

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA.
FACULTAD DE INGENIERIA.
ESCUELA DE QUÍMICA.
MECANICA DE FLUIDOS.

TIEMPO DE VACIADO PARA TANQUES SIN BOMBAS.

CHEN C., William.

MARIÑO D., Maryeri.

RODRIGUEZ R., Neliana.

PROF. SALVATORE VALENTINO

Caracas, Febrero de 2004.

La mayoría de los procesos químicos industriales de hoy en día requieren de almacenamiento en tanques de diferentes dimensiones y formas. Es de vital importancia, para desarrollar un plan de proceso, conocer un estimado del tiempo que se requiere para disminuir el nivel de contenido o vaciar completamente el tanque. El presente informe tiene como principal objetivo implementar y explicar el uso de ciertos métodos para la estimación del tiempo necesario de vaciado de tanques, los cuales proveen una gran precisión comparado con los tiempos de descargas reales.

El uso de la gravedad para descargar o vaciar un tanque es popular por procesos por cargas por ser la forma más factible, su uso implica la utilización de válvulas que son más simples y económicas comparadas con las bombas. Por otra parte el tiempo de descarga no es controlado; estando la mayoría de las veces influenciado por la geometría del sistema de tuberías y el propio tanque, pero puede ser determinado.

El cálculo de la duración de vaciado, es un problema de ingeniería, si el resultado estimado es muy cercano a los tiempos verdaderos el funcionamiento de la planta será mejor.

Shoaei y Loiacono resolvieron este problema para tanques verticales de cabezas planas, elípticas y hemisféricas incluyendo la pérdida asociada a la tubería de salida, usando una constante para el factor de fricción.

Los temas a tratar a lo largo de este informe son:

- Ecuación para calcular el tiempo de vaciado de tanques de fondo cónico, curvo o redondo.
- Estimación del factor de fricción en la tubería de salida.
- Uso del coeficiente de resistencia, K , para la tubería de salida mejorando así la aplicación a modelos reales.

A continuación se presenta la nomenclatura de las ecuaciones a utilizar:

NOMENCLATURAS

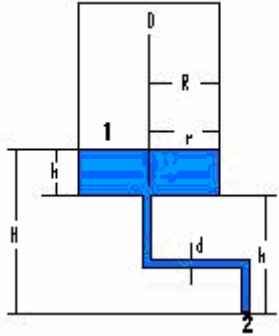
b	Profundidad del fondo elíptico.
D	Diámetro del tanque.
d	Diámetro de la tubería.
F_D	Factor de fricción.
g	Gravedad.
H_o	Nivel inicial del líquido medido a partir de la descarga de la tubería.
H_f	Nivel final del líquido medido a partir de la descarga de la tubería.
h_o	Distancia desde el fondo del tanque hasta la descarga de tubería.
h_i	Nivel de líquido inicial en el tanque.
h_f	Nivel de líquido final en el tanque.
L_{equi}	Longitud equivalente de tubería.
t	Tiempo de descarga.
α	Angulo entre la línea central del tanque y la cara cónica del fondo.
Q	Volumen.

Cálculo del tiempo de vaciado de tanques.

1. Tanques planos con fondos redondos:

Loiacono resolvió el problema para el cálculo del tiempo de vaciado de un tanque con fondo plano. A continuación se deduce la ecuación para el tiempo de vaciado de tanques:

Fig 1.- Tanque con fondo plano.



Aplicando Bernoulli desde el punto 1 al 2:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_f \quad (1)$$

Asumiendo:

$$\frac{P_1}{\rho g} = \frac{P_2}{\rho g} \quad \text{y} \quad \frac{V_1^2}{2g} \cong 0$$

Y observando que: $Z_1 - Z_2 = H$ y $V_2 = V$ se obtiene:

$$H = \frac{V^2}{2g} + h_f \quad (2)$$

Por otro lado:

$$h_f = f_d \left(\frac{L}{d} \right) * \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

$$H = H_0 - \frac{4 * Q}{\pi D^2} \quad (4)$$

Sustituyendo en la ecuación 2 y despejando V:

$$V^2 = \frac{2g}{\frac{f_d L}{d} + 1} * \left(H_0 - \frac{4Q}{\pi D^2} \right) \quad (5)$$

Aplicando la ecuación de continuidad se tiene:

$$\frac{dQ}{dt} = AV = \frac{\pi d^2}{4} V \quad (6)$$

Entonces:

$$V = \frac{4dQ}{\pi d^2 dt} \quad (7)$$

Sustituyendo la ecuación 7 en la 5, y organizando los términos:

$$dt = \frac{4}{\pi d^2} \left[\frac{2g}{\frac{f_d L}{d} + 1} * \left(H_0 - \frac{4Q}{\pi D^2} \right) \right]^{-1/2} dQ \quad (8)$$

Integrando desde $t = 0$ hasta $t = t_f$ y desde $Q = 0$ hasta $Q = Q_f$ se obtiene:

$$t_f = \frac{D^2}{d^2} \sqrt{\frac{2}{g} \left(\frac{f_d L}{d} + 1 \right)} \left(\sqrt{H_0} - \sqrt{H_0 - \frac{4Q_f}{\pi D^2}} \right) \quad (9)$$

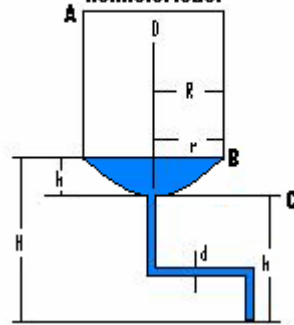
$$t_f = \frac{D^2}{d^2} \sqrt{\frac{2}{g} \left(\frac{f_d L}{d} + 1 \right)} \left(\sqrt{H_0} - \sqrt{H_f} \right) \quad (10)$$

La ecuación 10 estima el tiempo de vaciado de tanques de fondos planos.

2. Tanques planos con fondos redondos:

Para el caso cuando los niveles de líquidos iniciales y finales estén entre los puntos fijos A y B, el problema se reduce a un tanque con fondo plano (ecuación N°10). Para el caso en que los niveles de líquidos iniciales y finales estén entre los puntos fijos B y C, el problema fue resuelto por Shoaie y Sommerfield quienes evaluaron los tiempos de vaciado de tanques con fondos elípticos y hemisféricos. Las ecuaciones de la N°11 a la N°15 son los resultados reportados:

fig 2.- Tanques con fondos elípticos o hemisféricos.



$$G = \left(\frac{D}{db} \right)^2 \sqrt{\frac{1}{2g} \left(1 + \frac{f_d L}{d} \right)} \quad (11)$$

$$B = h_0 + b \quad (12)$$

$$E^2 = h_0^2 + 2bh \quad (13)$$

$$t = G \left[\left(\frac{2}{5} H_f^2 - \frac{4B}{3} H_f + 2E^2 \right) \sqrt{H_f} - \left(\frac{2}{5} H_0^2 - \frac{4B}{3} H_0 + 2E^2 \right) \sqrt{H_0} \right] \quad (14)$$

El área transversal de la superficie del líquido en el fondo del tanque es:

$$A = \frac{\pi R^2}{b} \left(2h - \frac{h^2}{b} \right) \quad (15)$$

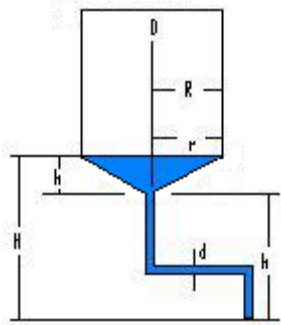
La ecuación 14 estima el tiempo de vaciado de tanques para fondos redondos.

3. Tanques con fondos cónicos:

Los tanques con fondo cónicos se están haciendo cada día más comunes en las industrias químicas y en las aplicaciones farmacéuticas. El siguiente esquema es un nuevo modelo del comportamiento del vaciado de tanques. Como punto de partida Shoaie usó la ecuación diferencial de Bernoulli para un fluido que fluye por gravedad en un tanque vertical obteniendo:

$$A \frac{dh}{dt} = -\alpha \left(\frac{2gH}{1 + \frac{f_D L}{d}} \right)^{1/2} \quad (16)$$

fig 3.- Tanques con fondos cónicos.



De la figura 3 se deduce:

$$r = h \cdot \tan \alpha \quad (17)$$

$$A = \pi r^2 \quad (18)$$

$$A = \pi h^2 (\tan \alpha)^2 \quad (19)$$

Y para la salida del tubo:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (20)$$

$$h = H - h_0 \quad (21)$$

Sustituyendo estos términos en la ecuación 16 se obtiene:

$$\pi (H - h_0)^2 (\tan \alpha)^2 \frac{dH}{dt} = -\frac{\pi}{4} d^2 \left(\frac{2gH}{1 + \frac{f_D L}{d}} \right)^{0.5} \quad (22)$$

Al integrar desde H_0 hasta H_f (ambos niveles están dentro del fondo cónico). La expresión para el tiempo de vaciado de tanque es:

$$t = C \left[\left(-\frac{2}{5} H_f^2 + \frac{4h_0}{3} H_f - 2h_0^2 \right) \sqrt{H_f} + \left(\frac{2}{5} H_0^2 - \frac{4h_0}{3} H_0 + 2h_0^2 \right) \sqrt{H_0} \right] \quad (23)$$

Donde el término C se define como:

$$C = \left(\frac{4}{d} \right) (\tan \alpha)^2 \left(\frac{1 + \frac{f_D L}{d}}{2g} \right)^{0.5} \quad (24)$$

Estimación del factor de fricción en la tubería de salida. Uso del coeficiente K

Shoaei y Loiacono, ambos usaron un factor de fricción constante para los cálculos, lo cual es aceptable cuando el flujo de salida de la tubería esta en régimen de turbulencia completa ($Re > 10^5$), pero causa incremento de error cuando el régimen es turbulento o laminar. Este error es importante para vaciado de tanque por gravedad ya que el diámetro de la tubería de salida puede ser muy pequeño. Hay dos formas de solventarlo:

1.- Si se reemplaza ($f_D L / d$) por el coeficiente de resistencia K en las ecuaciones 10 y 24 estas representarán adecuadamente el comportamiento real, sin embargo existe otro camino más efectivo:

2.- Determinando un factor de fricción promedio. Para el caso fuera de la región de turbulencia completa, el factor de fricción es una función de la velocidad en la tubería de salida, y constantemente varía mientras el tanque se vacía. El hacer el f_D variable, al aplicar Bernoulli hace el cálculo muy complicado por ello es una buena aproximación el promedio del f_D para determinar así el coeficiente de resistencia.

El cálculo de f_D es un proceso iterativo, es decir, se supone un f_D (en regimen de turbulencia completa), luego se calcula el tiempo de vaciado de tanque de acuerdo a su fondo. Se determina el volumen vaciado y con este se halla la velocidad con la cual se obtiene f_D usando el diagrama de Moody o la ecuación de Colbrook, con este f_D se recalcula el tiempo de vaciado repitiendo el procedimiento hasta que f_D se estabilice.

Para determinar el volumen vaciado, se utilizan las siguientes ecuaciones:

Para tanques con fondos planos: $V = \frac{\pi}{4} D^2 (h_i - h_f) \quad (25)$

Para tanques con fondos cónicos: $V = \frac{\pi}{3} (\tan \alpha)^2 (h_i^3 - h_f^3) \quad (26)$

Para tanques con fondo redondos: $V = \frac{\pi}{4b} D^2 \left[(h_i^2 - h_f^2) - \frac{1}{3b} (h_i^3 - h_f^3) \right] \quad (27)$

Las ecuaciones 26 y 27 se aplican dentro de la geometría respectiva, fuera de esta se aplica la ecuación 25.

(Todas las ecuaciones empleadas fueron tomadas de las referencias consultadas)

Para más información contactar:
chex88chex@yahoo.com

Referencias:

Shoaei, M y Sommerfield, Revista Chemical Engineering June 2000 Pag. 115
Nick Loiacomo, Revista Chemical Engineering Aug 1987 Pag. 164