

Арсеньєва О.П., Янг М., Критенден Б., Капустенко П.А.

ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ ТЕПЛООТДАЧИ

Выполнено по проекту ЕС INTHEAT (contract № FP7-SME-2010-1-262205)

При анализе различных методик уменьшения загрязнений со стороны охлаждающей воды Панчал и Кнудсен [1] охарактеризовали использование интенсифицированных теплообменных поверхностей как один из наиболее перспективных методов.

Большинство моделей, описывающих различные механизмы образования отложений [1], основаны на предсказании уровня образования отложений как разницы между интенсивностью осаждения отложений φ_d и интенсивностью удаления отложений φ_r . Анализ интенсивности удаления отложений при условии асимптотического характера отложений был представлен в работе [2]. Было показано, что φ_r прямо пропорционально касательному напряжению на стенке τ_w и значения коэффициентов пропорциональности определены для условий экспериментов, представленных в работах [3,4,5].

Для оценки термического сопротивления отложений в каналах пластинчатых теплообменных аппаратов (ПТА) в период времени t получено следующее соотношение:

$$R_f(t) = \frac{B}{\tau_w} \cdot \left[1 - \exp\left(1 - \frac{\varphi_d}{B} \cdot \tau_w \cdot t\right) \right] \quad (1)$$

Для определения коэффициента B применяется его значение для случая асимптотических условий загрязнения $B = B^*$.

Анализ распределения накипи вдоль пластин ПТА, используемых для подогрева водопроводной воды, показал, что существуют некоторые критические условия по температуре воды и содержанию солей, после которых начинается образование накипи. В последнее десятилетие концепция «пороговых загрязнений» была в значительной степени разработана для загрязнений, образуемых на поверхностях теплопередачи при нагреве сырой нефти. Янг и Критенден [6] предложили модель образования загрязнений в трубах с интенсификаторами теплоотдачи. Интенсивность осаждения согласно этой модели можно выразить следующим образом:

$$\varphi_d = \frac{A_m \cdot P_{cu} \cdot T_s^{2/3} \cdot \rho^{2/3} \cdot \mu^{-4/3}}{1 - B_m \cdot P_{cu} \cdot 2 \cdot \tau_w \cdot \rho^{-4/3} \cdot \mu^{-1/3} \cdot T_s^{2/3} \cdot \exp(E/(R \cdot T_s))} \quad (2)$$

где T_s – температура поверхности, К; ρ – плотность жидкости, кг/м³; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; $R = 8,314$ Дж/(Моль·К) – универсальная газовая постоянная; C_f – коэффициент трения Фаннинга; u – средняя скорость потока, м/с. Даны значения параметров A_m , B_m и E , которые дают наилучшее согласование с экспериментальными данными для исследованной нефти.

Используя соотношение (2) и значение величины B^* , полученное в статье [2], можно по выражению (1) рассчитать термическое сопротивление отложений. Так как свойства нефти и воды значительно отличаются, эмпирические параметры A_m , B_m , E для случая воды необходимо скорректировать. Касательное напряжение стенки для канала ПТА оценивалось согласно зависимости, предложенной в работе [2].

Для удовлетворения экспериментальным данным по осаждению сульфата кальция в каналах ПТА, представленных Банзалом и др. [3], мы скорректировали только один параметр A_m для значения $A_m = 6,5 \cdot 10^{-12} \text{ кг}^{2/3} \text{ К}^{1/3} \text{ м}^{5/3} (\text{Вт})^{-1} \text{ с}^{-1/3} \text{ ч}^{-1}$. Накипеобразование карбоната кальция в кольцевом гладком канале между трубой с внутренним диаметром 22 мм и расположенной внутри нее трубой с наружным диаметром 16 мм было исследовано в работе Женхуа и др. [4]. Данные этой работы для двух различных скоростей были коррелированы представленной моделью с параметром $A_m = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ кг}^{2/3} \text{ К}^{1/3} \text{ м}^{5/3} (\text{Вт})^{-1} \text{ с}^{-1/3} \text{ ч}^{-1}$. Остальные параметры модели B_m и E неизменны. Загрязнение путем осаждения частиц в каналах ПТА, работающих на воде содержащей взвешенные частицы карбоната кальция, исследовалось Карабеласом и др. в работе [5]. Все параметры в выражении (2) такие же, как и для вычислений в работе [4]. Это позволяет сделать вывод, что значения параметров выражения (2) для тех же солей и их примесей имеют близкие численные значения.

Выражение (2), помимо касательного напряжения стенки и физических свойств жидкости, учитывает и влияние температуры поверхности T_s . Данные по накипи карбоната кальция при трех различных температурах, когда скорость и концентрация солей не меняются, представлены в работе [4]. Согласование данной модели с этими данными тоже достаточно хорошее.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что представленная математическая модель дает возможность прогнозировать термическое сопротивление загрязнений для механизмов накипобразования и осаждения взвешенных частиц при различных скоростях потока и температурах поверхности стенки. На начальных стадиях процесс формирования загрязнений может быть описан с помощью «пороговой модели» для труб с интенсификацией теплоотдачи [6]. Для определения термического сопротивления загрязнений только по данным о чистоте воды и ее химическому составу необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования в этом направлении.

Литература

1. Panchal C.B., Knudsen J.G. Mitigation of Water Fouling: Technology Status and Challenges. *Advances in Heat Transfer*, 1998, 31; 431–474.
2. Расчет термического сопротивления загрязнений по стороне охлаждающей воды в пластинчатых теплообменниках промышленных предприятий / Арсеньева О.П. // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2011. – № (4). – с. 43–47.
3. Bansal B, Muller-Steinhagen H, Xiao Dong Chen. Performance of plate heat exchangers during calcium sulphate fouling – investigation with an in-line filter. *Chemical Engineering and Processing* 2000; 39: 507–519.
4. Zhenhua Quan, Yongchang Chen and Chongfang Ma. Experimental Study of Fouling on Heat Transfer Surface During Forced Convective Heat Transfer. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 2008; 16(4): 535–540.
5. Karabelas A.J., Yiantsios S.G., Thonon B., and Grillot J.M., Liquid side fouling of Heat Exchangers. An Integrated R&D Approach for Conventional and Novel Designs. *Applied Thermal Engineering*, 1997, 7 (8–10); 727–737.
6. Yang M, Crittenden B. Fouling thresholds in bare tubes and tubes fitted with inserts. *Applied Energy* 2012; 89(1): 67–73.

УДК 338.45:662.6

Арсеньева О.П., Янг М., Криттенден В., Капустенко П.О.

ЗАБРУДНЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЧОЇ ПОВЕРХНІ ТЕПЛОБІМННИХ АПАРАТІВ З ІНТЕНСИФІКАЦІЄЮ ТЕПЛОВІДДАЧІ

В роботі досліджуються процеси утворення відкладень по стороні охолоджувальної води у пластинчастих теплообмінних апаратах. Запропонована математична модель для прогнозування термічного опору відкладень для механізмів утворення накипу та осідання завислих частинок за різних швидкостей потоку та температур поверхні стінки. На початкових стадіях процес формування відкладень може бути описаний за допомогою «порогової моделі» запропонованої для труб з інтенсифікацією тепловіддачі Янгом та Криттенденом. Для вдалого прогнозування термічного опору забруднень згідно запропонованої моделі необхідно експериментально визначити параметри моделі для застосованої охолоджуючої води.

Arsenyeva O.P., Yang M., Crittenden B., Kapustenko P.O.

HEAT TRANSFER SURFACE FOULING IN PLATE HEAT EXCHANGERS WITH ENHANCED HEAT TRANSFER

The processes of fouling formation for cooling water side in plate heat exchangers are investigated. The mathematical model, which is capable to predict fouling thermal resistance for precipitation and particulate fouling at different flow velocities and surface temperatures, is developed. This model can be used for plate heat exchangers with enhanced heat transfer and also for straight channels with heat transfer intensification. On initial stage of fouling formation it can be described by “threshold model” proposed for bare tubes and tubes with enhanced heat transfer by Yang and Crittenden. For correct predictions of fouling thermal resistance by this model it is necessary to determine experimentally one model parameter for given cooling water fouling properties.