ISSN: 2594-6153

Análise Teórica da Transferência de Calor em CSTR Equipado com Jaqueta

Henrique Weiss de Albuquerque Maranhão[1], Dorotéa Villanova Garcia[1], Deovaldo de Moraes Júnior[1,2], Vitor da Silva Rosa[1,2]

[1] Universidade Santa Cecília - Departamento de Engenharia Mecânica, Santos-SP, Brasil
[2] Universidade Santa Cecília - Departamento de Engenharia Química, Santos-SP, Brasil
Email: henrique@rodrinox.com.br

Resumo: O processo de troca de calor entre dois fluidos que estão em diferentes temperaturas e separados por uma parede sólida ocorre em muitas aplicações da engenharia. Os equipamentos usados para implementar esta troca são denominados trocadores de calor, e aplicações específicas podem ser encontradas em aquecimento, resfriamento, condicionamento de ambiente, recuperação de calor e processos químicos. Como aplicações mais comuns deste tipo de equipamento pode-se citar: Aquecedores, resfriadores, condensadores, evaporadores, torres de refrigeração e caldeiras. Normalmente são utilizados reatores tanques com jaqueta (camisa) ou serpentinas tipo meia-cana, onde também demanda uma operação de troca térmica, seja para aquecer ou resfriar o fluido armazenado. A modelagem habitual de reatores exotérmicos baseia-se no modelo clássico do reator tanque de mistura perfeita, "Continuous Stirred Tank Reactor" (CSTR) com dois estados. Nesse modelo, considera-se válida a suposição de que a dinâmica da temperatura da camisa de troca térmica é desprezível, de maneira que sua resposta é possivelmente instantânea. Esse artigo estendeu o modelo clássico do CSTR com dois estados para um modelo de três estados, que considera a dinâmica da camisa de troca térmica. Com base na premissa supracitada, este trabalho objetiva revisar os critérios com superfície de troca térmica por jaqueta com defletor helicoidal (Figura 1), apenas no costado do tanque e por terem disponíveis na literatura equações de projeto. Os cálculos foram baseados em equações e conceitos compreendidos na literatura a fim de analisar métodos mais precisos. Os resultados expostos através de ensaios e comparados com as equações, mostram que o desenho da jaqueta influencia de forma considerável o sistema e aproximou-se bastante do teórico, tornando o estudo amparado.

Palavras chave: Canal retangular. Defletor helicoidal. Escoamento interno. Jaqueta convencional. Transferência de calor.

Heat Transfer Theoretical Analysis in CSTR Equipped with Jacket

Abstract: The process of heat exchange between two fluids that are at different temperatures and separated by a solid wall occurs in many engineering applications. The equipment used to implement this exchange is called heat exchangers, and specific applications can be found in heating, cooling, environmental conditioning, heat recovery and chemical processes. The most common applications of this type of equipment include: Heaters, chillers, condensers, evaporators, cooling towers and boilers. Typically, jacketed tank reactors or half-rod coils are used, which also requires a heat exchange operation, either to heat or cool the stored fluid. The usual modeling of exothermic reactors is based on the classic model of the two-state Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR). In this model, the assumption that the temperature dynamics of the heat exchange jacket is negligible is valid, so that its response is possibly instantaneous. This paper extended the classic two-state CSTR model to a three-state model, which considers the dynamics of the heat exchange jacket. Based on the above premise, this paper aims to review the criteria with a heat exchanger surface by helical baffle jacket (Figure 1), only on the tank side and for having several design equations available in the literature. The calculations were based on equations and concepts understood in the literature in order to

ISSN: 2594-6153

analyze more accurate methods. The results presented through tests and compared with the equations show that the jacket design has a considerable influence on the system and is very close to the theoretical, making the study supported.
Key words: Conventional jacket. Heat transfer. Helical baffle. Internal flow. Rectangular channel

Introdução

A análise térmica consiste na determinação da vazão e temperatura de entrada na camisa em função da área de troca de calor instalada, dadas as condições de escoamento e temperatura média do fluido. O projeto mecânico envolve considerações como pressões, temperaturas de operação e características de corrosão. Finalmente, o projeto de fabricação requer a tradução das características e dimensões físicas em uma unidade que possa ser construída a um baixo custo [1]. Habitualmente possuem formato cilíndrico podendo variar a razão entre o diâmetro e a altura do costado em função da operação unitária a que são sujeitos, podendo possuir quebra-ondas adjacentes ao costado, com a finalidade de evitar a formação de vórtices otimizando a qualidade da mistura [2]. O projeto básico de qualquer tanque com impulsores mecânicos deve contemplar a determinação da potência necessária ao motor elétrico para alcançar as condições do processo [2]. Apresenta-se na figura 3 o coeficiente de troca de calor em função do número de Reynolds (Re). Grande parte das operações citadas necessita de aquecimento e resfriamento, que podem ser conduzidos em batelada ou continuamente através de superfícies de transferência de calor tais como jaquetas, serpentinas helicoidais, serpentinas em espiral e chicanas tubulares verticais [3]. Ainda em relação às superfícies de transmissão de calor, as jaquetas são as mais utilizadas devido à sua facilidade de construção e limpeza, entretanto, são limitadas quanto à transmissão de calor que é predominante na parede do tanque.

O projeto desses tanques citados visa determinar a área de troca térmica requerida para obter a temperatura final dentro do tempo requerido. A determinação desta área está diretamente relacionada a alguns parâmetros como a média logarítmica das diferenças de temperatura entre os fluidos (LMTD), o fluxo de calor (q) e o coeficiente global de troca térmica (U). Sendo este último, um parâmetro que varia em função da geometria da superfície em que a troca térmica ocorrer, da reologia dos fluidos, do número de fases, dos mecanismos de troca térmica envolvida e do regime de escoamento predominante [4]. BONDY, F. e LIPPA, S.(1983) indicaram a equação de Sieder-Tate para jaquetas com defletor helicoidal, válida para Re > 10000 [5].

Objetivo: O presente trabalho teve por objetivo verificar a influência do número de Reynolds e Nulsset em jaqueta com defletor helicoidal no comportamento dinâmico para troca térmica de um reator de mistura.

Material e Métodos

As condições de projeto (Figura 1) foi composta por tanque cilíndrico de aço inox com volume útil de 50 L, com jaqueta contendo um defletor helicoidal no costado com 8 passos, canal retangular com altura de 25 mm e largura de 20 mm, diâmetro médio da jaqueta de 500 mm. Como fluido de processo quente (Meio) e foi utilizado água destilada que percorrerá a parte interna da camisa, com vazões entre 0,3 m³/h até 3,0 m³/h. O fluido frio (Operante), foi utilizado água destilada com temperatura inicial de 30°C e temperatura final desejada de 60°C. Foi empregado impulsor axial em regime turbulento. O tempo desejado para o aquecimento foi de 1200 segundos, com número de Reynolds na jaqueta maior que 10000. A área de troca térmica é de 0,4212 m² e o material do costado é aço inox AISI-316L com espessura de 3,0 mm. O método matemático utilizado, iniciou-se com a determinação da temperatura média do fluido frio (45°C), retira-se na tabela as propriedades físicas do fluido frio e o K_{inox}. Na sequência é calculado a quantidade de calor necessária para aquecer o fluido frio de 30°C até 60°C no tempo de 1200 segundos, a resistência condutiva da parede do tanque e sua variação de temperatura, para identificar a temperatura média do fluido quente. Através da temperatura média do fluido quente que é igual a temperatura da parede do lado da jaqueta, obtêm-se na tabela as propriedades físicas do fluido.

Quadro 1 – Equações empregadas no texto

Nulsset p/ regime laminar	$1{,}86.\left(\frac{Re.Pr.D}{L}\right)^{0{,}3333}.\left(\frac{\rho_t.\vartheta_t}{\rho_{tp}.\vartheta_{tp}}\right)^{0{,}4}$	Adim.
Nulsset p/ regime transitório	$0{,}116.(Re^{0{,}6667}-125).(Pr)^{0{,}3333}.\left[1+\left(\frac{D}{L}\right)^{0{,}6667}\right].\left(\frac{\rho_t.\vartheta_t}{\rho_{tp}.\vartheta_{tp}}\right)^{0{,}1}$	Adim.
Nulsset p/ regime turbulento – aquecimento	$0{,}023.(Re)^{0{,}8}.(Pr)^{0{,}4}$	Adim.
Nulsset p/ regime turbulento – aquecimento - (Dittus – Boelter)	$0{,}0243.(Re)^{0{,}88}.(Pr)^{0{,}4}.\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0{,}14}$	Adim.
Nulsset p/ regime turbulento - resfriamento	$0{,}023(Re)^{0{,}8}.(Pr)^{0{,}3}$	Adim.
Nulsset p/ regime turbulento – resfriamento – (Dittus – Boelter)	$0{,}0265(Re)^{0{,}88}.(Pr)^{0{,}3}.\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0{,}14}$	Adim.
j_j para jaqueta com defletor helicoidal válido para Re > 10000 – (Sieder-Tate)	$h_j=\left(\frac{0{,}027\,.k}{D_e}\right).(Re)^{0{,}8}.(Pr)^{0{,}33}.(\frac{\mu}{\mu_w})^{0{,}14}.\left[1+3{,}5(\frac{D_e}{D_c})\right]$	W/m².°C

Calcula-se o raio hidráulico, o diâmetro equivalente do canal e com vazões do fluido quente variando entre 0,3 m³/h até 3,5 m³/h, a velocidade média do fluido quente, o número de Reynolds, o número de Nulsset, para obter o coeficiente de troca na jaqueta (h_j).

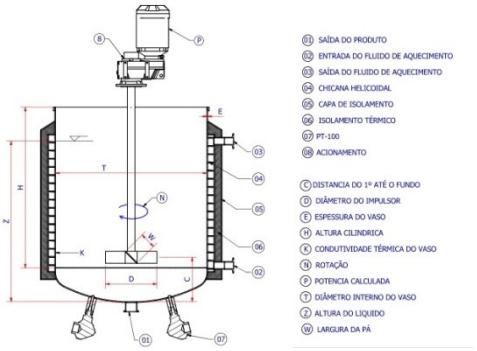

Figura 1 – Desenho do tanque

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos através do Matlab estão apresentados na tabela 1 e figura 2.

Tabela 1 Resultados

Veloc.Média	Nr.Reynolds	Nr.Nulsset	Coef.Troca
0.2222	10331.1121	137.9549	4909.2624
0.2778	12913.8902	167.8873	5974.4380
0.3333	15496.6682	197.1049	7014.1744
0.3889	18079.4463	225.7411	8033.2213
0.4444	20662.2243	253.8888	9034.8853
0.5000	23245.0023	281.6162	10021.5954
0.5556	25827.7804	308.9757	10995.2082
0.6111	28410.5584	336.0082	11957.1870
0.6667	30993.3364	362.7470	12908.7132
0.7222	33576.1145	389.2194	13850.7601
0.7778	36158.8925	415.4483	14784.1421
0.8333	38741.6705	441.4531	15709.5507
0.8889	41324.4486	467.2506	16627.5798
0.9444	43907.2266	492.8552	17538.7447
1.0000	46490.0046	518.2796	18443.4966
1.0556	49072.7827	543.5349	19342.2337
1.1111	51655.5607	568.6312	20235.3096
1.1667	54238.3388	593.5773	21123.0407
1.2222	56821.1168	618.3811	22005.7115
1.2778	59403.8948	643.0501	22883.5792
1.3333	61986.6729	667.5905	23756.8770
1.3889	64569.4509	692.0086	24625.8179
1.4444	67152.2289	716.3097	25490.5968
1.5000	69735.0070	740.4989	26351.3925
1.5556	72317.7850	764.5807	27208.3700
1.6111	74900.5630	788.5596	28061.6817
1.6667	77483.3411	812.4394	28911.4691
1.7222	80066.1191	836.2239	29757.8635
1.7778	82648.8972	859.9165	30600.9872
1.8333	85231.6752	883.5203	31440.9546
1.8889	87814.4532	907.0385	32277.8726
1.9444	90397.2313	930.4738	33111.8416
2.0000	92980.0093	953.8289	33942.9557

Comparando os resultados obtidos da tabela 1, observou-se uma variação do coeficiente de troca de calor de aproximadamente quase 7 vezes maior, obtido entre as relações de vazões. Esses resultados mostram como a técnica consegue prever, para condições estudadas, a importância do número de Reynolds em tanques com jaquetas helicoidais, assim como, com grande exatidão e um erro mínimo entre si, isso provavelmente por conhecermos a área que o fluído irá percorrer. Pode-se observar que o fato da jaqueta ser com defletor helicoidal, criou-se um canal preferencial do fluxo do fluido, fazendo com que a eficiência de troca térmica ficasse maior, diminuindo o tempo de aquecimento. O coeficiente de troca de calor na jaqueta foi um dos fatores mais relevantes no projeto.

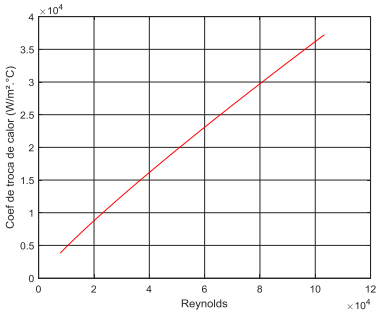

Figura 3 – Influência do número de Reynolds e Nulsset na troca térmica da jaqueta.

Conclusão

Em relação aos métodos, verificou-se que direcionando corretamente o fluxo do fluido quente (Meio), por meio de defletor helicoidal na camisa, é possível calcular a transmissão de calor e correlacionar com a ampliação de escala, mantendo as relações geométricas principais mencionadas nesse trabalho. Em relação a camisa com defletor helicoidal interno, observou-se que os valores do coeficiente de troca térmica foram quase 7 vezes maiores quando comparado com a vazão menor. Isso ocorreu devido ao tipo de regime e por direcionar o fluido de forma uniforme para a parede do tanque.

Referências

1. Ferreira, E. H., Paulino, L., Mota, N. M.; **Método alternativo para cálculo de aquecimento em vasos agitados com serpentina meia-cana.** Dissertação de graduação – Universidade São Francisco – Campinas – SP – 2015;
2. Holman, J. P.; **Transferência de Calor.** Editora McGraw-Hill. São Paulo, p. 185, 1983;
3. Bondy, F.; Lippa, S.; **Heat transfer in agitated vessel.** Chemical Engineering. New York, April 1983;
4. Rosa, V. S. **Transferência de calor e scale-up de tanques com impulsores mecânicos em operação com fluidos não-Newtonianos.** Diss. de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p. 1-3, 2017;
5. Arfelli, S. L. **Projeto mecânico e análise térmica de tanques cilíndricos verticais com agitação e superfície de troca de calor.** Diss. de Mestrado – UNESP – Bauru – SP – 2009.