

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO HORIZONTAL NO PADRÃO INTERMITENTE

AUTORES:

Ivan Noville¹, Antonio C. Bannwart² e Tatiana M. R. Costa³

INSTITUIÇÃO:

^{1 e 2} - Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) ³ – Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras)

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO HORIZONTAL NO PADRÃO INTERMITENTE

Abstract

The development of an experimental apparatus to estimate the convective heat transfer in horizontal gas-liquid intermittent-or slug-flow is presented. The experimental heat transfer data were compared with some models from the literature. This experimental apparatus consists in a 6 m long, 0,052 m ID copper pipe. The empirical data of superficial velocities for air/water flows ranged from 0,58 to 1,05 m/s for the water and from 0,22 to 0,80 m/s for the air. The superficial Reynolds number ranged from 46566 to 81615 for the water and from 888 to 3384 for the air. Finally, the experimental data showed good agreement with well-known models.

Introdução

O escoamento multifásico ocorre quando uma mistura de duas ou mais fases (sólido, líquido ou gás), as quais não se encontram totalmente diluídas, escoam simultaneamente numa dada geometria. Este escoamento pode ser encontrado em diversos ramos de atividade industrial. No caso particular da indústria de extração de petróleo, este escoamento se dá desde a coluna do poço até a estação coletora onde as fases estão separadas. Tradicionalmente nesta indústria, quando se refere ao escoamento multifásico (água, óleo e gás), muitas vezes é suficiente considerar apenas duas fases escoando (escoamento bifásico), onde uma das fases é gasosa e a outra líquida.

A produção dos campos de petróleo no mar faz com que gás e fases líquidas sejam transportados por longas distâncias antes de serem separados. Deste modo, o escoamento bifásico do poço à plataforma, ou diretamente a terra consiste em uma variável importante na produção; sendo assim, seu estudo é de extrema importância para o planejamento estratégico da produção e para o projeto dos equipamentos envolvidos na mesma. Isto porque, ao longo do caminho entre o poço e a plataforma, as fases podem se arranjar em diversas configurações na tubulação, passando de um padrão de escoamento para outro, ou seja, poderá haver uma sucessão de padrões.

Cada padrão tem influência direta sobre parâmetros importantes na previsão de um escoamento tais como a perda de carga e a transferência de calor com o ambiente. Por isso, o conhecimento do padrão de escoamento existente é fundamental nos cálculos relacionados ao escoamento bifásico. Dentre os diversos padrões de escoamento bifásico possíveis, o padrão de escoamento intermitente destaca-se por ser muito comum na indústria de extração de petróleo.

A produção marítima de petróleo, sobretudo a produção sob águas profundas tem colocado em pauta a necessidade de maiores estudos na área de transferência de calor de escoamentos bifásicos em dutos. Nos dutos submarinos utilizados para produção dos campos de petróleo no mar, o controle da transferência de calor do fluido para o ambiente externo pode ser um fator determinante para o escoamento da produção de petróleo. No caso de produção em águas profundas, o petróleo aquecido, vindo do reservatório, perde calor para a água do mar gelada. Tal resfriamento pode provocar fenômenos indesejados para o escoamento, tais como: aumento de viscosidade, cristalização de parafinas e formação de hidratos.

Tornou-se então necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para tornar viável a produção dos campos de petróleo no mar. O isolamento térmico do duto é a tecnologia mais utilizada para controlar as perdas relacionadas à transferência de calor durante a operação em regime permanente, e dessa forma prevenir a formação de hidratos e parafinas. Outras tecnologias também vêm sendo desenvolvidas para esta finalidade, como o aquecimento elétrico no trecho horizontal do duto submarino.

Como as tecnologias utilizadas para controlar as perdas relacionadas à transferência de calor têm um custo bastante elevado, caso elas sejam utilizadas é necessário ter uma estimativa precisa da transferência de calor que ocorre durante o escoamento bifásico para que com isso possa ser feito um dimensionamento mais correto das reais necessidades. O adequado projeto de uma linha isolada ou aquecida requer o conhecimento do coeficiente de transferência de calor convectiva da mistura bifásica no interior da linha.

Este trabalho tem por finalidade a medição do coeficiente transferência de calor bifásico gás-líquido horizontal no padrão de escoamento intermitente. Para alcançar este objetivo, foi construído um aparato experimental para medir a taxa de transferência de calor do fluido interno, quente, com o fluido externo e, a partir da diferença média de temperatura entre o fluido quente e a parede da tubulação, determinar o coeficiente de transferência de calor para cada elenco de condições de operação.

Os resultados para o coeficiente de transferência de calor serão comparados com modelos propostos na literatura para transferência de calor por convecção, de forma a conhecer melhor este fenômeno no escoamento intermitente horizontal, o qual, conforme comentado anteriormente é de fundamental importância para a indústria de petróleo.

Metodologia

Neste trabalho foi projetado e construído um aparato experimental no Labpetro da UNICAMP para serem realizados os testes. Este aparato experimental tem como objetivo tentar reproduzir as condições de transferência de calor entre o ambiente gelado do fundo do mar, que envolve os dutos submarinos horizontais, e o petróleo quente proveniente do reservatório, que escoar por dentro dos dutos submarinos.

Na Figura 2 está apresentado esquematicamente o aparato experimental, que consiste basicamente de um circuito fechado, de aproximadamente 0,052 m de diâmetro interno, para que circule a mistura bifásica aquecida (água e ar) em regime de fluxo permanente e um circuito, também fechado, de água gelada para trocar calor com a mistura aquecida. O aparato foi dividido nos sistemas apresentados na figura abaixo.

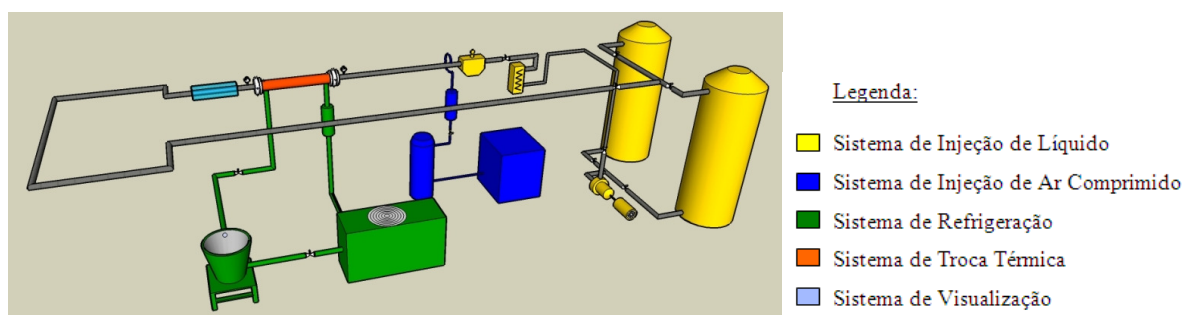


Figura 2. Esquema do aparato experimental.

O sistema de injeção de líquido é responsável por armazenar, bombear e aquecer o líquido. A água é bombeada dos tanques por uma bomba e passa por um sistema de aquecimento do líquido para garantir a entrada deste na seção de teste sempre a uma temperatura constante acima de 303,15K. O aquecimento do líquido a esta temperatura tem a função de garantir uma boa troca térmica na seção de transferência de calor. O medidor de vazão de líquido mede a vazão mássica do líquido aquecido presente no sistema.

O sistema de injeção de ar comprimido é utilizado para injetar ar na tubulação de líquido com a finalidade de criar o padrão de escoamento intermitente. Um medidor de vazão de ar foi instalado para monitorar e controlar a vazão de ar. Foi também instalado um computador de vazão que recebe todas as informações dos sensores de pressão e temperatura instalados próximo ao medidor de vazão e retorna com o valor de vazão mássica de gás. Há um trecho de aproximadamente 18 m entre o ponto de injeção de ar e o sistema de troca térmica de forma a garantir o desenvolvimento do padrão de escoamento intermitente.

O sistema de refrigeração tem o objetivo de injetar água gelada no sistema de troca térmica para resfriar o escoamento bifásico em estudo. O *chiller* resfria e bombeia água gelada. No sistema de troca térmica a água gelada irá trocar calor com o escoamento bifásico previamente aquecido pelo sistema de injeção de líquido.

O sistema de troca térmica é o principal sistema de todo aparato experimental. É neste sistema que ocorrerá a troca térmica entre o escoamento bifásico aquecido e a água gelada. O seu objetivo é simular a transferência de calor com elevados gradientes de temperatura como ocorre no fundo do mar durante a produção do petróleo quente no interior do duto submarino com a água do mar gelada ao redor deste duto. Para a obtenção de um elevado gradiente de temperatura na entrada do sistema de troca térmica, optou-se por utilizar uma seção de troca térmica coaxial de correntes paralelas (co-corrente). Neste sistema serão obtidas as temperaturas em 2 diferentes pontos do escoamento bifásico e da água gelada (nos flanges de entrada e saída do sistema de troca térmica). Estas temperaturas são de fundamental importância para o cálculo do coeficiente de transferência de calor, h_{TP} , experimental.

O sistema de troca térmica é constituído basicamente por uma tubulação de cobre com 0,052 m de diâmetro interno, composta por 2 tubos de cobre conectados através de 1 luva de bronze, totalizando 6,071 m de comprimento, por onde escoam a mistura de líquido e gás, e uma tubulação de PVC externamente a tubulação de cobre (que forma o espaço anular), por onde escoam a água gelada. Esta água entra no interior do sistema através de um bocal direcionado para a parte externa da tubulação de cobre, conforme mostra a Figura 3. A tubulação de cobre foi utilizada no experimento por apresentar uma elevada condutividade térmica, sendo, portanto, a convecção, a transferência de calor dominante neste sistema

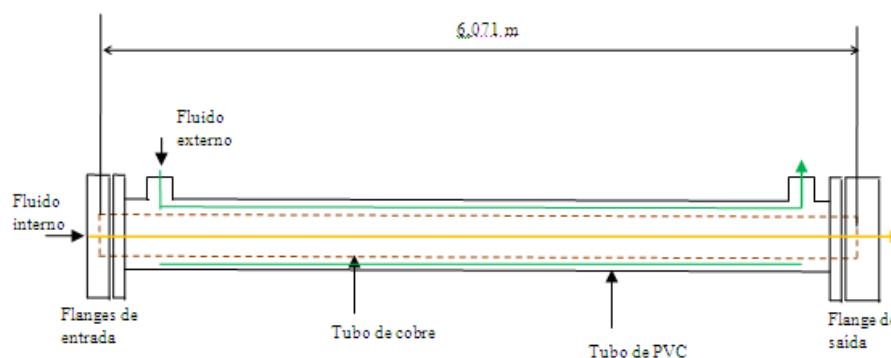


Figura 3. Esquemático da seção de troca térmica.

Para medir as temperaturas do sistema foram utilizados 10 termopares do tipo J. Estes termopares estão localizados nos flanges de entrada e saída da seção de troca térmica, conforme mostrado na Figura 4. Estes 5 termopares nos flanges de entrada e de saída têm as seguintes funções: 3 em contato com a parede da tubulação de cobre, 1 em contato com fluido bifásico (interior da tubulação de cobre) e 1 em contato com o fluido externo (anular entre a tubulação de cobre e de PVC).

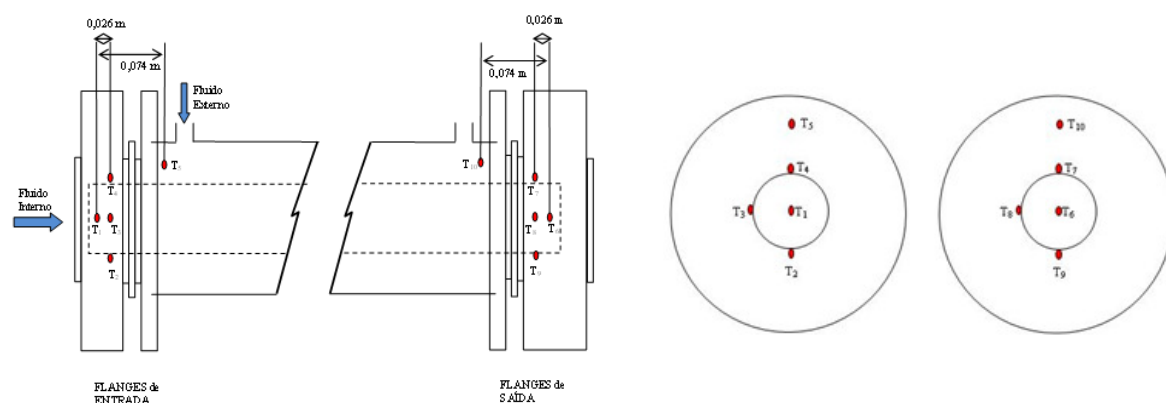


Figura 4. Vista lateral e transversal da localização dos termopares.

O sistema de aquisição de dados realiza a aquisição dos sinais lidos pelos sensores que medem o diferencial de pressão no sistema de troca térmica (DP_{TT}), a pressão na entrada do sistema de troca térmica (P_{TT}), a vazão mássica de líquido (m_L), a vazão mássica de gás (m_G), a vazão volumétrica de água gelada (Q_{AG}) e também os sinais dos termopares instalados no sistema de troca térmica (T_1 a T_{10}). O aplicativo utilizado para fazer a leitura do sistema de aquisição de dados foi o LABVIEW Signal Express. Para cada teste era tirada uma média de 500 amostras obtidas de cada um dos sensores por um período de 10 segundos.

O sistema de visualização tem o objetivo de obter e gravar as imagens geradas no escoamento para com isso poder obter algumas características hidrodinâmicas do escoamento e poder compará-las com os valores obtidos com os modelos utilizados.

De forma a atingir o regime permanente da transferência de calor entre os fluidos interno e externo, cada teste durava pelo menos 7200 segundos (2 horas). O líquido utilizado em cada teste foi a água. Antes de cada teste com escoamento bifásico foi realizado um teste monofásico que tinha o objetivo de validar as medidas realizadas pelos instrumentos do aparato experimental comparando os valores obtidos com a correlação proposta por Sieder e Tate (1936). Esta correlação é aplicável tanto em condições de temperatura da superfície constante quanto de fluxo de calor constante.

Durante os testes monofásicos e bifásicos foram medidas as temperaturas durante a passagem da água gelada na seção de troca térmica e calculada a transferência de calor experimental para poder comparar com o valor estimado pela correlação de Sieder e Tate (1936) para os testes monofásicos e algumas correlações da literatura para os testes bifásicos.

Para os testes realizados, procurou-se manter fixas as condições de temperatura do líquido entre 308 e 318K e as condições de temperatura da água gelada entre 280 e 288K, de forma a se atingir uma diferença entre as temperaturas de entrada e de saída de 5K na seção de troca térmica.

Nos testes preliminares com escoamento monofásico constatou-se que o fluido interno quente na seção de troca térmica perdia mais calor que a quantidade de calor que a quantidade de calor que o fluido externo gelado desta seção ganhava. A razão para este fenômeno foi a posição relativa dos termopares do fluido interno em relação aos termopares do fluido externo. A Figura 4 ilustra como estavam posicionados os termopares. Nesta figura é possível perceber a distância de 0,074 m entre os termopares que medem a temperatura do fluido interno, T_1 na entrada e T_6 na saída da seção de troca térmica, em relação aos termopares que medem a temperatura do fluido externo, T_5 na entrada e T_{10} na saída desta seção.

O procedimento adotado para determinar experimentalmente o coeficiente de transferência de calor monofásicos e bifásico, h_{TP} , foi utilizar a quantidade de calor ganho pelo fluido externo, q_{AG} . Este procedimento se deve ao fato da dificuldade em determinar a taxa de perda de calor devido às diferenças de condutividade térmica entre as fases quando há o escoamento de uma mistura bifásica internamente na seção de troca térmica. Além de ser o mesmo adotado em Camargo (1991), o qual trabalhou com um aparato experimental semelhante.

Com isso, a taxa de transferência de calor da água gelada (q_{AG}) é calculada pela equação 1. Cabe ressaltar que a taxa de transferência de calor proveniente do meio ambiente externo foi considerada desprezível já que a seção de troca térmica encontrava-se dentro do Labpetro, o que evitava o aquecimento por radiação solar, além de ter sido utilizado um excelente isolante térmico ao redor da seção.

$$q_{AG} = m_{AG} \cdot Cp_{AG} \cdot (T_{10} - T_5) \quad (1)$$

Onde m_{AG} se refere a vazão mássica de água gelada, Cp_{AG} a capacidade calorífica da água gelada e os subscritos 10 e 5 se referem a localização dos termopares dada pela Figura 4.

Desta forma foi considerado que a taxa de transferência de calor que ocorre entre a água gelada e a mistura quente que escoar por dentro da tubulação de cobre (q_M) é equivalente a q_{AG} .

A partir de então o h_{TP} experimental pode ser calculado pela equação 2:

$$h_{TP} = \frac{q_M}{A \cdot \Delta T} \quad (2)$$

Onde A é a área da superfície e ΔT é baseado na diferença média logarítmica de temperaturas a partir da equação 3:

$$\Delta T = \frac{(T_6 - \bar{T}_{PS}) - (T_1 - \bar{T}_{PE})}{\ln \frac{(T_6 - \bar{T}_{PS})}{(T_1 - \bar{T}_{PE})}} \quad (3)$$

Onde $\bar{T}_{PE}$ é a temperatura média da parede do tubo de cobre na entrada e $\bar{T}_{PS}$ é a temperatura média da parede na saída. Como as temperaturas foram medidas em diversos pontos da parede da tubulação estas temperaturas foram obtidas pelas equações 4 e 5, respectivamente:

$$\bar{T}_{PS} = \frac{T_7 + 2 \times T_8 + T_9}{4} \quad (4)$$

$$\bar{T}_{PE} = \frac{T_2 + 2 \times T_3 + T_4}{4} \quad (5)$$

Os resultados do h_{TP} obtido experimentalmente foram comparados com os resultados obtidos pelos modelos de Shah (1981), Kago et al. (1986), Camargo (1991), também utilizado em Franca et al. (2008), e Kim e Ghajar (2006). Vale ressaltar que as incertezas experimentais calculadas pelo método proposto por Moffat (1988) não ultrapassaram o percentual de $\pm 20\%$.

Resultados e Discussão

A Figura 6 mostra o gráfico o comportamento típico dos sinais de temperatura, de todos os 10 termopares, em um dos testes realizados durante os 10 segundos em que foram obtidas as 500 amostras de sinais. Pela Figura 6 é possível perceber que as temperaturas se mantiveram constantes durante a aquisição dos sinais.

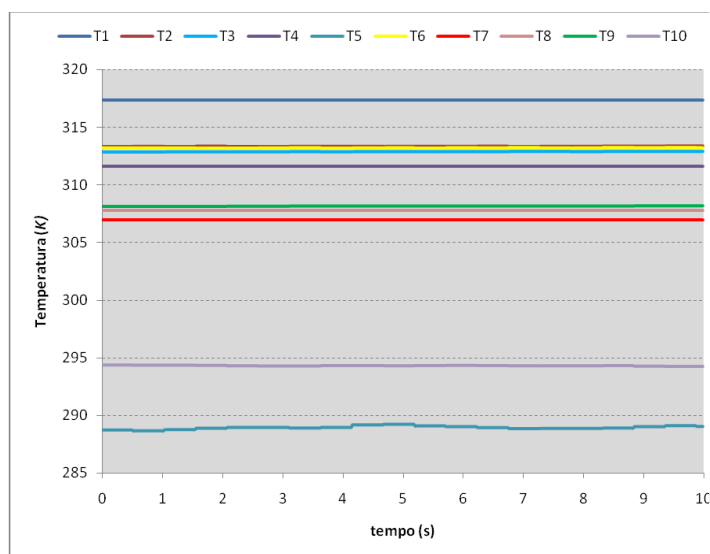


Figura 6. Sinais de temperatura para todos os termopares.

Foram realizados 12 testes experimentais bifásicos onde os valores de vazão mássica velocidade superficial (U), número de Reynolds (Re) e número de Prandtl (Pr) do líquido e do gás variaram de acordo com os valores mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Faixa de valores de alguns parâmetros do experimento.

	m_L (kg/s)	m_G (kg/s)	U_{SL} (m/s)	U_{SG} (m/s)	Re_{SL}	Re_{SG}	Pr_L	Pr_G
Mínimo	1,22	0,0007	0,58	0,22	46566	888	3,92	0,71
Máximo	2,22	0,0027	1,05	0,80	81615	3384	4,13	0,72

A Figura 7 mostra o gráfico comparativo entre os resultados do h_{TP} obtido experimentalmente com os resultados obtidos pelos modelos de Shah (1981), Kago et al. (1986), Camargo (1991) e Kim e Ghajar (2006). A linha pontilhada indica $\pm 30\%$ em relação ao valor experimental.

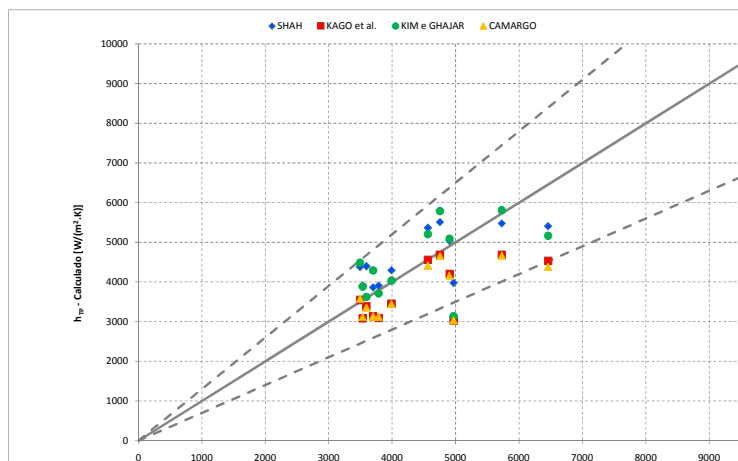


Figura 7. Comparação entre os valores de h_{TP} experimental e calculado pelos modelos.

Pela análise dos resultados é possível observar que para o modelo proposto por Shah (1981) a comparação com os resultados experimentais variou entre +25% e -20%, para o modelo de Kago et al. (1986) esta variação ficou entre +2% e -39%, já para Camargo (1991) +2% e -39% e finalmente para o modelo proposto por Kim e Ghajar (2006) +28% e -37%.

Conclusões

Foi construído um aparato experimental robusto capaz de possibilitar o estudo da transferência de calor por convecção no escoamento bifásico intermitente horizontal. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com alguns modelos propostos na literatura e os valores variaram entre +28% e -39%.

Será necessária a realização de mais testes para validar a faixa de operação do aparato experimental.

Agradecimentos

À equipe do Labpetro da Unicamp coordenada pela engenheira Natache pelo apoio na construção do aparato experimental e à Petrobras pela oportunidade e incentivo na elaboração deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Camargo R. *Hidrodinâmica e Transferência de Calor no Escoamento Intermitente Horizontal*. Campinas: Departamento de Engenharia de Petróleo, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1991. 127p. Dissertação (Mestrado).
- Franca F., Bannwart A., Camargo R., Gonçalves M. *Mechanistic Modeling of the Convective Heat Transfer Coefficient in Gas-Liquid Intermittent Flows*. Heat Transfer Engineering. 2008 Dec ;29(12):984-998.
- Kago T., Saruwatari T., Kashima M., Morooka S., Kato Y. *Heat Transfer in Horizontal Plug and Slug Flow for Gas-Liquid and Gas-Slurry Systems*. Journal of Chemical Engineering of Japan. 1986 ;19(2):125-131.

- Kim D., Ghajar A. *A General Heat Transfer Correlation for Non-Boiling Gas-Liquid Flow with Different Flow Patterns in Horizontal Pipes*. International Journal of Multiphase Flow. 2006 Apr ;32(4):447-465.
- Moffat R. *Describing the Uncertainties in Experimental results*. Experimental Thermal and Fluid Science. 1988 Jan ;1(1):3-17.
- Shah M. *Generalized Prediction of Heat Transfer During Two Component Gas-Liquid Flow in Tubes and other Channels*. AIChE Symposium Series. 1981 ;77(208):140-151.
- Sieder E.N. and Tate G.E. *Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes*. Industrial and Engineering Chemistry. 1936 ;28(12):1429-1435.