

*Г. Л. ХАВИН*, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

## **МОДЕЛЬ РОСТА ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ**

Представлено соотношение для расчета образования отложений на поверхности теплопередачи пластинчатых теплообменников. Предложенная зависимость учитывает влияние концентрации загрязнителя, скорости движения раствора, температуры стенки, давления и параметров пластин, на интенсивность появления и роста отложений. Применение зависимости позволит прогнозировать время работы аппарата между остановками на чистку.

**Ключевые слова:** загрязнение поверхности теплопередачи, пластинчатый теплообменник, прогнозирование работы.

### **Вступление.**

Теплообменники являются одной из важнейших составляющих оборудования технологических процессов. Они участвуют в распределении тепловой энергии и, следовательно, в ее общем потреблении. Загрязнение имеет серьезное влияние на ухудшение передачи тепла и негативно влияет на экономическое функционирование предприятия. К наиболее распространенным видам загрязнений обычно относят осаждение частиц различной твердости, кристаллизация растворенных в жидкости солей, оседание и отложение продуктов химических реакций. Из растворенных в жидкости (например, воде) солей самым распространенным видом отложений является кристаллизация солей кальция, таких как карбонаты, сульфаты, фосфаты, а также солей кремния и магния.

### **Состояние проблемы и формулировка задачи.**

Изменение толщины кристаллизационных отложений и осаждения частиц на теплообменной поверхности в большинстве случаев точно установить не представляется возможным. Однако существует ряд экспериментальных и теоретических исследований, позволяющих с определенной степенью точности предположить их появление и дальнейший рост.

Для кристаллического загрязнения характерна линейная кривая роста скорости отложений, которая была описана многими авторами [1 – 3]. Однако это происходит не всегда и линейность в течение длительного периода времени нарушается. Для постоянных тепловых и гидравлических условий, скорость загрязнения (разность между эффектом отложения и удаления) может убывать с появлением депозита, и или даже сравняться [4]. Многие исследователи наблюдали асимптотическое поведение для кристаллического загрязнения [5–8]. В большинстве случаев отложение солей обратной растворимости на нагретых поверхностях образуют очень твердый и жестко связанный с поверхностью слой депозита. Главная особенность механизма возникновения такого вида загрязнения это рост кристалла во времени. Этот процесс предполагает появления ядра кристаллизации. Учитывая, что видов примесей великое множество, то каким-либо образом управлять или контролировать этот процесс практически невозможно.

Количество моделей опубликованных для описания кристаллизационного загрязнения и осаждения частиц достаточно велико [1, 2, 5, 6, 9–13]. В последние годы основные усилия исследователей были направлены на изучение процессов загрязнения смешанных солей, одновременно протекающих процессов кристаллизации и других типов загрязнений, в том числе частицами. Комплексная природа формирования отложений не дает возможности для создания точной математической модели процесса загрязнения. Моделирование обычно основано на ряде упрощающих допущений и рассматривает зависимость появления и роста отложений от ряда технологических факторов, таких как скорость, концентрация, температура стенки, средняя температура и т.п.

#### **Постановка задачи и цель работы.**

Слой загрязнения на теплообменной поверхности при проектировании пластинчатых теплообменников традиционно учитывают введением дополнительной поверхности, величина которой на практике субъективно определяется проектировщиком. В настоящей работе предложено соотношение для прогнозирования величины отложений и скорости образования загрязнений. В качестве допущений принималось, что отложения равномерно осаждаются на поверхности

теплопередачи, плотность и пористость депозита постоянна, условия работы неизменны.

### Теоретические положения.

Пусть мы имеем в теплоносителе одно вещество загрязнитель или их несколько, но одно из них имеет намного превосходящую остальные вещества концентрацию при примерно одинаковой склонности к образованию отложений. Другой случай может иметь место, когда концентрация примесей в теплоносителе примерно одинакова, но одно из веществ обладает несравнимо большей склонностью к загрязнению теплопередающей поверхности. Иными словами, рассмотрим задачу образования отложений за счет наличия одного из веществ в потоке теплоносителя. Интенсивность выпадения отложений в единицу времени (кг/с) представим в виде

$$\frac{\partial m_f}{\partial t} = \frac{\partial h_f}{\partial t} \cdot F_f \cdot \rho_f \cdot (1 - \varphi), \quad (1)$$

где  $h_f$  – усредненная толщина слоя отложений, м;

$F_f$  – площадь теплопередающей поверхности, на которой появляются отложения, м<sup>2</sup>;  $F_f = F_{he} \cdot k_f$ ;

$F_{he}$  – площадь теплопередающей поверхности теплообменного аппарата, м<sup>2</sup>;

$k_f$  – коэффициент, учитывающий на какой площади происходит достаточно интенсивное выпадение отложений;  $0 < k_f \leq 1$ ;

$\rho_f$  – плотность вещества депозита, кг/м<sup>3</sup>;  $\varphi$  – относительное содержание пор в единичном объеме отложений,  $0 \leq \varphi < 1$ .

С другой стороны интенсивность выпадения отложений как функцию параметров теплоносителя можно представить в виде

$$\frac{\partial h_f}{\partial t} \cdot F_f \cdot \rho_f \cdot (1 - \varphi) = V_c \cdot k_{con} \cdot K_{foul}(w, P, T, t, p_i), \quad (2)$$

где  $V_c$  – объемный расход теплоносителя в теплообменнике, м<sup>3</sup>/с;

$$V_c = G_c / \rho_c,$$

$G_c$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;

$\rho_c$  – средняя плотность теплоносителя в каналах теплообменника, кг/м<sup>3</sup>;

$k_{con}$  – разность концентраций загрязнителя в потоке теплоносителя на входе и выходе из теплообменника по истечению рассматриваемого периода времени, кг/м<sup>3</sup>;

$K_{foul}$  – коэффициент, учитывающий скорость потока в каналах, температуру –  $T$ , давление –  $P$ , время работы теплообменника –  $t$ , параметры гофрировки, чистоту теплопередающей поверхности и т.д. –  $P_i$ .

Соотношения (1) и (2) запишем совместно

$$\frac{\partial h_f}{\partial t} = \frac{V_c \cdot k_{con}}{F_{pl} \cdot k_f \cdot \rho_f \cdot (1-\varphi)} \cdot K_{foul}. \quad (3)$$

Объемный расход теплоносителя через каналы аппарата можно представить в виде [14]

$$V_c = w \cdot f_{ch} \cdot n_{ch},$$

где  $w$  – скорость теплоносителя в каналах теплообменника, м/с;

$f_{ch} = b \cdot \delta$  – площадь поперечного сечения межпластинного канала, м<sup>2</sup>;  $b$  – ширина пластины, м,  $\delta$  – высота гофрировки, м;

$n_{ch}$  – число каналов в аппарате для рассматриваемого теплоносителя.

Учитывая, что площадь теплопередающей поверхности для одного теплоносителя равна  $F_{pl} = f_{pl} \cdot n_{ch}$ , площадь пластины –  $f_{pl} = b \cdot l_{pr}$ , где  $l_{pr}$  – приведенная длина пластины, м, выражение (3) перепишем в виде

$$\frac{\partial h_f}{\partial t} = \frac{w \cdot \delta \cdot k_{con}}{l_{pr} \cdot k_f \cdot \rho_f \cdot (1-\varphi)} \cdot K_{foul}. \quad (4)$$

В выражении (4) приведенная длина пластины  $l_{pr}$  представляет собой длину гладкой пластины по площади эквивалентной

гофрированной. Фактически это длина пластины, умноженная на коэффициент увеличения площади за счет гофрировки  $\Phi$ , который приближенно может быть вычислен по формуле

$$\Phi(\eta) \approx \frac{1}{6}(1 + \sqrt{1 + \eta^2} + 4\sqrt{1 + \eta^2}/2),$$

где  $\eta = 2\pi \cdot \delta / \Lambda$ ,  $\Lambda$  – шаг гофрировки, м.

В качестве множителя, учитывающего изменение скорости отложения во времени предлагается использовать зависимость, описывающую асимптотический характер изменения скорости роста депозита во времени  $K_{foul}(t) = 1 - e^{-\beta \cdot t}$ , где  $\beta$  – постоянный коэффициент.

#### **Параметры, влияющие на интенсивность загрязнений.**

Появление отложений на теплопередающей поверхности представляет собой нестационарный процесс, зависящий от ряда параметров, влияние которых должно быть четко известно перед началом проектирования теплообменного аппарата на выбранную позицию. К таким параметрам относят: свойства теплоносителя и наличие в нем взвешенных частиц различных свойств и концентраций; скорость течения теплоносителей; температура поверхности стенки; рабочее давление; геометрия, материал и шероховатость поверхности и т.д. Рассмотрим влияние некоторых из них и их учет за счет выбора коэффициента  $K_{foul}$ . Для этого представим  $K_{foul}$  как произведение отдельных функций, каждая из которых несет ответственность за тот или иной параметр  $K_{foul} = K_w \cdot K_t \cdot K_T \cdot K_P \cdot K_g$ , где множители функции, учитывающие соответственно влияние скорости движения теплоносителя, изменение скорости нарастания отложений во времени, температуры гофрированной стенки, давления теплоносителя, различных геометрических характеристик пластины, состояние поверхности пластины.

На интенсивность отложений наиболее сильное влияние оказывает скорость движения теплоносителя. Скорость влияет как на процесс осаждения, так и на процесс удаления отложений со стенки. Физическая

природа этого воздействия проявляется через гидродинамические эффекты. Из практики известно, что с увеличением скорости потока увеличивается тепловая производительность и уменьшается склонность к загрязнению. Взвешенный в жидкости загрязнитель наиболее интенсивно выпадает на стенку в местах с низкой скоростью течения, и особенно, в местах резкого замедления. Увеличение напряжения сдвига приводит к удалению отложений с поверхности. Для функции  $K_w$  предлагается использовать выражение вида  $K_w = C_w \cdot w^{n_w}$ , где  $C_w$ ,  $n_w$  – постоянные коэффициенты, зависящие от вида гофрировки пластины.

Исследования по влиянию поверхностной температуры стенки показали, что однозначного ответа пока не имеется. Усиление загрязнений с ростом температуры связано с увеличением скорости коррозии. Происходит более интенсивная реакция по образованию кристаллов, и, кроме того, при высоких температурах имеет место разложение и превращение некоторых веществ, как загрязнителей, так и антизагрязнителей. При снижении температуры рост отложений происходит медленнее, хотя имеются некоторые жидкости, которые при понижении температуры интенсивно кристаллизуются и количество отложений возрастает. Поэтому можно говорить о некотором оптимальном с точки зрения загрязнений значении температуры каждого теплоносителя. Для учета влияния текущей температуры стенки  $T_i$ , будем использовать функцию вида  $K_T = C_T \cdot (T_i / T_{Op})^{n_T}$ , где  $C_T$ ,  $n_T$  – постоянные коэффициенты, которые определяются экспериментально;  $T_{Op}$  – значение температуры стенки, при котором происходит интенсивное изменение свойств теплоносителя, сопровождающееся резким увеличением или уменьшением появления загрязнений.

Для учета влияния текущего давления теплоносителя  $P_i$  на интенсификацию загрязнения будем использовать функцию вида  $K_P = C_P \cdot (P_i / P_{Op})^{n_P}$ , где  $C_P$ ,  $n_P$  – постоянные коэффициенты, которые определяются экспериментально;  $P_{Op}$  – значение давления, при котором происходит интенсивное изменение поведения теплоносителя, с резким увеличением или уменьшением появления загрязнений.

Коэффициент  $K_g$ , учитывающий влияние поверхности, материала и геометрии стенки, является наименее изученным параметром. Шероховатость стенки, определяет, прежде всего, зарождение центров отложений на начальной стадии загрязнения и отвечает за турбулентность в текущей жидкости. Последнее обстоятельство приводит к неустойчивости вязкого подслоя у поверхности стенки. После некоторого периода работы аппарата даже качественные гладкие поверхности становятся сильно шероховатыми из-за образования накипи, формирования коррозии или эрозии.

### **Заключение.**

Предложено обобщенное соотношение для расчета скорости образования отложений на поверхности теплопередачи пластинчатого теплообменника. Представленное соотношение рассчитано на использование при проектировании появления загрязнений за счет выпадения твердых частиц из потока жидкости. Последнее обстоятельство особенно важно в связи с имеющей место широкой модернизацией тепловых схем различных производств, основанной на замене трубчатых теплообменников на более эффективные пластинчатые аппараты. Дальнейшее развитие теории связано с адаптированием предложенных соотношений для конкретных приложений в промышленности, что позволит рассчитывать изменение коэффициента теплопередачи и определять время работы аппарата до его остановки на очистку.

Работа выполнена при финансовой поддержке Европейского сообщества в рамках проекта EU project ENERGY.2011.8.1-2-EFENIS.

**Список литературы:** 1. Hasson D. Rate of decrease of heat transfer due to scale deposition / D. Hasson // DECHEMA Monogr. 1962. – № 47. – P. 233–282. 2. Reitzer B.J. Rate of scale formation in tubular heat exchangers /B.J. Reitzer // I&EC Process Des. Dev. 1964.–3 (4).-P. 345–348. 3. Ritter R.B. Crystallization fouling studies /R.B. Ritter// J. Heat Transfer. 1983. – 105. –P. 374–378. 4. Bott T.R. Fouling in heat transfer equipment /T.R. Bott, R.A. Walker // Chem. Eng. 1971. – P. 391–395. 5. Bohnet M. Fouling of heat transfer surfaces /M. Bohnet // Chem. Eng. Technol. 1987. – 10. – P. 113–125. 6. Watkinson A.P. Scaling of heat exchanger tubes by calcium carbonate /A.P. Watkinson, O. Martinez // ASME J. Heat Transfer. 1975. – 97. – P. 504–508. 7. Augustin W. Verkrustung (fouling) von warme uber tragungsflächen: PhD Thesis: Institut für Verfahrens-und Kerntechnik, Technische Universität at Braunschweig / W. Augustin. – Germany, 1992. – 48 p. 8. Middis J. Heat transfer and pressure drop for flowing wood pulp fibre suspensions: PhD Thesis: Department of Chemical and Material Engineering, University of Auckland / J. Middis.– New Zealand. 1994. –56 p. 9. Гонионский В.Т. Вычисление коэффициента теплопередачи с учетом от-

ложений / В.Т. Гонионский, С.И. Голуб, А.М. Розен // Теплопередача. 1970. – 2, № 3. – С.24–29. **10.** Krause S. Fouling of heat transfer surfaces by crystallization and sedimentation / S. Krause // Int. Chem. Eng. 1993. – 33, № 3. – P. 355–401. **11.** Brahim F. Numerical simulation of crystal growth on heat transfer surfaces / F. Brahim, W. Augustin, M. Bohnet // Proceedings of Conference on Heat Exchanger Fouling—Fundamental Approaches and Technical Solution, Davos, Switzerland. 2001. – P. 322–328. **12.** Fahiminia F. Investigation of initial fouling rates of calcium sulfate solutions under non-boiling conditions / F. Fahiminia, A.P. Watkinson, N. Epstein // Proceedings of Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning – Fundamental Applications, Santa Fe, USA. 2003.– P.135–140. **13.** Bansal B. Deposition and removal mechanisms during calcium sulphate fouling in heat exchangers / B. Bansal, X.D. Chen, H. Muller-Steinhagen // Int. J. Transport Phenomena. 2005. – 7. – P. 1–22. **14.** Пластинчатые теплообменники в промышленности [Товажнянский Л. Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П.] – Х.: НТУ «ХПИ», 2004. – 232 с.

Поступила в редколлегию 05.03.13

УДК 66.045.01

**Модель роста загрязнений на поверхности пластинчатых теплообменников / Г. Л. Хавин** // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Х. : НТУ «ХПИ». 2013. – № 9 (983). – С. 75–82. – Бібліогр.: 14 назв.

Надано співвідношення щодо розрахунку виникнення відкладень на поверхні теплопередачі пластинчастих теплообмінників. Запропоновано залежність, що враховує вплив концентрації забруднення, швидкості руху розчину, температури стінки, тиск, параметрів пластин та інтенсивність появлення і зростання відкладень. Застосування залежності дозволить прогнозувати час роботи апарату між зупинками на чищення.

**Ключові слова:** забруднення поверхні теплопередачі, пластинчастий теплообмінник, прогнозування роботи.

The relation for deposit formed on heat transfer surface of plate heat exchanger calculations is considered. The dependence which accounted of influence of pollutant concentration, rate solution, wall temperature, pressure and plates parameters to intensity of foiling appear and growth is proposed. The dependence used permit to predicted time of unit operation between cleaning.

**Keywords:** fouling of heat transfer surface, plate heat exchanger, predict operation.