Escoamentos Multifásicos

(FEN03711)

Gustavo Rabello Anjos

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
gustavo.anjos@uerj.br

1o. período, 2015

Tópicos da aula

- Definição de perda de carga estática, dinâmica e de fricção em escoamentos bifásicos;
- Método homogêneo para perda de carga em escoamentos multifásicos;
- Método de separação de escoamentos para perda de carga em escoamentos multifásicos;
- Perda de carga em escoamentos multifásicos para conjunto de tubos;
- Recomendações no uso de métodos para perda de carga.

Definição

Uma boa previsão da perda de carga em escoamentos bifásicos é de extrema importância para o projeto e otimização de sistemas de refrigeração, bombas de calor e ar-condicionado.

Como exemplo, pode-se citar o caso de expansões em evaporadores. Nestes evaporadores, a perda de carga em escoamentos bifásicos apresenta valores aceitáveis em projetos de engenharia quando equivale a uma perda líquida máxima de 1,4C na temperatura de saturação do fluido quando medidos do início ao final do tubo. No entanto, os estudos mais recentes de previsão de perda de carga diferem de até 100% relativamente.

Se um evaporador é projetado incorretamente com 50% da perda de carga bifásica real, a eficiência do evaporador será prejudicada, uma vez que a queda da temperatura de saturação real será maior que a prevista pelo projeto. No outro extremo, caso o evaporado seja projetado com uma perda de carga 100% maior que a perda de carga real do sistema, então o evaporador poderia ser projetado com um comprimento de tubo menor e, como conseqüência imediata, uma unidade mais compacta poderia ser utilizada.

$$\Delta p_{total} = \Delta p_{estatica} + \Delta p_{dinamica} + \Delta p_{atrito}$$

- a variação de pressão total Δp_{total} é igual a soma da variação de pressão estática $\Delta p_{estatica}$, da variação de pressão dinâmica $\Delta p_{dinamica}$ e da variação de pressão causada pelo atrito Δp_{atrito}.

Modelo de escoamento homogêneo

(*Homogeneous Flow Model*)

O fluido homogêneo é um conceito conveniente de modelagem de perda de carga em escoamentos bifásicos. Este consiste em considerar o sistema bifásico como um fluido monofásico caracterizado por uma conveniente média das propriedades das fases líquida e vapor. A perda de carga total é devida à variação das energias cinética, potencial e devidas ao atrito nas paredes dos canais.

$$\Delta p_{total} = \Delta p_{estatica} + \Delta p_{dinamica} + \Delta p_{atrito}$$

A perda de carga estática $\Delta p_{estatica}$ para um fluido bifásico homogêneo é:

$$\Delta p_{estatica} = \rho_H g sen\theta H$$

Onde H é a altura vertical, θ é o ângulo relativo ao eixo horizontal. A densidade homogênea ρ_H é definida como:

Modelo de escoamento homogêneo

(*Homogeneous Flow Model*)

$$\rho_H = \rho_L(1 - \epsilon_H) + \rho_G \epsilon_H$$

Onde ρ_L e ρ_G representam a densidade da fase líquida e gasosa respectivamente. Finalmente, o fração de vazios homogênea ϵ_H é definido como:

$$\epsilon_H = \frac{1}{1 + \left(\frac{u_G}{u_L}\frac{(1-x)}{x}\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)}$$

Onde u_L/u_G representa a razão de velocidades das fases líquida e gasosa, sendo equivalente a 1.0 para escoamentos homogêneos.

Modelo de escoamento homogêneo

(*Homogeneous Flow Model*)

A perda de carga dinâmica $\Delta p_{dinamica}$ é obtida através da soma dos gradientes de pressão dinâmica por unidade de comprimento do tubo que é dado por:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{dinamica} = \frac{d(\dot{m}_{total}^2/\rho_H)}{dz}$$

Onde $\dot{m}_{total}$ é o fluxo de massa total atravessando a área do tubo e dada pela relação:

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_L + \dot{m}_G = \frac{\rho_L V A_L + \rho_G V A_G}{A} = \frac{[kg]}{[m^2][s]}$$

onde A representa a área do tubo e V a velocidade do escoamento.

Modelo de escoamento homogêneo

(*Homogeneous Flow Model*)

A perda de carga de atrito Δp_{atrito} é obtida através do coeficiente de atrito bifásico.

$$\Delta p_{atrito} = \frac{2 f_{bf} L \dot{m}_{total}^2}{d_i \rho_H}$$

Onde $\dot{m}_{total}$ é o fluxo de massa total atravessando a área do tubo, L é o comprimento do tubo, d_i é o diâmetro interno do tubo e ρ_H é a densidade homogênea. O coeficiente de atrito bifásico e o número de Reynolds são definidos como:

$$f_{bf} = \frac{0.079}{Re^{0,25}}$$

Modelo de escoamento homogêneo

(*Homogeneous Flow Model*)

$$Re = \frac{\dot{m}_{total} d_i}{\mu_{bf}}$$

A viscosidade bifásica μ_{bf} que aparece na definição do número de Reynolds pode ser escolhida como a viscosidade do líquido ou um título de viscosidade média definido pela seguinte expressão:

$$\mu_{bf} = x\mu_G + (1 - x)\mu_L$$

Modelo de escoamento homogêneo

(*Homogeneous Flow Model*)

Exemplo: Usando o modelo de escoamento homogêneo, calcule a perda de carga total para um escoamento vertical ascendente em um tubo com diâmetro interno 10mm e comprimento 2m. O escoamento é adiabático, a vazão mássica é 0,02kg/s (atenção: esta não é a mesma vazão mássica do número de Re!) e o título de vapor é 0,05. O fluido é R-123 com temperatura de saturação Tsat = 3C e pressão de saturação de 0.37 bar, onde as propriedades físicas são: densidade do líquido 1518kg/m^2, densidade do vapor 2,60kg/m^3, viscosidade dinâmica do líquido 0,0005856 kg/ms e viscosidade dinâmica do vapor 0,0000126kg/ms.

Modelo de escoamento homogêneo

(*Homogeneous Flow Model*)

Solução:

- calcular fração de vazios homogênea: $\epsilon_H = 0.9685$
- calcular densidade homogênea: $\rho_H = 50.3 \dfrac{kg}{m^3}$
- calcular viscosidade dinâmica bifásica: $\mu_{bf} = 0.000557 \dfrac{kg}{ms}$
- calcular número de Reynolds: $Re = 4571$
- calcular coeficiente de atrito bifásico: $f_{bf} = 0.00961$
- não há variação de título de vapor ao longo do canal: $\Delta p_{dinamica} = 0$

Modelo de escoamento homogêneo

(*Homogeneous Flow Model*)

Solução:

- calcular perda de carga estática: $$\Delta p_{estatica} = 987\frac{N}{m^2}$$

- calcular perda de carga de atrito: $$\Delta p_{atrito} = 4953\frac{N}{m^2}$$

- calcular

$$\Delta p_{estatica} + \Delta p_{dinamica} + \Delta p_{atrito} = 987 + 0 + 5940\frac{N}{m^2} = 5.94kPa(0.86psi)$$

Modelo de escoamento separado

(*Separeted Flow Model*)

O modelo de escoamento separado consiste na caracterização do sistema bifásico através de 2 correntes separadas de fluido, cada uma escoando em um tubo diferente. A área dos dois tubos é proporcional ao título de vapor. A perda de carga bifásica é descrita por:

$$\Delta p_{total} = \Delta p_{estatica} + \Delta p_{dinamica} + \Delta p_{atrito}$$

A perda de carga estática $\Delta p_{estatica}$ para o modelo de escoamento separado é dado por:

$$\Delta p_{estatica} = \rho_{bf} g sen\theta H$$

Onde H é a altura vertical, θ é o ângulo relativo ao eixo horizontal. A densidade homogênea ρ_{bf} é definida como:

Modelo de escoamento separado

(*Separeted Flow Model*)

$$\rho_{bf} = \rho_L(1-\epsilon) + \rho_G\epsilon$$

Onde ρ_L e ρ_G representam a densidade da fase líquida e gasosa respectivamente. Inúmeras estimativas da fração de vazios ϵ são encontradas na literatura, sendo a de Steiner (1993) dada por:

$$\epsilon = \frac{x}{\rho_G}\left[(1+0.12(1-x))\left(\frac{x}{\rho_G}+\frac{1-x}{\rho_L}\right)+\frac{1.18(1-x)[g\sigma(\rho_L-\rho_G)]^{0.25}}{\dot{m}_{total}^2\rho_L^{0.5}}\right)\right]^{-1}$$

Quando $\epsilon > 0.1$, o modelo de Rouhani e Axelsson (1970) pode ser usado:

$$\epsilon = \frac{x}{\rho_G}\left[\left[1+0.12(1-x)\left(\frac{gd_i\rho_L^2}{\dot{m}_{total}^2}\right)^{0.25}\right]\left(\frac{x}{\rho_G}+\frac{1-x}{\rho_L}\right)+\frac{1.18(1-x)[g\sigma(\rho_L-\rho_G)]^{0.25}}{\dot{m}_{total}\rho_L^{0.5}}\right)\right]^{-1}$$

Modelo de escoamento separado

(*Separeted Flow Model*)

A perda de carga dinâmica $\Delta p_{dinamica}$ é obtida através da relação entre o título de vapor x e a fração de vazios ϵ :

$$\Delta p_{dinamica} = \dot{m}^2_{total}\left\{\left[\frac{(1-x)^2}{\rho_L(1-\epsilon)}+\frac{x^2}{\rho_G\epsilon}\right]_{saida}-\left[\frac{(1-x)^2}{\rho_L(1-\epsilon)}+\frac{x^2}{\rho_G\epsilon}\right]_{entrada}\right\}$$

Onde $\dot{m}_{total}$ é o fluxo de massa total atravessando a área do tubo e dada pela relação:

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_L + \dot{m}_G = \frac{\rho_L V A_L + \rho_G V A_G}{A} = \frac{[kg]}{[m^2][s]}$$

onde A representa a área do tubo e V a velocidade do escoamento.

Modelo de escoamento separado

(*Separeted Flow Model*)

A perda de carga de atrito Δp_{atrito} é obtida através do uso de correlações, onde a de Lockhart e Martinelli (1949) foi a pioneira. Logo depois diversas correlações ganharam notoriedade na literatura de perda de carga em escoamentos bifásicos. É importante notar que a velocidade em cada fase é considerada constante nas correlações de perda de carga de atrito. Serão apresentadas as principais correlações utilizadas na literatura em ordem cronológica:

- Lockhart e Martinelli (1949)
- Grönnerud (1972)
- Müller-Steinhagen e Heck (1986)
- Friedel (1979)

Correlação para perda de carga de atrito Lockhart-Martinelli (1949)

$$\Delta p_{atrito} = \Delta p_L \Phi^2_{atrito} \qquad \Delta p_{atrito} = \Delta p_G \Phi^2_{atrito}$$

$$\Delta p_G = 4 f_G (L/d_i) x^2 \dot{m}^2_{total} (1/2\rho_G)$$

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{x} + \frac{1}{x^2}, \text{ para } Re_L > 4000$$

$$\Phi_G^2 = 1 + Cx + x^2, \text{ para } Re_L < 4000$$

Correlação para perda de carga de atrito Lockhart-Martinelli (1949)

$$x = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_L}{\mu_G}\right)^{0.1}$$

líquido	gás	C
turbulento	turbulento	20
laminar	turbulento	12
turbulento	laminar	10
laminar	laminar	5

Correlação para perda de carga de atrito Grönnerud (1972)

$$\Delta p_{atrito} = \Delta p_L \Phi^2_{atrito}$$

$$\Phi_{atrito} = 1 + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{Fr} \left[\frac{\left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)}{\left(\frac{\mu_L}{\mu_G}\right)^{0.25}} - 1 \right]$$

Correlação para perda de carga de atrito Grönnerud (1972)

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{Fr} = f_{Fr}\left[x + 4\left(x^{1.8} - x^{10} f_{Fr}^{0.5}\right)\right]$$

$$f_{Fr} = Fr_L^{0.3} + 0.0055\left(ln\frac{1}{Fr_L}\right)^2$$

$$Fr_L = \frac{\dot{m}_{total}^2}{g d_i \rho_L^2}$$

Correlação para perda de carga de atrito Müller-Steinhagen e Heck (1986)

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{atrito} = G(1-x)^{1/3} + Bx^3$$

$$G = A + 2(B-A)x$$

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{L} = f_L \frac{2\dot{m}_{total}^2}{d_i \rho_L} \qquad \left(\frac{dp}{dz}\right)_{L} = f_L \frac{2\dot{m}_{total}^2}{d_i \rho_G}$$

$$f = \frac{16}{Re}$$

Correlação para perda de carga de atrito Friedel (1979)

$$Fr_H = \frac{\dot{m}^2_{total}}{g d_i \rho^2_H}$$

$$E = (1-x)^2 + x^2 \frac{\rho_L f_G}{\rho_G f_L}$$

$$F = x^{0.78}(1-x)^{0.224}$$

Correlação para perda de carga de atrito Friedel (1979)

$$H = \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0.91} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0.19} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0.7}$$

$$We_L = \frac{\dot{m}_{total}^2 d_i}{\sigma \rho_H}$$

$$\rho_H = \left(\frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L}\right)^{-1}$$

Recomendações em perda de carga

- quando $(\mu_L/\mu_G) < 1000$ e velocidades mássicas menores que 2000 kg/m^2s, a correlação de Friedel (1979);

- quando $(\mu_L/\mu_G) > 1000$ e velocidades mássicas maiores que 100 kg/m^2s, a correlação de Chisolm (1973).

- quando $(\mu_L/\mu_G) > 1000$ e velocidades mássicas menores que 100 kg/m^2s, a correlação de Lockhart e Martinelli (1949).

- para a maioria dos fluidos, $(\mu_L/\mu_G) < 1000$ e a correlação de Friedel será o método usual para escoamentos em tubos e duros.