

MODELOS MATEMÁTICOS SEMIEMPÍRICOS PARA LA DESCRIPCIÓN HIDRÁULICA DE LOS PLATOS DE UN EQUIPO PURIFICADOR DE GAS ACOMPAÑANTE DEL PETRÓLEO POR MÉTODO BIOLÓGICO

• Elina Fernández-Santana* • Rafael Franco-Rico •
Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cuba

*Autor de correspondencia

Resumen

Recientemente se propuso una nueva tecnología para la purificación de gas acompañante del petróleo haciendo uso de residuales albañales. El equipo purificador consta de una torre de platos de diseño novedoso y está patentado en la Oficina Cubana de la Propiedad Intelectual. Caracterizar el comportamiento hidráulico de los platos resulta imprescindible para garantizar una correcta y estable operación. Mediante la realización de un diseño de experimentos se analizó el comportamiento hidráulico de los platos. Se obtuvieron modelos matemáticos semiempíricos para describir el flujo del residual en sus diferentes secciones. A partir de los mismos, se pudo proponer la evaluación hidráulica del equipo.

Palabras clave: hidráulica de canales, hidráulica de platos, operaciones de purificación de gas acompañante del petróleo.

Introducción

El gas acompañante de petróleo (GAP) se ha convertido en una de las fuentes convencionales de energía más utilizadas en el mundo. Está compuesto principalmente por hidrocarburos volátiles de bajo peso molecular, que le aportan un alto contenido energético, y otros gases, como el dióxido de carbono ($\text{CO}_{2(g)}$) y el sulfuro de hidrógeno ($\text{H}_2\text{S}_{(g)}$), este último es altamente tóxico y corrosivo. La eliminación del $\text{CO}_{2(g)}$ y el $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ presentes en el gas acompañante es uno de los problemas fundamentales para el empleo de este combustible. Existen varias tecnologías para la purificación del GAP, la mayoría basadas en la absorción (física o química) de los componentes indeseables, empleando para ello reactivos adecuados (*Gas Processes Handbook*, 2004).

Estudios actuales han dado a la luz una nueva alternativa para purificar GAP empleando residuales albañales portadores de ciertas bacterias capaces de metabolizar el $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$. En

laboratorio se han obtenido niveles de remoción de $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ superiores al 90% (Fernández, 1999). Para la aplicación de este método biológico se ha propuesto un equipo que por sus características constructivas y operacionales resulta novedoso, el cual está registrado en la Oficina Cubana de la Propiedad Intelectual (Franco y Fernández, 2009). Consiste en una torre provista de platos por los que fluye el residual en régimen laminar; el gas a tratar se mueve paralelo a la superficie de los platos. El mantenimiento de un régimen de flujo laminar estable en un equipo de talla industrial puede resultar problemático. Por esta razón, es de vital importancia poder describir mediante modelos matemáticos semiempíricos el comportamiento hidráulico de los platos propuestos.

Descripción de la operación de los platos

El residual albañal ingresa al plato (figura 1b) a través del bajante tubular (a) proveniente del

plato superior y es introducido en el sello de líquido (b), que tiene como objetivo evitar la entrada de gas a través del bajante y distribuir el líquido de forma radial en la zona de entrada (c). Desde la zona de entrada (c), el líquido es distribuido a través de un vertedero dentado (d) a la zona de canales (e). En la zona de canales (e), el residual debe fluir en régimen laminar, para evitar formación de salpicaduras y la consecuente humectación del gas, lo que representa un requerimiento del método biológico que se emplea (Fernández, 1999). La zona de canales se encuentra ligeramente inclinada con respecto al plano horizontal, para garantizar el escurrimiento hacia el colector de salida (f). El colector de salida (f) está formado por una lámina inclinada a 45° y se encuentra limitado por la carcasa de la torre; en su extremo inferior se acopla el bajante tubular (a), para enviar el líquido al siguiente plato.

El GAP a tratar pasa a través de la zona abierta entre el plato y la carcasa (figura 1a), y fluye sobre la superficie de los canales, donde hace contacto con el residual. Para garantizar este movimiento, las zonas abiertas se disponen de forma alternada a lo largo de la torre.

Modelos relacionados con el flujo laminar en canales

Diferentes autores, entre los que figuran Chezy, Pavlovskii y Manning, han propuesto modelos para describir el flujo en ductos abiertos. Estos modelos se circunscriben por lo general a canales de gran tamaño, donde el régimen de flujo es turbulento (Chow, 1982; León y Estopiñán, 1989). Los modelos para la descripción del flujo laminar en canales de pequeño tamaño resultan escasos (Perry *et al.*, 1999). Para describir con rigurosidad este tipo de sistemas, es necesario determinar modelos que satisfagan las particularidades del caso que se estudia.

El flujo laminar de un fluido newtoniano por un canal rectangular se puede modelar, haciendo uso del balance de cantidad de movimiento, y bajo ciertas simplificaciones

puede estimarse la altura del líquido (hl) (Bird *et al.*, 1992; Shames, 1995):

$$hl = \left(3 \frac{\mu v}{g \rho \sin(\alpha)} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Este modelo no tiene en cuenta los efectos resistivos entre el fluido y el fondo del canal, así como la presencia de las paredes laterales, por lo que los valores de hl que genera resultan inferiores a los reales.

Otra forma de abordar el sistema consiste en aplicar un balance de energía mecánica en los extremos del canal. La ecuación puede resumirse de la siguiente forma:

$$\Delta Z = f \frac{L}{De} \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (2)$$

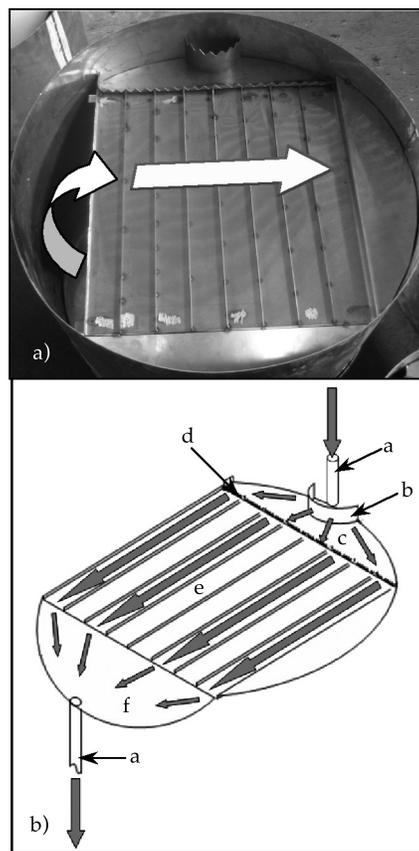


Figura 1. Platos propuestos; a) montado en una sección torre; b) esquema de funcionamiento.

Donde el diámetro equivalente (De) se define como:

$$De = 4 \frac{A}{P_m} = 4 \frac{a hl}{a + 2hl} \quad (3)$$

La bibliografía plantea que en la zona laminar, el factor de fricción de Darcy (f) depende sólo del número de Reynolds (Re), según una relación inversa del tipo:

$$f = \frac{c}{Re} \quad (4)$$

Para canales, Re se define como:

$$Re = \frac{v \rho De}{\mu} \quad (5)$$

Para el coeficiente de ajuste c , se reportan valores en el intervalo de 224-960 (León y Estopiñán, 1989; Perry *et al.*, 1999).

Estos modelos presentan simplificaciones o generalizaciones que no permiten una descripción rigurosa del fenómeno y, de forma general, asocian los efectos resistivos a acción de las fuerzas viscosas, despreciando la acción de otras fuerzas, como gravedad y tensión superficial. Los efectos de la tensión superficial pueden afectar el flujo sólo en situaciones muy especiales, que no resultan frecuentes en casos de ingeniería. La acción de la fuerza de gravedad puede ser importante en muchos sistemas tanto como fuerza motriz como en la formación de ondas sobre la superficie del líquido (León y Estopiñán, 1989). Algunos autores (Menéndez y Tarela, 2001) plantean que su acción debe incluirse en el factor de fricción, considerándolo una función de los criterios adimensionales de Reynolds (Re) y Froude (Fr).

Materiales y métodos

Se construyeron varios prototipos de platos con acero inoxidable; las diferentes piezas fueron soldadas a tope. Los sellos de líquido y vertederos se construyeron con láminas de aluminio flexible y fueron unidas al plato con resina epóxica. Los bajantes son segmentos de tubería de acero al carbono IPS cédula 40 y se

unieron a los colectores de salida mediante soldadura.

Para el análisis de la zona de canales se planteó un diseño de experimentos, donde se emplearon canales con anchos de 0.025, 0.050, 0.075 y 0.100 m, y longitudes de 0.30, 0.60, 0.90 y 1.20 m. Para el estudio de los vertederos se combinaron los diferentes anchos de canal con vertederos dentados, con amplitudes de los ángulos de inclinación de los dientes de 30, 60 y 90°. El estudio del sistema colector-bajante se realizó mediante un diseño donde se utilizaron tuberías de diámetros 0.0158, 0.0209 y 0.0270 m, y longitudes de 0.15, 0.30, 0.45 y 0.60 m.

Para todos los casos, la variable independiente es el flujo de líquido que se alimenta al plato (Q). Dicha variable se controla mediante una válvula y se mide con rotámetros Werk Medingen: flujo máximo 2 000 L/h ($5.56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$), 150 L/h ($4.17 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$) y 25 L/h ($6.94 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$), con precisiones de 10 L/h ($2.78 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$), 1 L/h ($2.78 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$) y 0.5 L/h ($1.39 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$), respectivamente, en función del flujo circulante. Una vez estabilizado el flujo, se procedió a medir las variables de respuesta: altura de líquido en los canales (hl), altura de líquido en el vertedero (hlw) y altura de líquido acumulado en el colector de salida (hlc). Para ello se empleó un catetómetro de precisión 0.1 mm y se realizaron dos réplicas de cada experiencia. En todas las experiencias se empleó agua de acueducto. Esta consideración puede hacerse debido a que para la purificación de GAP por método biológico se emplea sólo la parte líquida del residual albañal, exigiéndose la eliminación previa de sólidos mediante sedimentación o filtración. Estudios realizados muestran que los residuales albañales cubanos presentan características físico-químicas similares a las del agua de acueducto (Menéndez y Pérez, 2003). Todos los modelos se obtuvieron mediante el empleo del paquete estadístico *Statgraphics v.5.0*.

Resultados y discusión

La incertidumbre asociada con la medición de los flujos de líquido no supera el 2.5% del

valor medido. Para las alturas de líquido, sólo en algunos casos en los que se manipularon películas muy delgadas ($hl < 2$ mm) se reportan incertidumbres superiores al 3%; en el resto de las determinaciones, la incertidumbre no supera el 1%. Se considera que el nivel de incertidumbre es admisible para trabajos ingenieriles.

Ajuste de un modelo semiempírico para la determinación de la altura de líquido en canales

A partir del modelo obtenido por el balance de cantidad de movimiento del sistema (ecuación (1)), se puede plantear una corrección que permita incluir los efectos resistivos no considerados. La corrección se basa en la introducción de un coeficiente que depende del ancho del canal, del flujo de líquido y de las propiedades de transporte del líquido (ρ y μ); englobando estos tres parámetros, se puede decir que el coeficiente es función de a y Re . De esta forma se puede obtener un modelo (ecuación (6)) que describe el comportamiento hidrodinámico del fluido atendiendo a sus propiedades físicas, a las características geométricas y al régimen de flujo, lo cual lo hace más general y utilizable cuando existan pequeñas variaciones en el sistema:

$$hl = k \left(\frac{\mu v}{g \rho \text{sen}(\alpha)} \right)^{1/2} \tag{6}$$

A partir de los datos que se reportan en el cuadro 1, se obtiene el modelo que describe el comportamiento del coeficiente k con un 98.8% de ajuste:

$$k = 0.356 \frac{Re^{0.32}}{Fr^{0.8}} \tag{7}$$

Siendo Fr el número de Froude:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g hl}} \tag{8}$$

El término k engloba los efectos del rozamiento dinámico entre el fluido y el canal; al ser función de los criterios adimensionales de Reynolds y Froude, pudiera generalizarse para fluidos con otras características, lo cual podría corroborarse mediante la realización de algunos experimentos. Su empleo en la ecuación (6) genera errores promedios de 3.04% en la estimación de hl .

La figura 2 relaciona la dependencia observada entre los criterios de Re y Fr para los diferentes anchos de canal (a). Para los canales de 0.075 y 0.10 m de ancho, se observa

Cuadro 1. Resultados experimentales para hl .

a (m)	Q (10^{-5} m ³ /s)	hl (m)	Re	Fr
0.025	0.278	0.0039	677	0.15
	0.556	0.0040	1 369	0.28
	0.833	0.0042	2 087	0.40
0.050	1.140	0.0032	800	0.41
	1.390	0.0033	1 333	0.46
	1.940	0.0036	1 904	0.57
0.075	1.390	0.0020	782	0.67
	1.940	0.0024	1 114	0.70
	3.060	0.0031	1 839	0.75
0.100	1.390	0.0024	589	0.40
	3.060	0.0031	1 312	0.57
	4.170	0.0033	1 797	0.71

que no existen diferencias significativas en las dependencias entre los criterios de Re y Fr para un 95% de confiabilidad. Este comportamiento se debe a la reducción del efecto resistivo de las paredes laterales del canal a medida que se aumenta el ancho del mismo, siendo no significativo para $a \geq 0.075$ m.

Aplicabilidad del balance de energía mecánica

El modelo obtenido para el factor de fricción de Darcy (f) (ecuación (9)) presenta un coeficiente de correlación de 68.2%. La aplicación del balance de energía mecánica genera errores inferiores al 24%:

$$f = \frac{1100}{Re} \quad (9)$$

Los modelos obtenidos presentan coeficientes de ajuste dentro del rango que reporta la bibliografía especializada para la determinación de los coeficientes de fricción, la altura del líquido y otros parámetros hidráulicos, cuyo comportamiento depende de una cantidad considerable de variables. Resulta notorio que la ecuación semiempírica propuesta (ecuación (6)) muestre un alto grado de ajuste, permitiendo una descripción más precisa del fenómeno en el sistema de estudio.

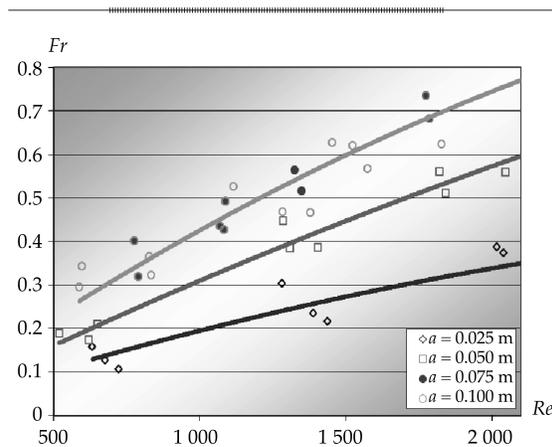


Figura 2. Relación entre los criterios de Re y Fr para diferentes anchos de canal en la zona de régimen de flujo laminar.

Descripción del comportamiento de los vertederos

Un análisis estadístico de los resultados experimentales (cuadro 2) demuestra que no existe influencia del ángulo entre los dientes del vertedero sobre h/w . Por lo tanto, esta variable dependerá sólo de la longitud del vertedero (Lw) y el flujo de líquido (Q). Este tipo de sistema por lo general se describe haciendo uso de la ecuación de Francis (Huang y Hodson, 1958; Peters y Timmerhaus, 1991; Treybal, 1980):

$$h/w = b \left(\frac{Q}{Lw} \right)^x \quad (10)$$

Al realizar el ajuste se obtiene $b = 0.102$ y $x = 0.3$. La ecuación de Francis describe el comportamiento de los vertederos con un 89% de correlación.

Modelación matemática del sistema colector-bajante

La figura 3 muestra el comportamiento promedio de la altura de líquido acumulado en relación con el flujo de líquido (Q) que circula por el sistema para diferentes diámetros de tubería de bajante (D). En todas las curvas se definen tres tramos con comportamientos diferentes, existiendo, para cada una, un punto de inflexión en el intervalo de valores de h/c entre 0.045 y 0.055 m. El tramo inicial se caracteriza por la existencia de vórtice a la entrada del bajante. En el segundo tramo, el vórtice comienza a ser inestable, generándose pulsaciones del flujo a la salida del bajante. En el tercer tramo se logra un escurrimiento tranquilo. De forma general, el flujo pulsante y el vórtice desaparecen cuando la acumulación de líquido en el colector supera los 0.05 m.

Dado que la longitud de la tubería del bajante es muy pequeña, no es posible la aplicación de las ecuaciones conocidas para el cálculo del coeficiente de fricción, ya que las mismas hacen referencia a un régimen de flujo plenamente

Cuadro 2. Valores de h_{lw} para diferentes anchos de canal y ángulos entre los dientes del vertedero.

a (m)	Q ($10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$)	$\Theta = 30^\circ$	$\Theta = 60^\circ$	$\Theta = 90^\circ$
		h_{lw} (m)	h_{lw} (m)	h_{lw} (m)
0.025	0.278	0.0082	0.0078	0.0081
	0.556	0.0090	0.0088	0.0085
	1.390	0.0102	0.0105	0.0097
	1.940	0.0129	0.0114	0.0120
	2.500	0.0142	0.0121	0.0139
0.050	1.390	0.0091	0.0095	0.0082
	2.500	0.0113	0.0109	0.0091
	3.060	0.0115	0.0112	0.0107
	3.610	0.0121	0.0125	0.0115
	5.560	0.0131	0.0136	0.0120
0.075	1.390	0.0059	0.0063	0.0068
	2.500	0.0074	0.0098	0.0093
	3.060	0.0093	0.0121	0.0102
	4.170	0.0095	0.0128	0.0109
	5.560	0.0117	0.0128	0.0122
0.100	1.940	0.0070	0.0082	0.0086
	3.060	0.0085	0.0104	0.0094
	3.610	0.0095	0.0110	0.0100
	4.170	0.0096	0.0119	0.0102
	5.560	0.0112	0.0115	0.0109

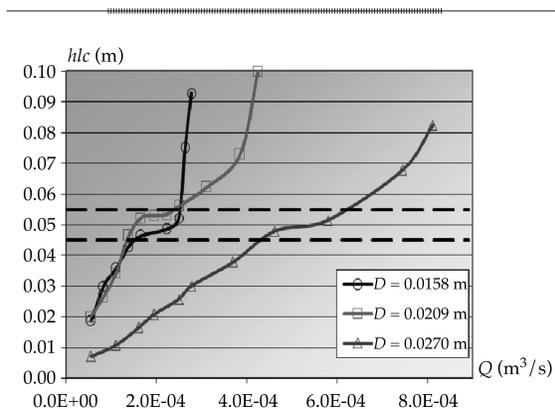


Figura 3. Relación entre h_{lc} y Q para diferentes diámetros de bajante.

evacuación del líquido y además su sección transversal es significativamente mayor que el diámetro del bajante, se puede suponer que las fuerzas friccionales se concentran en la tubería y el balance se transforma en la siguiente expresión:

$$\frac{1}{2} C_f \left(\frac{L_t}{D} \right) A_t \rho (v_t)^2 = g \rho A_t (L_t + h_{lc}) \quad (11)$$

El comportamiento experimental del coeficiente de fricción (C_f) para diferentes valores de D y L_t se ilustra en la figura 4. C_f muestra una proporcionalidad inversa con Re , comportamiento similar al del factor de fricción de Darcy para tuberías (León y Estopiñán, 1989; Menéndez y Tarela, 2001; McCabe *et al.*, 1991); existe un comportamiento atípico en relación con D , ya que por lo general los factores de fricción presentan una proporcionalidad in-

desarrollado. Para modelar el sistema es necesario aplicar un balance macroscópico de cantidad de movimiento (Franco y Fernández, 2009; Brodkey y Hershey, 1988). Puesto que el colector presenta una geometría que facilita la

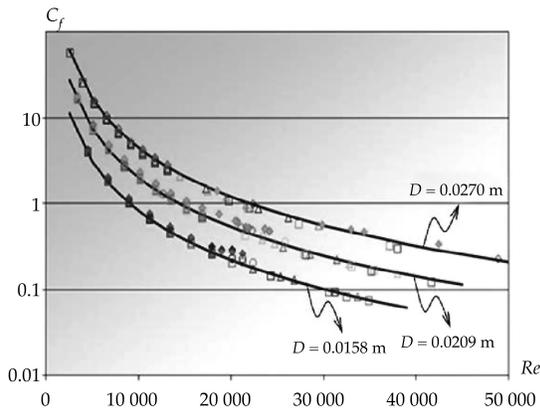


Figura 4. Comportamiento de C_f en función Re_t .

versa con D (Perry *et al.*, 1999). En el caso del sistema colector-bajante, la presencia de una contracción brusca del área de flujo, al pasar del colector al bajante, genera una resistencia local y provoca interferencias en los perfiles de velocidad, que no pueden atenuarse en el bajante, cuya longitud impide la aparición de un régimen hidrodinámico desarrollado (Rabinóvich, 1987). Ambos efectos provocan que las fuerzas resistivas se manifiesten de forma diferente y expliquen los resultados obtenidos.

El coeficiente de fricción (C_f) se puede considerar independiente de la longitud de la tubería. C_f se comporta como una función de Re y D (figura 4). Aplicando técnicas de regresión no lineal, se pueden ajustar los resultados experimentales al siguiente modelo:

$$C_f = 8.77 \cdot 10^{12} \frac{D^{2.9}}{Re_t^{1.94}} \quad (12)$$

El modelo presenta un coeficiente de ajuste del 99.8% y su empleo genera errores no superiores al 15% en la estimación de h_{lc} (figura 5). No es recomendable emplearlo para describir el comportamiento del sistema en las cercanías del fenómeno de inundación debido a que en estas condiciones el coeficiente de

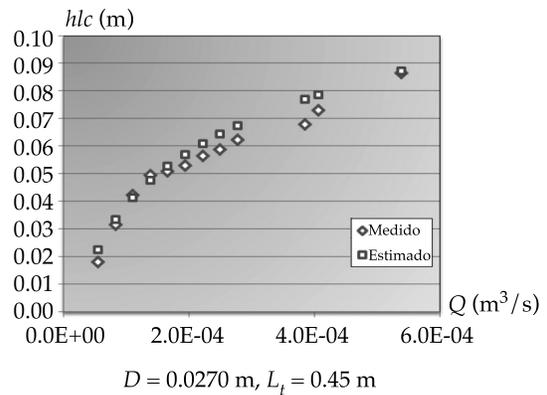
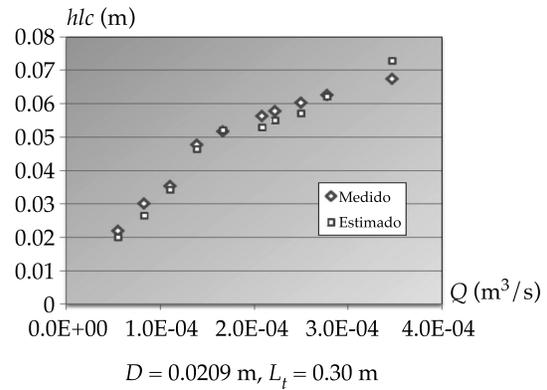
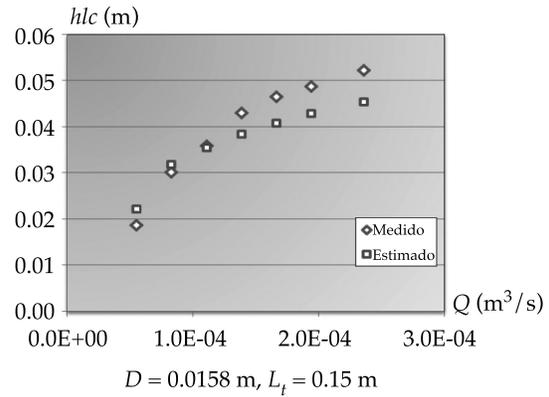


Figura 5. Relación entre h_{lc} medida y estimada para diferentes valores de D y L_t laminar.

fricción tiende a aumentar, desviándose del comportamiento descrito por el modelo.

Conclusiones

Los modelos matemáticos ajustados describen el funcionamiento hidráulico de los platos propuestos para el equipo purificador de GAP

por método biológico. Su empleo permite la confección de metodologías de diseño y evaluación de los mismos de forma segura, garantizándose el mantenimiento de las condiciones operacionales que presupone la aplicación del método biológico.

El flujo del residual en la zona acanalada puede describirse mediante una ecuación semiempírica derivada de la aplicación del balance de cantidad de movimiento con la incorporación de un coeficiente empírico, que engloba los efectos de la fricción entre el fluido y las paredes de los canales. El balance de energía mecánica también puede ser aplicado, aunque su uso genera mayor margen de error.

El comportamiento de los vertederos puede ser descrito por la ecuación de Francis, la cual se empleará para el diseño de estos elementos constructivos.

La aplicación del balance macroscópico de cantidad de movimiento al sistema colector-bajante resulta adecuada, describiendo con estrecho margen de error la evacuación del líquido. El modelo obtenido introduce un coeficiente de fricción que es función del número de Reynolds y la rugosidad relativa en la tubería de bajante.

Nomenclatura

a	Ancho del canal (m).
A	Área de flujo (m ²).
b, c, x	Coefficientes de ajuste (-).
D_e	Diámetro equivalente (m).
f	Factor de fricción de Darcy (-).
Fr	Número de Froude (-).
g	Constante de aceleración de la gravedad (9.81 m/s ²).
hl	Altura de líquido en el canal (m).
hlc	Altura de líquido acumulado en el colector de salida (m).
hlw	Altura de líquido en el vertedero (m).
k	Coefficiente empírico (-).
L	Longitud del canal (m).
Lw	Longitud del vertedero (m).
Pm	Perímetro mojado (m).
Q	Flujo de líquido, (m ³ /s).

Re	Número de Reynolds en los canales (-).
Re_t	Número de Reynolds en la tubería de bajante (-).
v	Velocidad del fluido (m/s).
v_t	Velocidad del fluido en la tubería de bajante (m/s).

Letras griegas

ε	Rugosidad absoluta de la tubería (m).
α	Ángulo de inclinación del canal (°).
μ	Viscosidad del líquido (Pa s).
ρ	Densidad del líquido (kg/m ³).
ΔZ	Diferencia de altura entre los extremos del canal (m).

Recibido: 22/12/09
Aceptado: 03/12/12

Referencias

- BIRD, R., STEWART, W.E. y LIGHTFOOT, E.N. *Fenómenos de transporte*. Barcelona: Editorial Reverté, S.A., 1992.
- BRODKEY, R.S., and HERSHEY, H.C. *Transport Phenomena. A unified approach*. USA: McGraw Hill, 1988.
- CHOW, V.T. *Hidráulica de canales abiertos*. 3ª reimpresión. México: Editorial Diana, 1982.
- FERNÁNDEZ, E. *Metodología de bajo costo para disminuir la concentración de H₂S(g) en el biogás*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. La Habana, 1999.
- FRANCO, R. y FERNÁNDEZ, E. *Equipo para la purificación de gas acompañante del petróleo*. Patente núm. 23369. La Habana: Oficina Cubana de la Propiedad Intelectual (OCPI), 2009.
- GAS PROCESSES HANDBOOK. Hydrocarbon Processing, Gulf Publishing Company, 2004.
- HUANG, C.J. and HODSON, J.R. Perforated Trays. *Petroleum Refiner*. Vol. 37, No. 2, 1958, pp. 104-118.
- LEÓN, A. y ESTOPIÑÁN, A. *Hidráulica de canales*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1989.
- MCCABE, W.L., SMITH, J.C. y HARRIOTT, P. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 4ª edición. USA: McGraw Hill, 1991.
- MENÉNDEZ, A.N. y TARELA, P.A. *Transporte de contaminantes en el medio acuático*. Mar del Plata, 2001.
- MENÉNDEZ, C.L. y PÉREZ, J. *Procesamiento para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales*. 2ª edición. La Habana: Centro de Ingeniería de Procesos, CUJAE, 2003.

PERRY, R.H., GREEN, D.W., and MALONEY, J.O. *Chemical Engineer's Handbook*. 7th ed. USA: McGraw Hill, 1999

PETERS, M.S. and TIMMERHAUS, K.D. *Plant design and economics for chemical engineers*. 4th ed. McGraw Hill, USA, 1991.

RABINÓVICH, E.Z. *Hidráulica*. Rusia: Editorial Mir, 1987.

SHAMES, I.H. *Mecánica de fluidos*. 3^a edición. Colombia: McGraw Hill, 1995.

TREYBAL, R. *Operaciones con transferencia de masa*. 2^a edición. USA: McGraw Hill, 1980.

Abstract

FERNÁNDEZ-SANTANA, E. & FRANCO-RICO, R. *Semi-empirical mathematical models for the hydraulic description of petroleum gas tray equipment, using a biological method.* Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 4, September-October, 2013, pp. 141-150.

Recently, a new technology to purify petroleum gas has been developed using sewer wastewater. The purification equipment consists of an innovative design of a tray tower patented by the Cuban Intellectual Property Office. The characterization of the behavior of the tray hydraulics is essential to guaranteeing correct and stable operations. The tray hydraulics was analyzed by means of an experimental design. Semi-empirical mathematical models were obtained to describe the wastewater flow in the different tray sections, making it possible to evaluate the hydraulic equipment.

Keywords: channels hydraulics, tray hydraulics, petroleum gas purification operations.

Dirección institucional de los autores

Dra. Elina Fernández Santana
Dr. Rafael Franco Rico

Facultad de Ingeniería Química
Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría"
Calle 114 núm. 11901 entre 117 y 127 Marianao
19390 La Habana, CUBA
Teléfono: +53 (7) 2663 426
Fax: +53 (7) 2672 964
elina@quimica.cujae.edu.cu
franco@quimica.cujae.edu.cu