantes de la instalación experimental GEPELON y el modelo CFD que se ha generado para simularla. La instalación está preparada para generar un flujo anular vertical en caída libre y cocorriente aire-agua con un rango de medida de 800 - 8000 de Reynolds del líquido y de 0 a 111000 de Reynolds del gas. El modelo CFD se ha generado en Ansys CFX y se han comparado las condiciones estacionarias con las medidas experimentales. En concreto, se ha analizado el espesor de película medio donde se ha observado que tanto el experimento como las simulaciones ofrecen buenos resultados para la caída libre cuando se comparan con los obtenidos por otros autores. Las predicciones de las simulaciones son muy parecidas a las obtenidas en la instalación experimental para flujo en cocorriente, aunque las discrepancias aumentan a medida que se incrementa el flujo de aire.

INTRODUCCIÓN

El régimen de flujo anular gas-líquido ha sido un extenso objeto de estudio en los últimos años. Sin embargo, el comportamiento no lineal de la interfase sigue siendo un centro de atención para muchos investigadores a nivel mundial. La película de líquido que aparece en este régimen y su naturaleza turbulenta aumenta la transferencia de calor entre la pared y el flujo. Este fenómeno sucede en múltiples instalaciones de la industria entre las que destacamos las centrales nucleares, los evaporadores o las torres de destilación.

La investigación en este campo permite la optimización de las instalaciones industriales en las que aparece este flujo, así como el análisis de posibles problemas de seguridad en caso de que la película desaparezca. Una de las aplicaciones más demandadas en este tipo de investigaciones es la de validación de códigos de dinámica de fluidos computacional o CFD ya que las medidas experimentales representan una fuente fiable de bases de datos.

En este documento se recogen las medidas experimentales obtenidas en la instalación GEPELON (Generación de Peli-

cula Ondulatoria) y su simulación mediante códigos CFD. En esta instalación se miden múltiples variables de la película de líquido en flujo vertical aire-agua. Con objeto de comparar las predicciones CFD y las medidas experimentales, se ha centrado el esfuerzo en analizar el espesor medio de película. El rango de condiciones de entrada para las simulaciones es de 800 - 6600 para el Reynolds del líquido y de 0 a 44000 para el Reynolds del gas. Se obtienen unas predicciones CFD bastante cercanas al experimento, aunque el comportamiento del espesor de película de líquido con el Reynolds del gas no es tan pronunciado como en el experimento.

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La instalación experimental GEPELON está diseñada para analizar el comportamiento de la película líquida en un flujo anular descendente de aire-agua (Figura 1). La instalación cuenta con dos circuitos separados que se unen en el inyector de la sección de prueba. Por un lado, el circuito de agua está diseñado para bombear agua con características conocidas de temperatura, caudal y presión al inyector, situado en la parte superior de la instalación. Por otro lado,

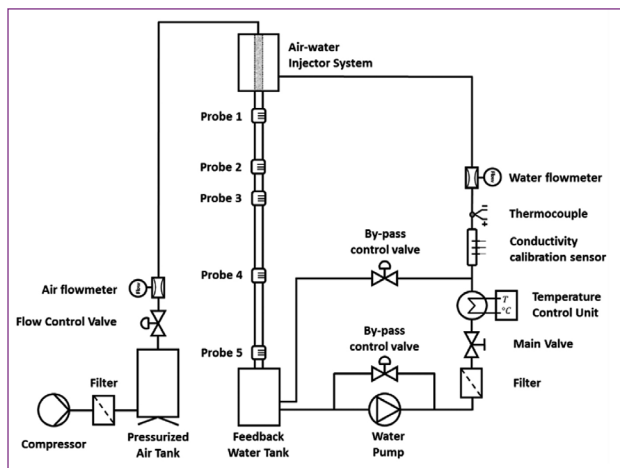


Figura 1. Diagrama de flujo de la instalación experimental GEPELON (Rivera et al., 2020).

el circuito de aire está compuesto por el compresor y los sistemas de medición y control que envían un flujo de aire controlado a la segunda entrada del inyector. Los sensores de ambos circuitos recogen la información y la envían al sistema de adquisición de datos (DAQ) donde se almacena a una frecuencia de 2 Hz.

El agua acumulada en el inyector atraviesa un tubo poroso y se une al flujo de aire, formando una película líquida. Ambos fluidos fluyen por la sección de prueba que consiste en un tubo transparente de MMA equipado con múltiples sondas de conductancia. La evolución temporal de la película líquida obtenida por estas sondas se registra en el DAQ a una frecuencia de 5000 Hz.

Tanto el inyector como la sección de prueba se han duplicado para poder estudiar el comportamiento de la película en dos tubos de diámetros 42 mm y 30 mm. La sección de prueba tiene aproximadamente 5 m de longitud en ambos casos. Se han instalado un total de cinco sondas de conductancia a 180, 785, 1128, 2500 y 3500 mm de la entrada. Para la sección de 30 mm, que es la que se ha simulado con el código CFD, los diámetros equivalentes de las posiciones con respecto a la entrada son de 6, 26, 38, 83 y 117 diámetros. Las condiciones de entrada de esta instalación se resumen en la Tabla 1.

Para medir el espesor de la película de líquido se han utilizado sondas de conductancia. Su funcionamiento se basa en la conductividad del agua, de manera que la corriente entre dos electrodos será mayor cuando aumente el espesor de la película (Clark, 2001). Esta técnica ha sido utilizada por un gran número de autores como (Collier & Hewitt, 1961) (Takahama & Kato, 1980) o (Ghosh et al., 2013) entre otros. La configuración se forma de tres electrodos (emisor, receptor y tierra) montados al de forma rasante a la pared interna de la tubería y colocados a una distancia y diámetro específicos. Las sondas han sido diseñadas para tener suficiente sensibilidad sin comprometer el valor máximo de la

	Caudal [l/min]	Velocidad [m/s]	Número de Reynolds
Agua	1 - 10	0.02 - 0.24	800 - 8000
Aire	0 - 2500	0 - 60	0 - 110500

Tabla 1. Condiciones de entrada del líquido y del gas en la instalación GEPELON.

película líquida de saturación. El electrodo emisor envía una señal sinusoidal de 100 kHz y 5 Vpp al electrodo receptor. El electrodo de tierra está situado en medio de ambos, lo que proporciona estabilidad y controla la señal.

Existe una relación entre la corriente que pasa por los electrodos y la amplitud de la película de líquido. Para determinar esta relación, es necesario calibrar las sondas. Para ello, se ha desarrollado un sistema de calibración que consta de un generador de señales, el circuito electrónico, una mesa de planitud equipada con un sistema de posicionamiento de alta precisión y un indicador de coordenadas de posición. La sonda se calibra utilizando cilindros dieléctricos precisos que simulan una película de espesor conocido. Para que las mediciones sean constantes y estables, se utiliza agua tratada, manteniendo un valor de conductividad de 50 μ S.

MODELO CFD

El modelo CFD se ha desarrollado en el software ANSYS CFX®. Para simplificar el caso en la primera etapa, se ha generado un dominio reducido en comparación con la sección de prueba del experimento. La Figura 2 (a) muestra la geometría de 300 mm y 30 mm de diámetro que se ha creado para este estudio.

La malla generada con la herramienta ICEM CFD® contiene 0,6 millones de elementos hexaédricos, posicionados en la dirección del flujo. Se ha tenido especial cuidado en los nodos cercanos a la pared donde se ubicará la interfaz entre el agua y el aire. La Figura 2 (b) y (c) muestra los detalles de la parte superior de la tubería y la entrada.

Se han realizado un total de 27 simulaciones en estado estacionario que cubren el rango de Reynolds del líquido de 800 a 6600 y de Reynolds del gas de 0 a 44000. Se ha seleccionado el modelo de turbulencia Shear Stress Transport (SST) para disminuir el tiempo computacional y obtener valores más cercanos a la zona de pleno desarrollo de la instalación experimental. Este modelo permite realizar múltiples simulaciones en poco tiempo a costa de una menor precisión para una película tan fina. El modelo de simulación de grandes remolinos (LES) representa una opción más realista (Simoneau et al., 2010), pero debido al elevado coste computacional se ha decidido reservar esta opción para una fase más avanzada del estudio.

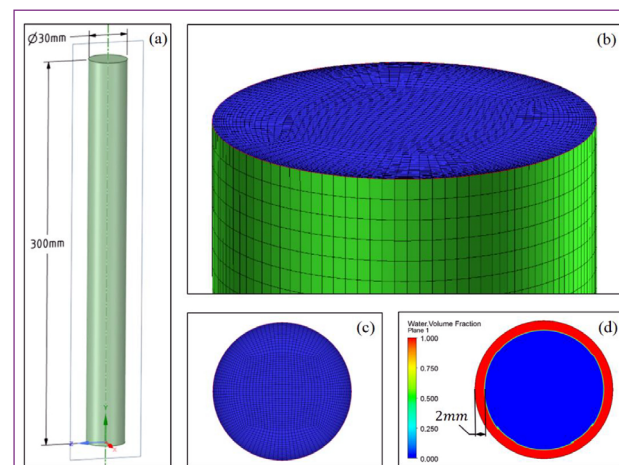


Figura 2. Modelo CFD (a) Dominio; (b) Detalle del mallado de la parte superior; (c) Detalle del inlet; (d) Fracción volumétrica de agua a la entrada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La película líquida en un flujo anular descendente de aire-agua puede analizarse desde múltiples perspectivas. Algunas de las variables más interesantes son el espesor medio de la película (h_{mean}), la altura y la frecuencia de las disturbance waves (h_{DW} , v_{DW}), velocidad de las disturbance waves (c_{DW}), altura y frecuencia de las ripple waves (h_{RW} , v_{RW}) y el espesor de la película de líquido sin perturbar (h_{bun}) entre otras, tal y como se muestra en la Figura 3 (a).

La instalación GEPELON ha estado en funcionamiento durante los últimos años y algunos de los resultados ya publicados pueden encontrarse en (Rivera et al., 2020). Recientemente se ha completado el procesamiento de los datos y se han obtenido múltiples correlaciones que abordan muchas de las variables de la película líquida. En este trabajo, el análisis se ha centrado en el espesor medio de la película (h_{mean}) ya que es la variable más sencilla de analizar desde el punto de vista de las simulaciones que utilizan un modelo de turbulencia RANS. La Figura 3 (b) muestra la evolución temporal de la película líquida obtenida en el montaje experimental con un Reynolds del líquido de 2200 y Reynolds del gas de 0. La media de la señal obtenida en el tiempo será el espesor medio de la película.

Un gran número de autores ha estudiado el espesor medio de la película y es posible encontrar en la literatura mediciones para un amplio rango de condiciones de entrada. La figura 4 muestra las mediciones experimentales de diferentes autores para el espesor medio de la película en flujo anular en caída libre. Las líneas continuas se refieren a las expresiones de (Nusselt, 1916) y (Mudawwar & El-Masri, 1986) ampliamente aceptadas por la comunidad científica. Los diferentes marcadores corresponden a las mediciones experimentales de otros autores especificando la referencia, el sistema de medición y el diámetro de la tubería. En primer lugar, las mediciones con métodos eléctricos corresponden a: (Webb & Hewitt, 1975) con sondas de conductancia; (Takahama & Kato, 1980) con sondas de capacitancia; (Karapantsios et al., 1989) y (Karapantsios & Karabelas, 1995) con sondas de hilo paralelo; y nuestras mediciones mediante sondas de conductancia empotradas en la instalación GEPELON (Rivera et al., 2020). Por otro lado, también se incluyen mediciones experimentales mediante métodos ópticos como (Karimi & Kawaji, 1998) midiendo queroseno con la técnica del trazador de colorante fotocromico; y (Zadrazil et al., 2014), (Cherdantsev et al., 2019) y (Charogiannis et al., 2019) utilizando diferentes variantes de la técnica de fluorescencia inducida por láser (LIF). Los resultados CFD obtenidos siguiendo el modelo descrito en este trabajo pre-

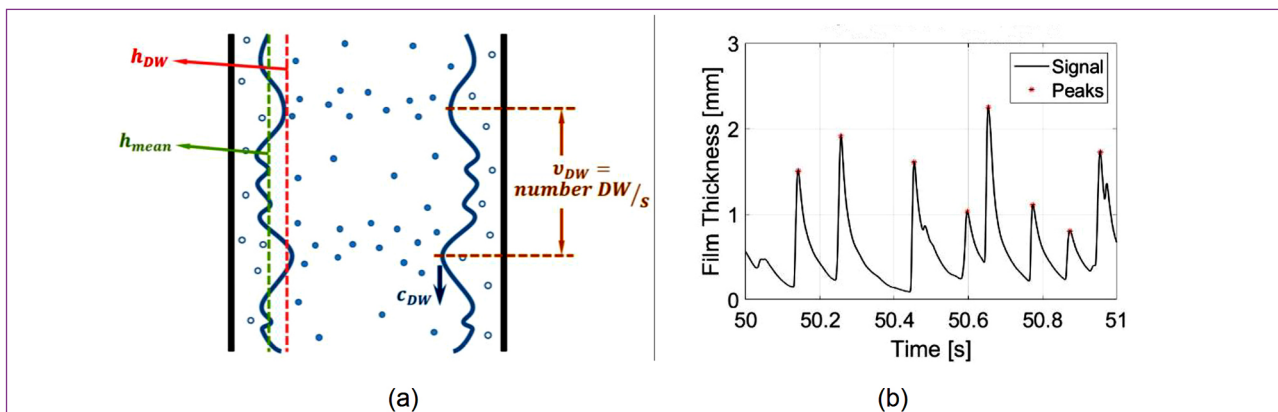


Figura 3. Propiedades y evolución de la película de líquido (a) Evolución espacial de la película y representación de las variables más importantes; (b) Evolución temporal de la película y ejemplo del algoritmo de cálculo de picos.

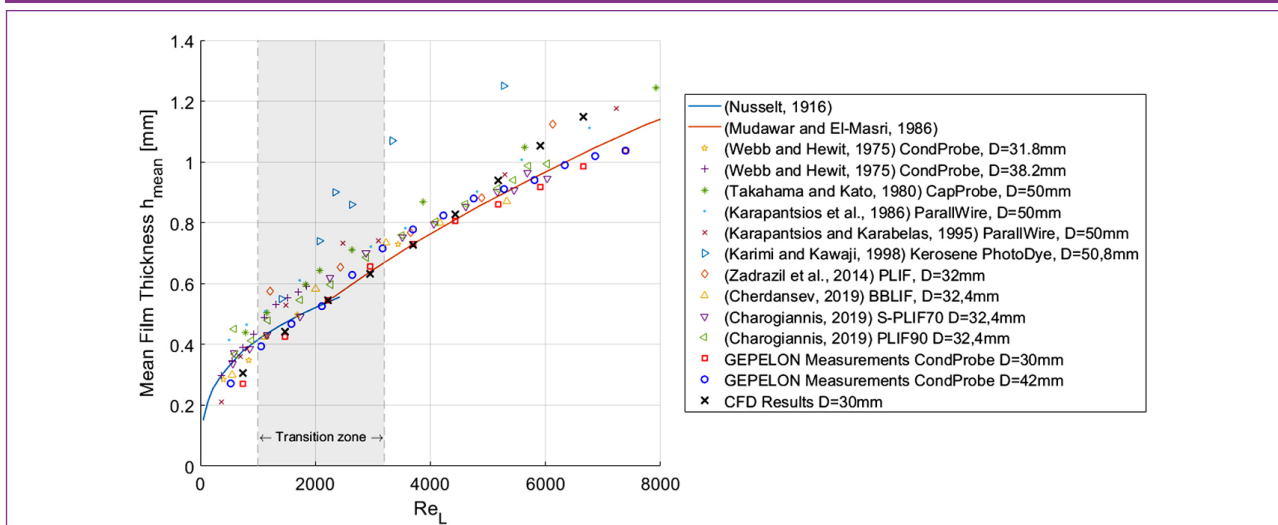


Figura 4. Comparativa entre correlaciones, predicciones CFD y medidas experimentales de diferentes autores para caída libre vertical. Los cuadrados rojos y los círculos azules corresponden con las medidas experimentales GEPELON mientras que las cruces negras se refieren a las predicciones CFD.

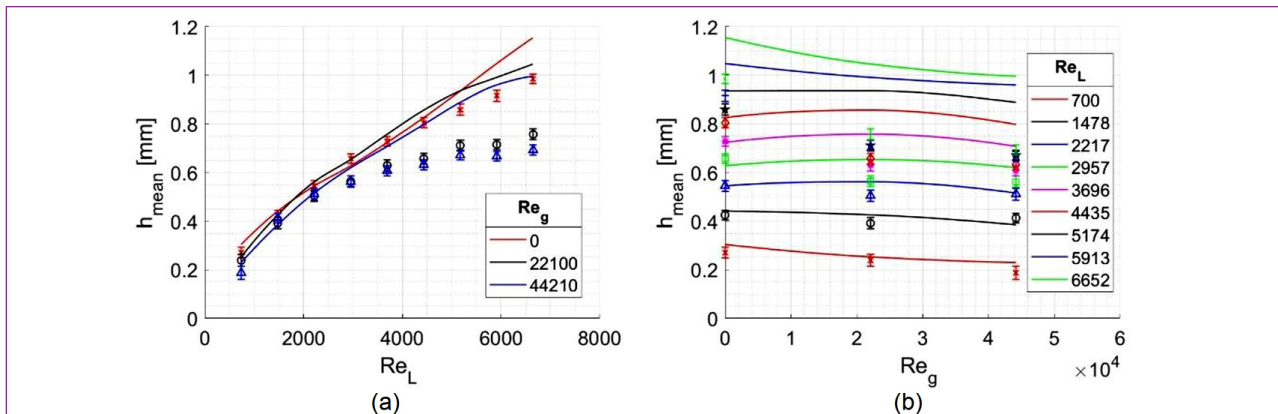


Figura 5. Comparativa entre medidas experimentales y resultados CFD para condiciones de flujo en cocorriente aire-agua. (a) Espesor medio de película vs Reynolds del líquido; (b) Espesor medio de película vs Reynolds del gas.

dicen correctamente las mediciones experimentales, aunque se observa una tendencia más lineal que la seguida por los experimentos.

Por último, la Figura 5 muestra las mediciones experimentales y los resultados de la simulación del espesor medio de la película para diferentes números de Reynolds del líquido y del gas. Se observa una buena concordancia entre las predicciones de la simulación y los experimentos para números de Reynolds del gas pequeños, pero los cálculos de CFD sobrepreciden el espesor medio de la película para valores más altos.

CONCLUSIONES

Este documento resume el funcionamiento de la instalación GEPELON, cuyo objetivo es el desarrollo de un flujo anular descendente de aire-agua. La instalación está equipada con cinco sondas de conductancia situadas a diferentes alturas y capaces de medir la evolución temporal de la capa de líquido. Mediante el procesamiento de esta señal, es posible obtener medidas del espesor medio de la película, la altura y frecuencia de las ondas perturbadoras, entre otras variables. El rango de medición de esta instalación es de 800-8000 para el número de Reynolds del líquido y de 0 a 1100000 para el número de Reynolds del gas.

El modelo CFD de la instalación GEPELON se simula mediante el código Ansys CFX®. En esta primera etapa, el modelo tiene una malla de 0,6 millones de nodos y está diseñado para trabajar con el modelo de turbulencia Shear Stress Transport en simulaciones en estado estacionario. Se han realizado un total de 27 simulaciones que cubren el rango de 800 a 6.600 para el número de Reynolds del líquido y de 0 a 44.000 para el gas.

Existe una buena concordancia entre las predicciones del código y las medidas experimentales de diferentes investigadores y de la instalación GEPELON. Para el flujo anular en caída libre (Reynolds del gas igual a 0) se obtiene una alta precisión en los resultados CFD aunque se observa una tendencia más lineal en comparación con la tendencia de los experimentos. En relación con los resultados de la co-corriente con flujo de aire forzado, se observa una buena concordancia para un número de Reynolds del líquido pequeño, pero la discrepancia aumenta para un Reynolds del líquido mayor.

En la próxima etapa de la investigación, se espera completar el modelo CFD para cubrir todo el rango de condiciones iniciales del experimento. Además, está previsto aumentar la precisión utilizando modelos más complejos, como el modelo de turbulencia LES. Además, se espera realizar un análisis de cuantificación de la incertidumbre para incluir las bandas de error en las predicciones de las simulaciones CFD.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido posible gracias al proyecto de I+D EXMOTRANSIN ENE2016-79489-C2-1-P.

REFERENCIAS

- Charogiannis, A., Sik An, J., Voulgaropoulos, V., & Markides, C. N. (2019). Structured planar laser-induced fluorescence (S-PLIF) for the accurate identification of interfaces in multiphase flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 118, 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.06.002>
- Cherdantsev, A. V., An, J. S., Charogiannis, A., & Markides, C. N. (2019). Simultaneous application of two laser-induced fluorescence approaches for film thickness measurements in annular gas-liquid flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 119, 237–258. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.07.013>
- Clark, W. W. P. (2001). The interfacial characteristics of falling film reactors. 1–328. <http://eprints.nottingham.ac.uk/14303/>
- Collier, J. G., & Hewitt, G. (1961). Data on the vertical flow of air-water mixtures in the annular and dispersed flow regions, Part II: Film thickness and entrainment data and analysis of pressure drop measurements. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 37, 127–136.
- Ghosh, S., Pratihari, D. K., Maiti, B., & Das, P. K. (2013). Automatic classification of vertical counter-current two-phase flow by capturing hydrodynamic characteristics through objective descriptions. *International Journal of Multiphase Flow*, 52, 102–120. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.12.007>
- Karapantsions, T. D., Paras, S. V., & Karabelas, A. J. (1989). Statistical Characteristics of Free Falling Films at High Reynolds Numbers. *International Journal of Multiphase Flow*, 15(1), 1–21.

- Karapantsios, T. D., & Karabelas, A. J. (1995). Longitudinal Characteristics of Wavy Falling Films. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(1), 119–127.
- Karimi, G., & Kawaji, M. (1998). An experimental study of freely falling films in a vertical tube. *Chemical Engineering Science*, 53(20), 3501–3512. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00159-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00159-6)
- Mudawwar, I. A., & El-Masri, M. A. (1986). Momentum and heat transfer across freely-falling turbulent liquid films. *International Journal of Multiphase Flow*, 12(5), 771–790. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(86\)90051-0](https://doi.org/10.1016/0301-9322(86)90051-0)
- Nusselt, W. (1916). Die oberflächenkondensation des wasserdampfes. *Zeitschrift Des Vereines Dtsch. Ingenieure*, 60, 541-546 (n° 27) and 569-575 (n° 28).
- Rivera, Y., Muñoz-Cobo, J. L., Berna, C., Escrivá, A., & Cordova, Y. (2020). STUDY OF LIQUID FILM BEHAVIOUR IN VERTICAL DOWNWARD AIR-WATER ANNULAR FLOW. *Proceedings of Advances in Fluid Mechanics XIII*, 128, 77–88. <https://doi.org/10.1115/1.3138339>
- Simoneau, J.-P., Champigny, J., & Gelineau, O. (2010). Applications of large eddy simulations in nuclear field. *Nuclear Engineering and Design*, 240, 429–439. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.08.018>
- Takahama, H., & Kato, S. (1980). Longitudinal Flow Characteristics of Vertically Falling Liquid Films Without Concurrent Gas Flow. 6, 203–215.
- Webb, D. R., & Hewitt, G. F. (1975). Downwards co-current annular flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2(1), 35–49. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(75\)90027-0](https://doi.org/10.1016/0301-9322(75)90027-0)
- Zadrazil, I., Matar, O. K., & Markides, C. N. (2014). An experimental characterization of downwards gas-liquid annular flow by laser-induced fluorescence: Flow regimes and film statistics. *International Journal of Multiphase Flow*, 60, 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.11.008> ■