

УДК 621.182.2.44

О.В.ТРЕТЬЯКОВ, О.Ю.НІКІТЧЕНКО, кандидати техн. наук
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

ВПЛИВ ГОМОГЕННОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ НА УТВОРЕННЯ ВІДКЛАДЕНЬ ВАЖКОРОЗЧИННИХ СПОЛУК НА ТЕПЛОПЕРЕДАЮЧИХ ПОВЕРХНЯХ

Запропоновано фізико-хімічну модель процесу утворення відкладень, як двостадійного процесу – доставки та закріплення часток твердої фази, що утворюються внаслідок гомогенної кристалізації у теплоносії. Отримано математичне описання процесу для випадку турбулентної течії робочого середовища. Отримані результати розрахунків за цією моделлю досить добре погоджуються з експериментальними даними по накипеутворенню солей жорсткості на теплопередаючих поверхнях.

Предложена физико-химическая модель процесса образования отложений, как двухстадийного процесса – доставки и закрепления частиц твердой фазы, которые образуются вследствие гомогенной кристаллизации в теплоносителе. Получено математическое описание процесса для случая турбулентного течения рабочей среды. Полученные результаты расчетов по этой модели достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными по накипеобразованию солей жесткости на теплопередающих поверхностях.

It has been proposed the physicochemical model of process deposit formation, as two-stage process – delivery and fixing particles solid phase, which are formed as result of homogeneous crystallization in the heat carrier. It has been taken mathematical formulation of process for case when workspace has turbulent motion. The results of calculation which have been received for this model, are good coordinated with experimental data scale formation of salt harshness on the heat-exchange surface.

Ключові слова: гомогенна кристалізація, утворення відкладень, фізико-хімічна модель, накипеутворення, солі жорсткості, теплопередаючі поверхні.

Постановка проблеми. Надійність і ефективність експлуатації різноманітних установок, які генерують теплову, або електричну енергію, багато як залежать від утворення відкладень важкорозчинних сполук (солей жорсткості) на теплопередаючих поверхнях теплопередаючого обладнання. Саме поява таких відкладень на теплопередаючих поверхнях котлів теплових електростанцій та оболонках тепловиділяючих елементів реакторів атомних енергетичних установок стають головною причиною виникнення аварійних ситуацій на цих об'єктах, наслідки яких можуть бути дуже важкими. Утворення таких сполук у потоці теплоносія відбувається за рахунок присутності у теплоносії відповідних іонів. Тому процес утворення часток важкорозчинних сполук у потоці теплоносія є безумовно процесом гомогенної кристалізації.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Механізм формування зовнішнього шару важкорозчинних солей, який відбувається за рахунок осадження часток з потоку теплоносія. Невелика концентрація дисперсної фази (часток) і незначна концентрація електроліту у реальних умовах експлуатації теплопередаючого обладнання, дозволяють полагати, що дисперсна система перебуває у стані неусталеної рівноваги, але дисперсна фаза при цьому перебуває у агрегативно усталеному стані [1]. Все це дає змогу полагати, що взаємодія часток у потоці практично відсутня, а доставка часток до поверхні підпорядковується законам конвективної дифузії.

Закріплення частки будемо розглядатися як її незворотну фіксацію у найближчій потенційній ямі на кривій взаємодії частки зі стінкою. При цих умовах взаємодію доставленої частки з поверхнею може бути розраховано за допомогою залежностей, які отримані у теорії усталеності гідрофобних часток [2]. При цьому приймають до уваги, що наявність на потенційній кривій взаємодії максимуму (потенційного бар'єру) перешкоджає закріпленню тих часток, у яких кінетична енергія поступального руху ε менше висоти цього бар'єру U_{max} .

Більшістю дослідників вважається, що частки з енергією $\varepsilon \geq U_{max}$, які подолали бар'єр, не можуть здійснити зворотній перехід, як такі що «скинули» надлишкову кінетичну енергію [3].

Постанова задачі та її розв'язання. У відповідності з викладеним визначення швидкості утворення відкладень розпадається на дві самостійні задачі: визначення потоку доставлених до поверхні часток за рахунок конвективної дифузії і визначення висоті потенційного бар'єру, а також кількості часток, які мають кінетичну енергію, що перебільшує цей бар'єр.

Розглянемо стадію доставки часток з турбулентного потоку. В якості вихідної можна прийняти гіпотезу Л.Д. Ландау і В.Г. Левіча про плавне затухання турбулентного руху у в'язкому підшарі. У цьому випадку турбулентний потік має чотирьохшарову структуру (рис. 1), а розподілення об'ємних концентрацій розчиненої речовини у кожній області описується наступними рівняннями [4]

$$C_{IV} = \frac{j}{D} y \quad \text{при} \quad y \leq \delta; \quad (1)$$

$$C_{III} = \frac{j\delta_0^3}{3\mathcal{W}_0 y^3} + c_2 \quad \text{при} \quad \delta \leq y \leq \delta_0; \quad (2)$$

$$C_{II} = \frac{j}{\beta v_0} \ln \frac{y}{d} + c_1 \quad \text{при} \quad \delta_0 \leq y \leq d, \quad (3)$$

де C_{II} , C_{III} , C_{IV} – об'ємні концентрації у відповідній області; j – потік розчиненої речовини; D – коефіцієнт молекулярної дифузії; v_0 – характеристична швидкість турбулентного потоку; β , γ – постійні порядку одиниці; c_1 , c_2 – постійні інтегрування.

Постійні інтегрування c_1 і c_2 і потік j у роботі [4] визначаються з умов змикання розподілень при граничних умовах:

$$\begin{aligned} y = 0; \quad C &= 0; \\ y = d; \quad C &= C_0. \end{aligned} \quad (4)$$

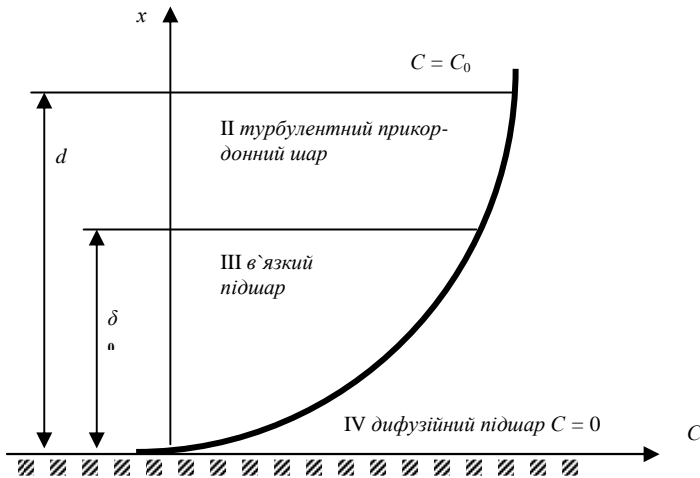


Рис. 1 – Структура турбулентного потоку і розподілення концентрації розчиненої речовини

$$\delta = \frac{10^{3/4} \nu}{Pr^{1/4} v_0 \sqrt[4]{\gamma}}, \quad (5)$$

де ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості; $Pr = \nu/D$ – дифузійне число Прандтля.

Виразимо v_0 через середню швидкість течії по трубі U_0

$$v_0 = U_0 \sqrt{\frac{k_f}{2}}; \quad (6)$$

$$k_f = 0,32 Re^{-1/4} \quad \text{при} \quad Re \leq 10^6, \quad (7)$$

де k_f – коефіцієнт опору.

Оцінимо порядок величин, які входять до формули (5),

$$\begin{aligned}v &= n_1 \cdot 10^{-6}; & \text{Pr} &= \frac{v}{D} = \frac{n_1 \cdot 10^{-6}}{n_2 \cdot 10^{-12}} = n_3 \cdot 10^6; \\v_0 &= 0,4U_0 \text{Re}^{-1/8} = 0,4n_4(n_5 \cdot 10^5)^{-1/8} = n_6 \cdot 10^{-1/2}; \\ \gamma &= n_7 \cdot 10^0.\end{aligned}$$

де n_i – величини порядку одиниці.

$$\text{Тоді } \delta = n_8 \cdot 10^{-6,25} \approx 7 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Таким чином, товщина дифузійного підшару має той же порядок, що і радіус часток твердої фази, які утворюються у розчині при гомогенній кристалізації. Отже, він не може бути основним опором для потоку дифундуючих до поверхні часток твердої фази важкорозчинних сполук.

У відповідності з викладеним схема розподілення концентрацій буде мати вигляд, наведений на рис. 2. Граничні умови $C = C_0$ при $y = d$ і $C = 0$ при $y = r$ і умова змикання розподілень C_{II} і C_{III} при $y_0 = \delta_0$ дозволяє знайти потік

$$j = C_0 \left[\frac{\delta_0^3}{3\gamma_0} \left(\frac{1}{r^3} - \frac{1}{\delta_0^3} \right) - \frac{1}{\beta v_0} \ln \frac{\delta_0}{d} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Основна відміна формули (8) для часток твердої фази важкорозчинних сполук, які виникають у потоці теплоносія внаслідок гомогенної кристалізації, від рівняння для колоїдних систем [4] – відсутність членів D і δ , які обумовлені молекулярною дифузією.

З наведеного витікає, що розмір часток твердої фази, яка виникає у теплоносії за рахунок гомогенної кристалізації у розчині, має визначальне значення для доставки їх до теплопередаючих поверхней обладнання.

Неважко переконатися, що і на стадії закріплення часток твердої фази на теплопередаючих поверхнях обладнання розмір часток відіграє дуже важливу роль. Взаємодія частки зі стінкою у першому наближенні може бути розрахована за допомогою залежностей, які отримані для сфероподібних часток [6-8]

$$U = U_i + U_m, \quad (9)$$

$$U_i = \frac{\varepsilon r \varphi_1^2}{2} \ln(1 + e^{-\chi H}), \quad (10)$$

$$U_m = -\frac{Ar\lambda}{12H(\lambda + 3,5\pi H)} \text{ при } H \leq 150 \overset{0}{A}, \quad (11)$$

$$U_m = -Ar \left[\frac{2,54\lambda}{120\pi H^2} - \frac{2,54\lambda^2}{75\pi^2 H^3} + \frac{2,54\lambda^3}{3360\pi^3 H^4} \right] \text{ при } H \geq 150 \overset{0}{A}, \quad (12)$$

де U – повна потенційна енергія взаємодії двох часток; U_i – потенційна енергія сил іон-електростатичного відштовхування часток; U_m – потенційна енергія сил притягнення Ван-дер-Ваальса – Лондона з урахуванням ефекту електромагнітного запізнення; ε – діелектрична проникливість середовища; ϕ_1 – падіння потенціалу у дифузійній частині подвійного електричного шару; H – відстань між частками; χ – параметр Дебая; A – стала Гамакера; λ – лондонівська довжина хвилі.

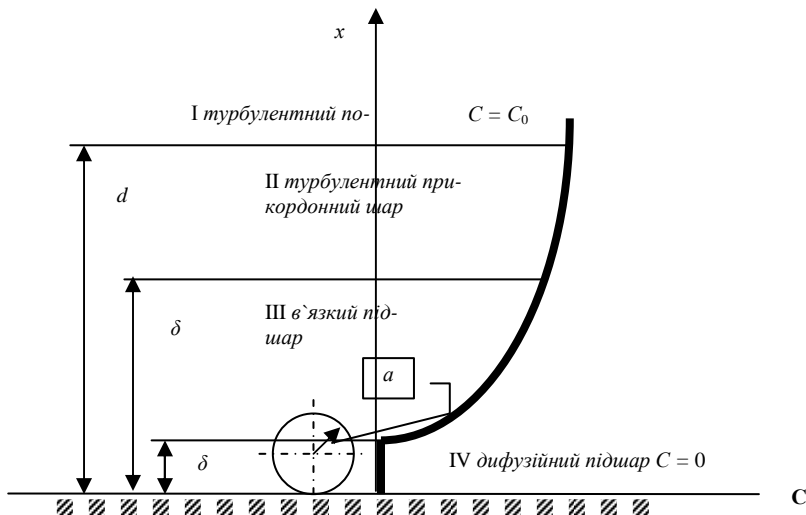


Рис. 2 – Розподілення концентрацій дисперсних часток твердої фази у турбулентному потоці

З наведеного витікає, що розмір часток твердої фази, яка виникає у теплоносії за рахунок гомогенної кристалізації у розчині, має визначальне значення для доставки їх до теплопередаючих поверхней обладнання.

Відносна кількість часток, кінетична енергія поступового руху яких перебільшує U_{\max} , можна знайти за допомогою розподілення Максвелла [9] по значеннях кінетичної енергії поступального руху

$$\frac{n}{n_0} = \frac{2}{(kT)^{3/2} \sqrt{\pi}} \int_{U_{\max}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\sqrt{kT}}\right) \sqrt{\varepsilon} d\varepsilon. \quad (13)$$

З урахуванням (8) отримаємо для потоку часток, що закріплюються на поверхні

$$j^* = \frac{C}{v} \frac{n}{n_0} \left[\frac{\delta_0^3}{3\omega_0} \left(\frac{1}{r^3} - \frac{1}{\delta_0^3} \right) - \frac{1}{\beta v_0} \ln \frac{\delta_0}{d} \right]^{-1}, \quad (14)$$

де C – масова концентрація часток твердої фази в ядрі потоку; v – питомий об'єм дисперсійного середовища.

Висновки. З формули (14) витікає, що швидкість утворення відкладень важкорозчинних сполук на теплопередаючих поверхнях визначається параметрами дисперсної фази, яка утворюється у потоці теплоносія за механізмом гомогенної кристалізації.

Запропонований підхід дуже добре погоджується з експериментальними результатами по утворенню відкладень солей жорсткості у каналі діаметром 20 мм з масовою швидкістю руху теплоносія 1400 кг/(м²·с) концентрації часток 20 мкг/л та концентрації електроліту 0,05 ммоль/л, а також з експлуатаційними результатами по утворенню відкладень на теплопередаючих поверхнях парогенераторів зверхкритичного тиску фірми Бабкок при концентрації часток 100 мкг/л і концентрації електроліту – 0,03 ммоль/л [10].

1. Фридригсберг Д.А. Курс коллоидной химии. – Л.: Химия, 1974. – 420 с.
2. Ландау Л.Д. Собрание трудов \ под редакцией Е.М. Лифшица. – М.: Наука, 1969. – Т. 1. – 420 с.
3. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. – Л.: Наука, 1975. – 576 с.
4. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматгиз, 1959. – 460 с.
5. Третьяков О.В., Крицкий В.Г. Уравнение Оствальда-Фройндлиха и описание гомогенной кристаллизации в растворах с малым пересыщением // Химия и химическая технология: Изв. ВУЗ. – 1989. – Т. 32, № 10. – С. 48-53.
6. Третьяков О.В., Крицкий В.Г. Закономерности гомогенной кристаллизации из растворов // Украинский химический журнал. – 1990. – Т. 56, № 6. – С. 567-571.
7. Кройт Г.Р. Наука о коллоидах. – М.: ИЛ, 1959. – Т. 1. – 390 с.
8. Ефремов И.Ф. Периодические коллоидные структуры. – Л.: Химия, 1971. – 417 с.
9. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1966. – Т. 1. – 530 с.
10. Романов В.А., Калмыков А.Н. Об образовании отложений малорастворимых продуктов коррозии // Энергетика: Изв. ВУЗ. – 1977. – № 7. – С. 62-67.

Отримано 09.12.2013