Estudio Experimental de Patrones de Flujo Bifásico Aire-Agua en Tuberías Horizontales y Ligeramente Inclinadas

Francisco García y Mahmoud Haoulo

Universidad Central de Venezuela, Escuela de Ingeniería Mecánica, Apartado 48222,
Los Chaguáramos 1041-A, Caracas-Venezuela (e-mail: francisco.garcia@ucv.ve)

Resumen

Se realizó un estudio experimental de patrones de flujo bifásico aire-agua en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas. Se realizaron 493 experimentos de flujo bifásico aire-agua de los cuales 191 corresponden a tubería horizontal y 302 corresponden a flujo ascendente. Las distribuciones espaciales de los experimentos incluyen los patrones de flujo estratificado liso y ondulado, tapón, anular y burbuja dispersa. Se desarrollan mapas de patrones de flujo experimentales para cada ángulo de inclinación y se evalúa la capacidad de predicción de cuatro modelos mecanicistas y dos modelos de correlación utilizados comúnmente en la literatura para determinar patrones de flujo. Comparando con los valores experimentales se encuentra que los modelos seleccionados tienen un porcentaje de acierto mayor al 75 %.

Palabras clave: flujo bifásico, tuberías horizontales, patrones de flujo, flujo aire-agua

Experimental Study of Air-Water Two-Phase Flow Patterns in Horizontal and Slightly Inclined Pipelines

Abstract

An experimental study in horizontal and slightly inclined pipelines was performed. A total of 493 air-water two-phase flow experiments were carried out, of which 191 correspond to horizontal pipelines and 302 correspond to upward flow. The space distributions of the experiments include the smooth and wavy stratified, slug, annular and dispersed bubble flow patterns. Experimental maps of the flow patterns for each inclination angle are developed and the prediction capability of four mechanistic models and two correlating models commonly used in the literature for determining flow patterns are evaluated. Comparison between calculated and experimental values indicates that the selected models have a success percentage greater than 75%.

Keywords: two-phase flow, horizontal pipelines, flow patterns, air-water flow

INTRODUCCIÓN

El estudio del flujo simultáneo de gas y de líquido a través de un conducto, es una de las combinaciones de flujo bifásico más complejas que existen. Esto se debe, principalmente a la gran variedad de configuraciones relacionadas con la distribución espacial de ambas fases en la tubería y, a que la fase gaseosa es compresible. Estas configuraciones espaciales se conocen como patrones de flujo.

El flujo bifásico es encontrado frecuentemente en la industria petrolera, química, nuclear, en plantas termoeléctricas, etc. La determinación de los patrones de flujo, el gradiente de presión y la fracción volumétrica de líquido, es el reto asociado en investigación y desarrollo para optimizar el diseño de los diferentes componentes de los sistemas que operen con este tipo de flujo y así reducir de manera significativa los costos asociados a la construcción y operación de los mismos.

El estudio experimental de este tipo de flujo contribuye de manera efectiva a la comprensión de este fenómeno (Wong y Yau, 1997; Grolman y Fortuin, 1997; Lovick y Angeli, 2004; Rodríguez y Olieman, 2006; Lu et al., 2007; Saisorn y Wongwises, 2008). Por otra parte, la adquisición de datos experimentales es necesaria para el desarrollo y/o validación de modelos y correlaciones que permitan cuantificar los parámetros necesarios para el diseño de procesos y equipos donde este tipo de flujo esté presente (Woldesemayat y Ghajar, 2007; García et al., 2003, 2005, 2007; Jin et al., 2003; Zhang et al., 2003). Adicionalmente, muchos de los problemas de operación de ciertos dispositivos donde existe flujo bifásico están asociados a un tipo de patrón de flujo y el poder predecirlo adecuadamente permitiría evitar estos intervalos de funcionamiento.

Existe en la literatura un conjunto de modelos de correlación y mecanicistas para determinar patrones de flujo. Los modelos de correlación o empíricos se fundamentan en generar relaciones funcionales de datos experimentales en función de grupos adimensionales que controlen los mecanismos físicos del fenómeno en estudio. Entre las correlaciones desarrolladas para determinar el patrón de flujo de gas y de líquido en tuberías horizontales se encuentran las desarrolladas por Ros (1961), Beggs y Brill (1973), Mandhane et al. (1974) y Mukherjee y Brill (1985). En el modelado mecanicista se trata de determinar y modelar matemáticamente la física del fenómeno en estudio. Entre los modelos mecanicistas existentes para determinar el patrón de flujo bifásico gas-líquido en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas se encuentran los modelos de Taitel y Dukler (1976), Taitel et al. (1980) y Barnea (1987). Existen modelos mecanicistas específicos para determinar el gradiente de presión que formulan modelos hidrodinámicos separados para cada uno de los posibles patrones de flujo como el de Xiao et al. (1990), Ouyang y Aziz (2002) y Gómez et al. (2000). Sin embargo, estos modelos han sido desarrollados y/o evaluados con datos experimentales con intervalos de operación específicos y en algunos casos muy limitados. Por otra parte, existen modelos y correlaciones para determinar el gradiente de presión y/o la fracción volumétrica de líquido de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías que requieren conocer el patrón de flujo existente para su aplicación (Woldesemayat y Ghajar, 2007; García et al., 2003, 2005, 2007).

El tema de la presente investigación es realizar un estudio experimental de patrones de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales e inclinadas para flujo ascendente y evaluar la precisión de diferentes modelos empíricos y mecanicistas presentados en la literatura para predecir patrones de flujo.

BANCO EXPERIMENTAL

En la Fig. 1 se muestra un diagrama del circuito del banco experimental para realizar ensayos de flujo bifásico. El banco está conformado por un circuito de tuberías transparentes de acrílico de 0.0381m (1 ½") de diámetro, que descansa sobre una plataforma que permite variar el ángulo de inclinación de las tuberías desde la posición horizontal hasta la vertical. El circuito tiene dos tuberías paralelas, una para realizar estudios de flujo ascendente y la otra para realizar estudios de flujo descendente, la cual a su vez, es el retorno al tanque de almacenamiento del líquido, donde el gas se separa del líquido por diferencia de densidad. En posición horizontal, la segunda sección de prueba, permite comprobar que el patrón de flujo, para unas condiciones de operación dada, es

similar al obtenido en la primera sección de prueba, lo cual garantiza que el flujo está hidrodinámicamente desarrollado. La mezcla de los fluidos, se realiza en una sección en forma de “Y” de 45 grados de apertura, ubicada en posición horizontal. Por la parte superior se suministra el aire y por la parte inferior el líquido. La parte horizontal de la sección de mezcla, cuenta con una lámina de separación para que el aire y el líquido fluyan en paralelo y así propiciar la estratificación a la salida de la sección. El caudal de líquido se mide con un conjunto de 3 placas orificios que abarcan un intervalo de medición de 0.07 a 12.20 m³/h. El caudal de aire se mide con dos vortex que abarcan un intervalo de medición de 1.6 a 18 m³/h (condiciones estándar), con una precisión de 0.18 m³/h y de 3 a 70 m³/h (condiciones estándar), con una precisión de 0.7 m³/h. La diferencia de presión se mide con un transmisor de presión diferencial que tiene un intervalo de medición de 0.4 a 40 kPa, con una precisión de 0.016 kPa. La presión local se mide con transmisores de presión que poseen un intervalo de medición de 24 a 2400 kPa, con una precisión de 1.8 kPa. La temperatura se mide con termocuplas tipo J con un indicador con una precisión de 0.1 °C.

Fig. 1: Diagrama del circuito del banco experimental

En la Tabla 1, se presenta un resumen de las características técnicas del banco experimental.

Tabla 1: Características técnicas del banco experimental

Dimensiones	
Diámetro de la tubería	0.0381 m (1 ½")
Longitud de desarrollo	2.49 m (65.4 D)
Longitud de prueba	3 m (78.7 D)
Material de la tubería	Acrílico Transparente
Condiciones de Operación	
Intervalo del caudal de líquido [m³/s]x10³ (gal/min)	0.02-3.39 (0.32-53.73)
Intervalo del caudal de gas [m³/s] x10³ (pie³/min)	3.37-80.32 (7.14-170.19)
Intervalo de la velocidad del líquido [m/s]	0.02 - 2.97
Intervalo de la velocidad del gas [m/s]	2.96 - 70.45
Ángulos de inclinación	Desde -90° hasta + 90°
Presión máxima en el mezclador [kPa] (psig)	413.78 (60)
Temperatura máxima	60 °C

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Datos Experimentales

Se realizaron 493 experimentos de flujo bifásico de agua-aire, de los cuales 191 corresponden a flujo horizontal y 302 corresponden a flujo ascendente para ángulos de inclinación de 1°, 5° y 10°. Los criterios de clasificación utilizados para definir los patrones flujo horizontal y flujo ascendente son los propuestos por Barnea et al. (1980). Los patrones de flujo obtenidos incluyen: flujo estratificado liso (SS) y ondulado (SW), flujo tapón (SL), flujo anular (AN) y flujo burbuja dispersa (DB), además de las diferentes transiciones. Un punto es considerado como transición cuando no se observa un patrón de flujo claramente definido. De los 493 experimentos, 157 corresponden a puntos de transición, los cuales no se consideran para evaluar la precisión de los modelos seleccionados en el presente trabajo. Sin embargo, son considerados para trazar los mapas de patrones de flujo. En la Tabla 2 se presenta la distribución de los datos experimentales clasificados por patrón de flujo.

Tabla 2: Distribución de los puntos experimentales según el patrón de flujo

θ	SS	SW	SL	AN	DB	Total
0°	2	49	16	46	7	120
1°	0	12	43	34	0	89
5°	0	6	39	17	0	62
10°	0	0	44	21	0	65
Total	2	67	142	118	7	336

De los 493 puntos experimentales, el flujo estratificado liso (SS) tiene un porcentaje del 0.4 % del total de los datos experimentales, mientras el estratificado ondulado (SW) tiene 13.6 %. El flujo tapón (SL) tiene el mayor porcentaje con 28.8 % de los datos experimentales seguido del flujo anular (AN) con 23.9 % de los datos y el flujo burbuja dispersa (DB) con el 1.4%. El 31.9% de los puntos corresponden a transiciones.

El intervalo de velocidades superficiales de gas (U_{SG}) y de líquido (U_{SL}), la presión de operación (P) y la temperatura (T) promedio de los experimentos para cada ángulos de inclinación se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Resumen de los datos experimentales

θ	Fluidos de operación	U_{SG} [m/s]		U_{SL} [m/s]		P [MPa]	T [°C]	Nº total de puntos	Nº de puntos de transición
		min.	máx.	min.	máx.				
0°	aire-agua	2.96	37.83	0.02	1.9	0.1387	33.3429	191	71
1°	aire-agua	2.98	36.93	0.02	1.56	0.1376	34.9963	135	46
5°	aire-agua	3.1	34.24	0.04	1.54	0.1326	38.4696	84	22
10°	aire-agua	3.26	31.7	0.12	1.56	0.1332	39.4922	83	18

Mapas experimentales de patrones de flujo

Los 191 puntos experimentales de patrones de flujo para tubería horizontal, se presentan en la Fig. 2. En el mapa experimental se observan varias transiciones entre los patrones de flujo. Estas transiciones no tienen una configuración geométrica definida, ya que presentan un comportamiento ambiguo entre los dos patrones que las limitan. En la transición entre flujo estratificado ondulado y flujo tapón (SW-SL), las ondas que se presentan en la interfaz, pocas veces alcanzan la parte superior de la tubería. La transición de flujo tapón a flujo anular (SL-AN), consiste en un flujo de alta frecuencia de tapones con alto contenido de gas en el cual las fluctuaciones en los indicadores de presión tienden a desaparecer al pasar a flujo anular (AN), el cual se desarrolla al aumentar el caudal de gas. La transición entre flujo estratificado ondulado y flujo anular (SW-AN), ocurre al aumentar el flujo del gas que al fluir por la parte superior del líquido, arrastrar gotas, al mismo tiempo que genera

una presión sobre el líquido que tiende a distribuirlo hacia los lados de la periferia inferior de la tubería, creando una especie de arco o media luna que posteriormente formará el flujo anular del líquido que rodea al núcleo de gas. La transición de flujo tapón a flujo burbuja dispersa (SL-DB), se caracteriza por una elevada frecuencia de tapones con alto contenido de aire y una sección de película corta. En esta transición, las fluctuaciones en los indicadores de presión tienden a desaparecer. En el flujo anular (AN), la película de líquido que rodea el núcleo de gas, puede presenta ondas que viajan en el sentido del flujo, estas ondas tienen una forma parecida a las rayas del tigre, si se observan desde la posición lateral de la tubería. La transición de flujo anular a flujo burbuja dispersa (AN-DB), se caracteriza por presentar una película de líquido inestable con alto contenido de aire que rodea un núcleo de gas con alto contenido de líquido.

Fig. 2: Mapa experimental de patrones de flujo para flujo horizontal

En las Figs. 3-5, se presentan los puntos experimentales de patrones de flujo ascendente en tubería inclinada para 1°, 5° y 10°.

Fig. 3: Mapa experimental de patrones de flujo ascendente 1°

Fig. 4: Mapa experimental de patrones de flujo ascendente 5°

Fig. 5: Mapa experimental de patrones de flujo ascendente 10°

Para flujo ascendente en tuberías, no se obtiene flujo estratificado liso (SS). Las regiones de flujo estratificado ondulado (SW) y flujo anula (AN), tienden a disminuir a expensas de un crecimiento de la región de flujo tapón (SL). Esto es debido a que el retorno del líquido por efecto de la gravedad bloquea la tubería propiciando la generación de tapones. Para un ángulo de inclinación de 1°, se obtiene flujo estratificado ondulado (SW) con una combinación de bajas velocidades superficiales de líquido con medianas velocidades superficiales de gas. Esta región disminuye a medida que se incrementa la inclinación y finalmente desaparece para una inclinación de 10°. Por otra parte, a medida que se incrementa la inclinación de la tubería, la región de flujo anular (AN), se traslada a regiones con mayores velocidades superficiales de gas. Estos resultados son similares a los reportados por Shoham (2005), en los experimentos de flujo bifásico aire-agua realizados en tuberías de 0.0254 m y de 0.051 m de diámetro. En general, el flujo burbuja dispersa (DB) no fue obtenido por limitaciones de diseño del banco experimental.

Precisión de los modelos de predicción de patrones de flujo

En esta sección se evalúa la precisión de los modelos mecanicistas de Taitel y Dukler (1976), *TDMM*; Barnea (1987), *BMM*; Xiao et al. (1990), *XMM*, y Ouyang y Aziz (2002), *OAMM* y de los modelos de correlación de Mandhane et al. (1974), *MMC*, y Mukherjee y Brill (1985), *MBMC*, en la determinación de los patrones de flujo. El modelo de Mandhane et al. (1974), es aplicable únicamente para flujo horizontal. Para evaluar la precisión, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos mediante el uso de los modelos seleccionados y el patrón de flujo experimental. En los modelos se utilizaron las condiciones operacionales de los datos experimentales. De los 493 datos experimentales se eliminaron previamente los 157 puntos de transición ya que ninguno de los modelos seleccionados predice transiciones. Adicionalmente, en los modelos de Mukherjee y Brill (1985) y Ouyang y Aziz (2002), no se diferencia entre flujo estratificado liso (SS) y ondulado (SW), debido a que no establecen esta clasificación. En la tabla 4, se presentan los porcentajes de puntos de aciertos obtenidos por cada modelo en comparación con los datos experimentales para flujo horizontal e inclinado.

Tabla 4: Porcentaje de aciertos obtenidos por los modelos en comparación con los datos experimentales

θ	Modelos											
	TDMM (1976)		BMM (1987)		XMM (1990)		OAMM (2002)		MMC (1974)		MBMC (1985)	
	Ptos.	%	Ptos.	%	Ptos.	%	Ptos.	%	Ptos.	%	Ptos.	%
0°	98	81.7	92	76.7	96	80.0	71	59.2	78	65.0	70	58.3
1°	80	89.9	77	86.5	74	83.2	26	29.2	-	-	71	79.8
5°	56	90.3	51	82.3	51	82.3	24	38.7	-	-	55	88.7
10°	58	89.2	60	92.3	51	78.5	29	44.6	-	-	61	93.9
Total	292	86.9	280	83.3	272	81.0	150	44.6	-	-	257	76.5

Los porcentajes para cada ángulo de inclinación son calculados en función del número de puntos con patrones claramente definidos por ángulo, es decir, 120 puntos para 0°, 89 puntos para 1°, 62 puntos para 5° y 65 puntos para 10°. Finalmente, el porcentaje total es determinado en función del número de aciertos del total de los 336 puntos (ver Tabla 2).

En general, los modelos presentan un porcentaje promedio de aciertos mayor al 76 % para determinar el patrón de flujo en comparación con los datos experimentales, excepto el modelo de Ouyang y Aziz (2002), que para las condiciones de operación de los experimentos, presenta un porcentaje de 44.6 % de coincidencia en los puntos. El modelo de correlación de Mukherjee y Brill (1985), presenta un porcentaje de aciertos de 76.5%. Sin embargo, los modelo mecanicistas de Xiao et al. (1990), Barnea (1987) y Taitel y Dukler (1976), son mas precisos, con porcentajes de aciertos de 81.0 %, 83.3 % y 86.9 %, respectivamente.

En las Tablas 5 y 6 se presenta la precisión de los modelos de predicción de patrones de flujo clasificando los datos experimentales por tipo de flujo.

Tabla 5: Porcentaje de aciertos obtenidos por los modelos de correlación clasificando los datos por tipo de flujo

θ	Modelos											
	Mandhane et al. (1974)						Mukherjee y Brill (1985)					
	Ptos.	%ST	Ptos.	%SL	Ptos.	%AN	Ptos.	%ST	Ptos.	%SL	Ptos.	%AN
0°	27	52.9	16	100.0	35	76.1	21	41.2	16	100	33	71.7
1°		-		-		-	0	0	43	100	28	82.4
5°		-		-		-	0	0	39	100	16	94.1
10°		-		-		-	-	-	44	100	17	81.0
Total		-		-		-		30.4	142	100	94	79.7

Tabla 6: Porcentaje de aciertos obtenidos por los modelos mecanicistas clasificando los datos por tipo de flujo

Modelos												
θ	Taitel y Dukler (1976)						Barnea (1987)					
	Ptos.	%ST	Ptos.	%SL	Ptos.	%AN	Ptos.	%ST	Ptos.	%SL	Ptos.	%AN
0°	41	80.4	16	100	41	89.1	49	96.1	16	100	27	58.7
1°	4	33.3	43	100	33	97.1	0	0	43	100	34	100
5°	0	0	39	100	17	100	0	0	34	87.2	17	100
10°		-	44	100	14	66.7	-	-	41	93.2	19	90.5
Total	45	65.2	142	100	105	89.0	49	71.0	134	94.4	97	82.2

θ	Xiao et al. (1990)						Ouyang y Aziz (2002)					
	Ptos.	%ST	Ptos.	%SL	Ptos.	%AN	Ptos.	%ST	Ptos.	%SL	Ptos.	%AN
0°	45	88.2	16	100	35	76.1	51	100	2	12.5	18	39.1
1°	4	33.3	43	100	27	79.4	12	100	0	0	14	41.2
5°	0	0	39	100	12	70.6	6	100	6	15.4	12	70.6
10°	-	-	44	100	7	33.3	-	-	16	36.4	13	61.9
Total	49	71.0	142	100	81	68.6	69	100	24	16.9	57	48.3

Los porcentajes para cada ángulo de inclinación por patrón de flujo son calculados en función del número de puntos con patrones de flujo claramente definidos por ángulo. Finalmente, el porcentaje total es determinado en función del número de aciertos por patrón de flujo para todos los ángulos de inclinación del total de los 69 puntos de flujo estratificado (ST), los 142 puntos de flujo tapón (SL) y los 118 puntos de flujo anular (ver Tabla 2).

Los modelos de Taitel y Dukler (1976), Mukherjee y Brill (1985) y Xiao et al. (1990), identificaron todos los puntos de flujo tapón, es decir, presentaron un porcentaje de acierto de 100%. Para flujo anular, la mejor precisión la obtiene el modelo de Taitel y Dukler (1976), con un porcentaje de acierto de 89.0%. El modelo de Ouyang y Aziz (2002) presenta la mejor precisión para el flujo estratificado, con un porcentaje de acierto de 100%. El modelo de Mandhane et al. (1974), identificó todos los puntos de flujo tapón para tubería horizontal.

CONCLUSIONES

De los resultados experimentales se puede concluir que el patrón de flujo estratificado liso es una de las configuraciones más difíciles de obtener, solo se observó en flujo horizontal para valores bajos de velocidades superficiales de gas y de líquido. En comparación con el mapa experimental para flujo bifásico horizontal, la zona de flujo estratificado se reduce mientras que la de flujo tapón se incrementa a medida que aumenta el ángulo de inclinación. Para la inclinación 10° el patrón estratificado desaparece del mapa experimental. Esto es debido a que en flujo ascendente, el líquido tiende a retornar por efecto de la gravedad lo cual propicia el bloqueo de la tubería por tapones de líquido.

En la evaluación general, de los diferentes modelos en la determinación del tipo de flujo, para todos los ángulos de inclinación, frente a los 336 experimentos con un tipo de flujo claramente definido, se observa, que el modelo de Taitel y Dukler (1976), presenta la mejor precisión.

En las evaluaciones por patrón de flujo, el modelo de Taitel y Dukler (1976), obtiene las mejores precisiones para flujo tapón y flujo anular. Para flujo estratificado, la mejor precisión la obtiene el modelo de Ouyang y Aziz (2002). Sin embargo, es importante resaltar que ninguno de estos modelos define las transiciones como una banda. En estos modelos, las transiciones están definidas por diferentes criterios que delimitan su ubicación en un patrón u otro. Si en la evaluación realizada, se hubieran considerado los puntos experimentales definidos como transiciones, la capacidad de acierto de todos los modelos se hubiera visto significativamente reducida.

AGRADECIMIENTOS

Francisco García quisiera dedicar este trabajo a la memoria del M.Sc. Mahmoud Haoulo y agradece al CDCH-UCV por el apoyo económico otorgado a través de los proyectos de investigación No 08.00.6245.2008 y No 08.00.5653.2007 y la ayuda institucional 08.00.6681.2007.

NOMENCLATURA

AN	flujo anular
BMM	modelo mecanicista de Barnea (1987)
D	diámetro de tubería (m), diferencial
DB	flujo burbuja dispersa
F	flujo
I	indicador
máx.	máximo
MBMC	modelo de correlación de Mukherjee y Brill (1985)
min.	mínimo
MMC	modelo de correlación de Mandhane et al. (1974)
OAMM	modelo mecanicista de Ouyang y Aziz (2002)
P	presión manométrica (MPa)
SL	flujo tapón
SS	flujo estratificado liso
ST	flujo estratificado
SW	flujo estratificado ondulado
T	temperatura (°C), transmisor
TDMM	modelo mecanicista de Taitel y Dukler (1976)
U_{SG}	velocidad superficial de gas (m/s)
U_{SL}	velocidad superficial de líquido (m/s)
XMM	modelo mecanicista de Xiao et al. (1990)
θ	ángulo de inclinación

REFERENCIAS

- Barnea, D.; *A Unified Model for Predicting Flow Pattern Transitions in the Whole Range of Pipe Inclination*, Int. Journal of Multiphase Flow: 13(1), 1-12 (1987).
- Barnea, D., O. Shoham e Y. Taitel; *Flow Pattern Characterization in Two-Phase Flow by Electrical Conductance Probe*, Int. Journal of Multiphase Flow: 6(5), 387-397 (1980).
- Beggs, H. y J. Brill; *A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes*, Journal of Petroleum Technology: 25(5), 607-617 (1973).
- García, F y otros tres autores; *Friction Factor Improved Correlations for Laminar and Turbulent Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipelines*, Int. Journal of Multiphase Flow: 33(12), 1320-1336 (2007).
- García, F. y otros cinco autores; *Power Law and Composite Power Law Friction Factor Correlations for Laminar and Turbulent Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipelines*, Int. Journal of Multiphase Flow: 29(10), 1605-1624 (2003).
- García, F., R. García y D. Joseph; *Composite Power Law Holdup Correlations in Horizontal Pipes*, Int. Journal of Multiphase Flow: 31(12), 1276-1303 (2005).
- Gómez, L. y otros cuatro autores; *Unified Mechanistic Model for Steady-State Two-Phase Flow: Horizontal to Vertical Upward Flow*, SPE 65705, SPE Journal: 5(3), 339-350 (2000).
- Grolman, E. y J. Fortuin; *Liquid Hold-up, Pressure Gradient, and Flow Patterns in Inclined Gas-Liquid Pipe Flow*, Experimental Thermal and Fluid Science: 15(3), 174-182 (1997).

- Jin, N. y otros tres autores; *Flow Pattern Identification of Oil/Water Two-Phase Flow Based on Kinematic Wave Theory*, Flow Measurement and Instrumentation: 14(4-5), 177-182 (2003).
- Lovick, J. y P. Angeli; *Experimental Studies on the Dual Continuous Flow Pattern in Oil–Water Flows*, Int. Journal of Multiphase Flow: 30(2), 139-157 (2004).
- Lu, G., J. Wang y Z. Jia; *Experimental and Numerical Investigations on Horizontal Oil-Gas Flow*, Journal of Hydrodynamics, Ser. B: 19(6), 683-689 (2007).
- Mandhane, J., G. Gregory y K. Aziz; *A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes*, Int. Journal of Multiphase Flow: 1(4), 537-553 (1974).
- Mukherjee, H. y J. Brill; *Empirical Equations to Predict Flow Patterns in Two-Phase Inclined Flow*, Int. Journal of Multiphase Flow: 11(3), 299-315 (1985).
- Ouyang, L. y K. Aziz; *A Mechanistic Model for Gas-Liquid Flow in Horizontal Wells With Radial Influx or Outflux*, Petroleum Science and Technology: 20(1&2), 191-222 (2002).
- Rodriguez, O y R. Oliemans; *Experimental Study on Oil–Water Flow in Horizontal and Slightly Inclined Pipes*, Int. Journal of Multiphase Flow: 32(3), 323-343 (2006).
- Ros, N.; *Simultaneous Flow of Gas and Liquid as Encountered in Well Tubing*, Journal of Petroleum Technology: 13(10), 1037-1049 (1961).
- Saisorn, S. y S. Wongwises; *Flow Pattern, Void Fraction and Pressure Drop of Two-Phase Air–Water Flow in a Horizontal Circular Micro-Channel*, Experimental Thermal and Fluid Science: 32(3), 748-760 (2008).
- Shoham, O.; *Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes*, 1ª edición, 75-82, Society of Petroleum Engineers, USA (2005).
- Taitel, Y. y A. Dukler; *A Model for Prediction of Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow*, AIChE Journal: 22(1), 47-55 (1976).
- Taitel, Y., D. Barnea y A. Dukler; *Modelling Flow Pattern Transition for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes*, AIChE Journal: 26(3), 345-354 (1980).
- Woldesemayat, M. y A. Ghajar; *Comparison of Void Fraction Correlations for Different Flow Patterns in Horizontal and Upward Inclined Pipes*, Int. Journal of Multiphase Flow: 33(4), 347-370 (2007).
- Wong, T. e Y. Yau; *Flow Patterns in Two-Phase Air-Water Flow*, Int. Comm. Heat Mass Transfer: 24(1), 111-118 (1997).
- Xiao, J., O. Shoham y J. Brill; *A Comprehensive Mechanistic Model for Two-Phase Flow in Pipelines*, In The 65th SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA. Paper SPE 20631, 67-180. September 23-26 (1990).
- Zhang, H., Q. Wang, C. Sarica y J. Brill; *A Unified Mechanistic Model for Slug Liquid Holdup and Transition Between Slug and Dispersed Bubble Flows*, Int. Journal of Multiphase Flow: 29(1) 97-107 (2003).