

DEPOSIÇÃO EM TROCADORES DE CALOR: UMA BREVE REVISÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS

Pedro Henrique Pereira Quaglio¹; Reinaldo Coelho Mirre²; Ana Lucia Barbosa de Souza³; Fernando Luiz Pellegrini Pessoa⁴

¹ Graduando em Engenharia Química; Iniciação Científica (Bolsista) – Cenpes/Petrobras; pedro.quaglio@fbter.org.br

² Engenheiro Químico; Pós-Doutorado (Bolsista) – Cenpes/Petrobras; Salvador-BA; reinaldo.mirre@fbter.org.br

³ Bióloga (Professora Assistente); Centro Universitário SENAI CIMATEC; Salvador-BA; ana.lbs@fieb.org.br

⁴ Engenheiro Químico (Professor Titular); Centro Universitário SENAI CIMATEC; Salvador-BA; fernando.pessoa@fieb.org.br

RESUMO

A deposição de material indesejado em trocadores de calor de baterias de pré-aquecimento de petróleo constitui um dos mais importantes impactos adversos à eficiência operacional destes equipamentos, causando problemas de perda de produção e aumento de custos. Conhecer o comportamento deste processo ao longo do tempo de operação significa controlar melhor sua ocorrência, permitindo o gerenciamento tanto pelo aspecto de projeto quanto operacional. O objetivo deste trabalho é apresentar os principais modelos fenomenológicos de taxa de incrustação para reação química, de modo a viabilizar a seleção de um modelo matemático adequado para representar e avaliar o comportamento deste efeito em trocadores de calor que compõem uma bateria de preaquecimento de petróleo. Pretende-se que os resultados gerados a partir deste estudo permitam a comparação com outros modelos da literatura, utilizando dados reais de uma refinaria de petróleo, a fim de consolidar uma representação matemática adequada para a taxa de deposição em equipamentos térmicos.

PALAVRAS-CHAVE: *Fouling*, Trocador de calor, Limiar de Deposição, *Threshold*.

1. INTRODUÇÃO

A deposição é um efeito decorrente do acúmulo de material indesejado sobre superfícies aquecidas de equipamentos térmicos, especialmente em trocadores de calor da indústria de processos de transformação.¹ O depósito é formado por partículas orgânicas e inorgânicas, microrganismos, macromoléculas e produtos de corrosão, estas que podem se acumular tanto no lado do casco quanto no lado dos tubos, de modo que as resistências de depósito são consideradas para ambos os fluidos.² Como consequência, tem-se o aumento das resistências à transferência de calor (resistência térmica condutiva adicional) e ao escoamento de fluidos (diminuição da área transversal ou do diâmetro interno dos tubos). Assim, este fenômeno afeta o desempenho térmico dos trocadores de calor, resultando em um aumento do consumo de energia, da produção de derivados de petróleo e das emissões de dióxido de carbono.

A deposição comumente é resultado de uma série de processos, como (i) iniciação, (ii) transporte, (iii) adesão (deposição), (iv) remoção, e (v) envelhecimento.³ A classificação dos tipos de deposição é feita a partir do seu efeito predominante: (1) precipitação ou cristalização de sais; (2) sedimentação de material particulado em suspensão no fluido; (3) reações químicas entre componentes do fluido de processo; (4) corrosão; (5) crescimento biológico; solidificação ou congelamento.⁴ No caso das refinarias de petróleo, as redes de trocadores de calor presentes na bateria de preaquecimento da carga são afetadas principalmente pela deposição por reação química, devido às características físico-químicas dos fluidos quente e frio que fomentam a decomposição térmica, que consiste na quebra de macromoléculas em substâncias menores em função das altas temperaturas, favorecendo a precipitação de asfaltenos, o coqueamento, a autoxidação ou a formação de goma insolúvel e polimerização, em decorrência da união de partículas menores, formando, assim, compostos mais pesados que facilitam sua deposição nas paredes do trocador.⁵

O conhecimento sobre os mecanismos de deposição é um fator importante para prever e controlar os seus impactos nos equipamentos e na produtividade de plantas industriais. Na literatura, existem modelos matemáticos semi-empíricos que permitem prever a taxa de deposição. Grande parte está voltada para a previsão de mecanismos de reação química, os quais se baseiam na equação de Arrhenius e tentam representar o efeito da velocidade de escoamento do fluido e a capacidade de remoção do depósito formado. A partir do perfil de deposição em um dado equipamento (resistência de depósito) sob condições operacionais e variações de características dos fluidos, pode-se atuar previamente visando o gerenciamento adequado da deposição, como, por exemplo, identificar o melhor período para limpeza de equipamentos.

O objetivo deste trabalho é realizar uma reunião dos principais modelos matemáticos para cálculo da taxa de deposição química de petróleo presentes na literatura e apresentar as principais características dos modelos fenomenológicos, com enfoque em componentes de uma bateria de preaquecimento de petróleo.

2. METODOLOGIA

A pesquisa dos modelos matemáticos para estimativa e cálculo da taxa de incrustação em trocadores de calor foi realizada nas plataformas de pesquisa Scielo, Science Direct, Research Gate, e Mendeley. Estas plataformas digitais de pesquisa reúnem as principais informações, pesquisas e descobertas da área científica. A busca foi realizada a partir de uma combinação de palavras chaves: *fouling*, deposição em trocadores de calor, deposição química, taxa de incrustação. Os modelos encontrados foram então classificados quanto ao seu modo de determinação da taxa de incrustação, relacionados a modelos não paramétricos, modelos determinísticos e modelos semi-empíricos, especialmente aqueles com foco na teoria do limiar de deposição.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O efeito da deposição nos cálculos térmicos envolve o conceito de resistência de depósito (*fouling factor*), o qual é incorporado às resistências térmicas convectivas e condutivas na determinação do coeficiente global de transferência de calor sujeito a depósito. Os fatores que exercem influência sobre a taxa de depósito são: geometria do trocador, material e acabamento da superfície de troca térmica, a composição do fluido, as propriedades do fluido e as condições operacionais, como temperatura de superfície e velocidade de escoamento.⁵

De modo geral, os modelos matemáticos encontrados na literatura constituem modelos semi-empíricos que consideram os efeitos das condições operacionais (temperatura e velocidade) e utilizam dados experimentais para estimação de parâmetros, sendo que o conceito de *threshold fouling* (limiar de deposição) de Ebert e Panchal (1997) acabou tornando-se base para diversos modelos descritos posteriormente.⁶ Logo abaixo é apresentado um tabela contendo alguns dos principais modelos semi-empíricos para cálculo da taxa de deposição.

Tabela 01: Principais modelos para cálculo da taxa de deposição (adaptado de Nakao, 2017).

| Referência | Equação | Comentários |
|------------------------|--|--|
| Kern e Seaton (1959) | $Rf = Rf^*(1 - e^{\beta t})$ | Primeiro modelo utilizado na previsão de taxa de deposição. Modelo de curvas assintóticas. |
| Ebert e Panchal (1997) | $\frac{dR_f}{dt} = \alpha R e^{\beta} \exp\left(-\frac{Ea}{RT_f}\right) - \gamma \tau_w$ | Primeiro modelo a utilizar a teoria do limiar de deposição. |
| Ebert e Panchal (1999) | $\frac{dR_f}{dt} = \alpha R e^{-0,66 Pr^{-0,33}} \exp\left(-\frac{Ea}{RT_f}\right) - \gamma \tau_w$ | Adição do número de Prandtl e fixação do expoente do número de Reynolds. |
| Polley et al. (2002) | $\frac{dR_f}{dt} = \alpha R e^{-0,8 Pr^{-0,33}} \exp\left(-\frac{Ea}{RT_w}\right) - \gamma R e^{0,8}$ | Maior adequação a regimes turbulentos e termo de supressão baseado na transferência de massa. |
| Yeap et al. (2004) | $\frac{dRf}{dt} = \frac{\alpha f u T_w^{\frac{2}{3}} \rho^{\frac{2}{3}} \mu^{-\frac{4}{3}}}{1 + \epsilon u^3 f^2 \rho^{-\frac{1}{3}} \mu^{-\frac{2}{3}} T_w^{\frac{2}{3}} \exp\left(-\frac{Ea}{RT_w}\right)} - \gamma u^{0,8}$ | Termo de deposição baseado no modelo de Epstein (1994). |
| Nasr e Givi (2006) | $\frac{dR_f}{dt} = \alpha R e^{\beta} \exp\left(-\frac{Ea}{RT_f}\right) - \gamma R e^{0,4}$ | Modificação do modelo de Polley et al (2002), retornando a temperatura de filme no termo exponencial e remoção do número de Prandtl. |

Crittenden et al. (1992) determinaram uma correlação para prever a taxa de incrustação total de trocadores de uma bateria de pré-aquecimento, observando a diminuição da incrustação conforme a diminuição da velocidade de escoamento e o aumento da temperatura de operação.

O mais representativo modelo semi-empírico de limiar de deposição (*threshold fouling*) foi apresentado

por Ebert e Panchal (1997), visando à previsão da taxa linear de *fouling* para condições em que se inicia a deposição (taxa de deposição próxima a zero), dada em função da temperatura do filme e da velocidade do fluido. Este modelo relaciona o primeiro termo com o mecanismo de reação química que leva à deposição, enquanto que o segundo termo refere-se ao efeito de supressão do *fouling*, ligado à tensão de cisalhamento. O valor assintótico é dado pelo equilíbrio de ambos os termos, na condição de deposição nula. Neste caso, é possível gerar uma curva que represente a relação entre a velocidade média de escoamento e a temperatura do filme. Esta curva é denominada envelope de deposição, onde na região acima dela observa-se uma tendência para formar depósitos, enquanto que abaixo da curva não há condições para a deposição ocorrer. Este gráfico tem sua importância à medida que permite prever as condições operacionais dos trocadores de calor para evitar a deposição.⁸

Ebert e Panchal (1997) consideraram somente o efeito da densidade do fluido e da viscosidade com o número de Reynolds (Re). O aumento da temperatura *bulk* diminui a viscosidade e aumenta o Re, no qual para altos valores de Re, a espessura da camada limite térmica diminui, o que leva a uma redução da taxa de formação de *fouling* devido à redução no volume para a reação química³. Uma versão modificada deste modelo foi estabelecida por Panchal et al. (1999). Neste formato, os autores assumiram que a reação química de deposição ocorre na superfície da parede do tubo, adotando-se a temperatura de superfície do *fouling* (T_s) em vez da temperatura de filme, ocorrendo uma transferência do depósito da camada limite para a região de completa turbulência; além disso, incorporou o número adimensional de Prandtl (Pr), que relaciona a viscosidade cinemática com a condutividade térmica e o calor específico do fluido, a fim de considerar os efeitos da difusão de calor comparado à velocidade. Ambos os modelos foram testados com dados de óleos de uma refinaria e constataram a existência de uma região de operação em que não há *fouling*, e que esta região (limiar: corresponde à máxima temperatura de parede abaixo da qual não há *fouling*) é tanto maior quanto maior a tensão de cisalhamento, diretamente relacionada com a velocidade de escoamento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos estudos analisados, pode-se perceber que o entendimento do fenômeno de deposição em trocadores de calor, principalmente os que operam com petróleo e afins, continua a ser precário dado a grande divergência entre os valores experimentais e os valores estimados através dos modelos propostos por cada autor. Apesar disso, pôde-se observar um aumento do interesse relacionado ao estudo do fenômeno da deposição dinâmica em equipamentos térmicos nos últimos anos, dado que a primeira interpretação sobre o assunto, por Kern e Seaton, era simplificada quanto à influência de fatores, como a velocidade do fluido, a transferência de massa e a deposição química. Os modelos atuais procuram, além de incorporar estes efeitos, estimar uma região onde não ocorra a formação de uma camada de incrustação.

5. REFERÊNCIAS

- ¹ BOTT, T.R., **Fouling of heat exchangers**. Ed. S.W. CHURCHILL, Philadelphia, PA, *Chemical Engineering Monographs* 26, Elsevier Science B.V., 1995.
- ² VALLE, R.O., **Determinação da taxa de incrustação em trocadores de calor com o auxílio de métodos de otimização**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- ³ DESHANNAVAR, U.B., RAFEEN, M.S., RAMASAMY, M., SUBBARAO, D., **Crude oil fouling: a review**. *Journal of Applied Sciences*, v. 10, p. 3167-3174, 2010.
- ⁴ LESTINA, T., **Heat exchangers fouling, cleaning and maintenance**. F.A. KULACKI (ed.), Handbook of Thermal Science and Engineering, Springer International Publishing AG, p. 1-33, 2017.
- ⁵ SALEH, Z., SHEIKHOLESLAMI, R., WATKINSON, A. P., **Fouling characteristics of a light Australian crude oil**. In: *Proc. Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications*, Santa Fe, NM, p. 226–233, 2003.
- ⁶ NAKAO, A., **Deposição em trocadores de calor – modelos e impactos no projeto de trocadores casco e tubos**. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- ⁷ KERN, D. Q., SEATON, R. E., **A theoretical analysis of thermal surface fouling**. *British Chemical Engineering*, v. 4, p. 258-265, 1959.
- ⁸ EBERT, W., PANCHAL, C.B., Analysis of Exxon crude-oil-slip stream coking data. In: *Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchange Equipment*, eds. C.B. PANCHAL, T.R. BOTT, E.F.C. SOMERSCALES, S. TOYAMA, Begell House, New York, NY, p. 451-460, 1997.