

Guía Tutorial: Manómetros y Decantadores

1. Introducción a la Estática de Fluidos

La estática de fluidos estudia el comportamiento de los fluidos en reposo y las fuerzas que actúan sobre ellos. Entre sus aplicaciones principales encontramos la medición de presiones mediante manómetros y la separación de líquidos inmiscibles mediante decantadores.

2. Manómetros

2.1 Principios Físicos

Un manómetro es un instrumento utilizado para medir diferencias de presión. El principio fundamental se basa en el equilibrio hidrostático, donde la diferencia de presión entre dos puntos está relacionada con la altura de la columna de fluido:

$$\Delta P = \rho gh$$

Donde:

- ΔP = diferencia de presión (Pa)
- ρ = densidad del fluido (kg/m^3)
- g = aceleración gravitacional (9.81 m/s^2)
- h = altura de la columna de fluido (m)

2.2 Manómetro de Tubo en U

El manómetro de tubo en U contiene un líquido de densidad ρ_A (generalmente mercurio) y se utiliza para medir la diferencia de presión entre dos puntos (p_a y p_b).

La ecuación fundamental para este tipo de manómetro es:

$$p_a - p_b = gR_m(\rho_A - \rho_B)$$

Donde:

- p_a y p_b = presiones en los extremos del manómetro
- g = aceleración de la gravedad
- R_m = diferencia de altura entre los meniscos
- ρ_A = densidad del fluido manométrico
- ρ_B = densidad del fluido por encima del manómetro (generalmente un gas)

Si el fluido B es un gas, su densidad ρ_B suele ser despreciable en comparación con ρ_A .

2.3 Manómetro Inclinado

Para medir pequeñas diferencias de presión, se utiliza el manómetro inclinado. En este caso, uno de los brazos del manómetro está inclinado en un ángulo α con respecto a la horizontal.

La ecuación para el manómetro inclinado es:

$$p_a - p_b = gR_l(\rho_A - \rho_B) \sin \alpha$$

Donde R_l es la distancia a lo largo del tubo inclinado.

2.4 Metodología de Resolución de Problemas con Manómetros

1. Identificar el tipo de manómetro y los fluidos involucrados

- Determinar las densidades de los fluidos
- Identificar los puntos de medición de presión

2. Establecer la ecuación adecuada

- Para manómetro de tubo en U: $p_a - p_b = gR_m(\rho_A - \rho_B)$
- Para manómetro inclinado: $p_a - p_b = gR_l(\rho_A - \rho_B) \sin \alpha$

3. Convertir todas las unidades al mismo sistema

- Presiones en Pa (N/m^2)
- Densidades en kg/m^3
- Longitudes en m

4. Resolver para la incógnita

- Si conocemos la diferencia de presión, calcular R_m
- Si conocemos R_m , calcular la diferencia de presión

5. Analizar el resultado

- Verificar las unidades
- Comprobar si el resultado es físicamente razonable

3. Decantador por Gravedad

3.1 Principios Físicos

Un decantador por gravedad se utiliza para la separación continua de dos líquidos inmiscibles con diferentes densidades. El principio de funcionamiento se basa en la diferencia de densidades y la acción de la gravedad.

3.2 Funcionamiento

La mezcla de alimentación entra por un extremo del decantador, y los líquidos fluyen lentamente a través del tanque, separándose en dos capas debido a la diferencia de densidades. Los líquidos descargan por líneas de desborde en el extremo opuesto.

3.3 Ecuaciones Fundamentales

La posición de la interfaz líquido-líquido viene dada por:

$$Z_{A1} = \frac{Z_{A2} - Z_T(\rho_B/\rho_A)}{1 - \rho_B/\rho_A}$$

Donde:

- Z_{A1} = altura de la interfaz desde el fondo

- Z_{A2} = altura del brazo de descarga del líquido pesado
- Z_T = profundidad total del líquido ($Z_B + Z_{A1}$)
- ρ_A = densidad del líquido pesado
- ρ_B = densidad del líquido ligero

El tiempo de separación se puede estimar mediante:

$$t = \frac{100\mu}{\rho_A - \rho_B}$$

Donde:

- t = tiempo de separación (h)
- μ = viscosidad de la fase continua (cP)
- ρ_A y ρ_B = densidades de los líquidos (kg/m³)

3.4 Metodología de Resolución de Problemas

1. Identificar las propiedades de los fluidos

- Densidades de ambos líquidos
- Viscosidad de la fase continua

2. Determinar los parámetros geométricos

- Dimensiones del tanque
- Alturas de las líneas de descarga

3. Calcular la posición de la interfaz

- Utilizar la ecuación 2.14: $Z_{A1} = \frac{Z_{A2} - Z_T(\rho_B/\rho_A)}{1 - \rho_B/\rho_A}$

4. Estimar el tiempo de separación

- Utilizar la ecuación 2.15: $t = \frac{100\mu}{\rho_A - \rho_B}$

5. Dimensionar el decantador

- El volumen debe ser suficiente para contener el fluido durante el tiempo de separación
- La longitud suele ser 5 veces el diámetro para tanques horizontales

4. Decantador Centrífugo

4.1 Principios Físicos

Un decantador centrífugo se utiliza cuando la diferencia de densidades entre los líquidos es pequeña. Aplica fuerza centrífuga para acelerar la separación.

4.2 Funcionamiento

El decantador consiste en un recipiente cilíndrico que gira a alta velocidad. El líquido pesado forma una capa cerca de la pared, mientras que el líquido ligero forma una capa interior. La interfaz entre ambos es una superficie cilíndrica de radio r_i (zona neutra).

4.3 Ecuaciones Fundamentales

La posición de la zona neutra (interfaz líquido-líquido) viene dada por:

$$r_i = \sqrt{\frac{r_A^2 - (\rho_B/\rho_A)r_B^2}{1 - \rho_B/\rho_A}}$$

Donde:

- r_i = radio de la interfaz (zona neutra)
- r_A = radio de descarga del líquido pesado
- r_B = radio de descarga del líquido ligero
- ρ_A = densidad del líquido pesado
- ρ_B = densidad del líquido ligero

La caída de presión en un fluido rotatorio es:

$$p_2 - p_1 = \frac{\omega^2 \rho (r_2^2 - r_1^2)}{2}$$

Donde:

- ω = velocidad angular (rad/s)
- ρ = densidad del fluido
- r_1 y r_2 = distancias radiales

4.4 Metodología de Resolución de Problemas

1. Identificar las propiedades de los fluidos

- Densidades de ambos líquidos
- Viscosidad de la fase continua

2. Determinar los parámetros operativos

- Velocidad de rotación (rpm o rad/s)
- Radios de descarga de ambos líquidos

3. Calcular la posición de la interfaz

- Utilizar la ecuación 2.17: $r_i = \sqrt{\frac{r_A^2 - (\rho_B/\rho_A)r_B^2}{1 - \rho_B/\rho_A}}$

4. Analizar la estabilidad

- La diferencia entre densidades debe ser al menos del 3% para garantizar estabilidad
- Ajustar los radios de descarga para optimizar la separación

5. Ejemplos Resueltos

Ejemplo 1: Manómetro de Tubo en U

Problema:

Un manómetro sencillo de tubo en U se instala a través de un medidor de orificio. El manómetro se llena con mercurio (densidad 13.590 kg/m^3) y el líquido situado por encima del mercurio es tetracloruro de carbono (densidad 1.600 kg/m^3). La lectura del manómetro es de 200 mm. ¿Cuál es la diferencia de presión expresada en newtons por metro cuadrado?

Solución:

1. Identificar los datos:

- Fluido A: Mercurio, $\rho_A = 13,590 \text{ kg/m}^3$
- Fluido B: Tetracloruro de carbono, $\rho_B = 1,600 \text{ kg/m}^3$
- Lectura del manómetro: $R_m = 200 \text{ mm} = 0,2 \text{ m}$

2. Aplicar la ecuación del manómetro:

$$p_a - p_b = gR_m(\rho_A - \rho_B)$$

3. Sustituir los valores:

$$p_a - p_b = 9,81 \times 0,2 \times (13,590 - 1,600)$$

$$p_a - p_b = 9,81 \times 0,2 \times 11,990$$

$$p_a - p_b = 23,524,38 \text{ Pa} \approx 23.524 \text{ N/m}^2$$

Ejemplo 2: Decantador por Gravedad

Problema:

Un decantador continuo cilíndrico horizontal separa 1.500 bbl/d (9,93 m³/h) de una fracción líquida de petróleo a partir de un volumen igual de un ácido de lavado. El petróleo es la fase continua y a la temperatura operacional tiene una viscosidad de 1,1 cP y una densidad de 865 kg/m³. La densidad del ácido es 1.153 kg/m³. Calcular: a) el tamaño del tanque y b) la altura de desborde del ácido por encima del fondo del tanque.

Solución:

1. Calcular el tiempo de separación:

$$t = \frac{100\mu}{\rho_A - \rho_B} = \frac{100 \times 1,1}{1,153 - 865} = \frac{110}{288} = 0,382 \text{ h} \approx 23 \text{ min}$$

2. Calcular el flujo:

$$\text{Cada corriente: } 1.500 \text{ bbl/d} = 1.500 \times 42 \text{ gal/bbl} = 63.000 \text{ gal/d}$$

$$\text{Flujo por minuto: } \frac{63.000}{24 \times 60} = 43,8 \text{ gal/min}$$

3. Volumen total requerido:

$$V = 2 \times 43,8 \times 23 = 2,014 \text{ gal}$$

$$\text{Considerando un factor de seguridad del 95 \%: } V = \frac{2,014}{0,95} = 2,120 \text{ gal} \\ \approx 8,03 \text{ m}^3$$

4. Dimensionar el tanque:

- Para un tanque horizontal: longitud $\approx 5 \times$ diámetro
- Diámetro: 4 ft (1,22 m)
- Longitud: 22 ft (6,70 m)
- Volumen: 2.124 gal

5. Calcular la profundidad del líquido:

- Profundidad total: $Z_T = 0,9 \times 4 = 3,6 \text{ ft}$

- Interfaz: $Z_{A1} = 1,8$ ft (mitad del tanque)

6. Calcular la altura de desborde:

$$Z_{A2} = Z_{A1} + (Z_T - Z_{A1}) \frac{\rho_B}{\rho_A} = 1,8 + (3,6 - 1,8) \frac{865}{1,153} = 1,8 + 1,8 \times 0,75 = 3,15 \text{ ft (0,96 m)}$$

Ejemplo 3: Decantador Centrífugo

Problema:

Una centrífuga con DI (diámetro interior) de 250 mm gira a 4.000 r/min. Contiene una capa de anilina de 50 mm de espesor. La densidad de la anilina es de 1.102 kg/m^3 y la presión en la superficie del líquido es la atmosférica. ¿Qué presión manométrica actúa sobre la pared de la centrífuga?

Solución:

1. Convertir velocidad angular:

$$\omega = \frac{2\pi \times 4,000}{60} = \frac{8,000\pi}{60} = 418,9 \text{ rad/s}$$

2. Calcular los radios:

- Radio interno: $r_1 = \frac{250 - 2 \times 50}{2} = 75 \text{ mm} = 0,075 \text{ m}$

- Radio externo: $r_2 = \frac{250}{2} = 125 \text{ mm} = 0,125 \text{ m}$

3. Aplicar la ecuación de caída de presión:

$$p_2 - p_1 = \frac{\omega^2 \rho (r_2^2 - r_1^2)}{2}$$

4. Sustituir valores:

$$p_2 - p_1 = \frac{418,9^2 \times 1,102 \times (0,125^2 - 0,075^2)}{2}$$

$$p_2 - p_1 = \frac{418,9^2 \times 1,102 \times 0,0094}{2}$$

$$p_2 - p_1 = \frac{175,503 \times 0,0094}{2} = 824,9 \text{ kPa}$$

5. Por tanto, la presión manométrica en la pared es de aproximadamente 825 kPa.

6. Problemas Propuestos

Problema 1

Un manómetro sencillo de tubo en U se instala a través de un medidor de orificio. El manómetro se llena con mercurio (gravedad específica de 13,6), y

el líquido situado por encima del mercurio es tetracloruro de carbono (gravedad específica de 1,6). La lectura del manómetro es de 200 mm. ¿Cuál es la diferencia de presión en el manómetro expresada en newtons por metro cuadrado?

Problema 2

La temperatura de la atmósfera terrestre disminuye aproximadamente 5°C por cada 1.000 m de altura sobre la superficie terrestre. Si la temperatura del aire al nivel del suelo es de 15°C y la presión es de 760 mm Hg, ¿a qué altura será la presión de 380 mm Hg? Suponga que el aire se comporta como un gas ideal.

Problema 3

Un decantador de gravedad continuo por gravedad separa clorobenceno, con una densidad de 1.109 kg/m^3 , de un líquido acuoso de lavado que tiene una densidad de 1.020 kg/m^3 . Si la altura total del separador es de 1 m y la interfase ha de estar a 0,6 m del fondo del tanque:

- ¿cuál sería la altura (o en el conducto de desborde) del líquido pesado?
- ¿cuánto afectaría a la posición de la interfase un error de 50 mm en esta altura?

Problema 4

Los líquidos descritos en el problema 3 se separan en una centrífuga tubular con un diámetro interior de 150 mm que gira a 8.000 r/min. La superficie libre del líquido dentro del recipiente está a 40 mm del eje de rotación. ¿Cuál será la distancia radial desde el eje de rotación hasta la parte superior de la zona de derrame del líquido pesado?

7. Consideraciones Adicionales

Eficiencia en Decantadores

La eficiencia de un decantador depende de varios factores:

- Diferencia de densidades entre los líquidos
- Viscosidad de la fase continua
- Tiempo de residencia

- Ausencia de turbulencia
- Limpieza de la interfaz

Para mejorar la eficiencia:

- Asegurar un flujo laminar
- Utilizar deflectores para reducir turbulencias
- Mantener temperaturas adecuadas para reducir viscosidad
- Eliminar contaminantes que puedan formar emulsiones

Selección entre Decantador Gravitacional y Centrífugo

- **Usar decantador gravitacional cuando:**
 - La diferencia de densidades es superior al 10 %
 - Los volúmenes a tratar son grandes
 - El costo operativo debe ser bajo
 - El espacio disponible no es limitante
- **Usar decantador centrífugo cuando:**
 - La diferencia de densidades es inferior al 10 %
 - Se requiere separación rápida
 - El espacio es limitado
 - Las partículas son muy pequeñas o tienen densidades similares

8. Nomenclatura

- p_a, p_b = presiones en los extremos del manómetro (Pa)
- g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)
- R_m = lectura del manómetro (m)
- R_l = lectura del manómetro inclinado (m)
- ρ_A, ρ_B = densidades de los fluidos (kg/m³)

- α = ángulo de inclinación del manómetro ($^{\circ}$)
- Z_{A1} = altura de la interfaz líquido-líquido (m)
- Z_{A2} = altura del conducto de desborde del líquido pesado (m)
- Z_B = altura de la capa del líquido ligero (m)
- Z_T = altura total del líquido en el tanque (m)
- t = tiempo de separación (h)
- μ = viscosidad de la fase continua (cP)
- ω = velocidad angular (rad/s)
- r_i = radio de la interfaz líquido-líquido (m)
- r_A = radio de descarga del líquido pesado (m)
- r_B = radio de descarga del líquido ligero (m)