

УДК 539.3

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СОЛЕЙ В ОМАГНИЧЕННОМ ВОДНОМ ПОТОКЕ¹

Кошоридзе С. И.², Левин Ю. К.³, Яновский Ю. Г.⁴

ANALYSIS OF SALT CRYSTALLIZATION IN A WATER FLOW AFTER MAGNETIC FIELD TREATMENT

Koshoridze S. I., Levin Yu. K., Yanovsky Yu. G.

The working capacity of many hydraulic systems with heat exchangers is closely interconnected with mass transfer of hardness salts in a water flow. Some problems of solution crystallization of hardness salts after magnetic water treatment are discussed. It is shown that the additional decrease of scale formation can be explained by intensification of crystallization on salt particles produced as a result of the magnetic water treatment. The analysis of salt deposit decreasing with time is carried out.

Введение

Вопросы снижения отложения солей жесткости на панелях теплообменников гидротехнических аппаратов с применением магнитной обработки воды активно обсуждаются в литературе. Анализ указанной проблемы предполагает рассмотрение двух самостоятельных задач. Первая связана с выяснением механизма указанных процессов, происходящих в собственно магнитном аппарате, вторая — с оценкой процессов массообмена (кристаллизации) в контуре рециркуляции омагниченной воды. В работах [1–3] были рассмотрены вопросы, касающиеся механизма работы магнитного аппарата (МА). Вторая задача — интенсивность процесса кристаллизации солей в омагниченном водном потоке не нашла достаточно полного решения в известной литературе [4,5], что препятствует научно обоснованному применению этой технологии борьбы с накипью в теплообменных системах.

Таким образом, остается актуальным и важным для реальной практики изучение процесса массообмена (шламообразования) в потоке омагниченной воды.

В настоящей работе проводится анализ процесса шламообразования в канале теплообменника, т. е. в потоке воды после ее выхода из

магнитного аппарата в контур системы. Схему оборотной системы водоснабжения можно представить состоящей из включенных в замкнутый контур магнитного аппарата 1, теплообменника 2, накопительного водяного бака 3, насоса 4 и водоотборного узла 5. Поток J_1 воды 6 извне поступает в схему, как показано на рис. 1. Равный ему поток J_1 отбирается через водоотборный узел 5. Предполагалось, что магнитный аппарат «генерирует» взвешенные кристаллы соли, стимулируя процесс рекомбинации соответствующих ионов [1–3]. При этом в системе под действием насоса 4 постоянно циркулирует поток воды $J \gg J_1$. Условие малости расхода J_1 обеспечивает накопление взвешенных кристаллов в водном потоке с увеличением числа его рециркуляций, что существенно повышает противонакипный эффект магнитной обработки.

Вода в канале теплообменника (труба диаметром d_t) с концентрацией $C(x) = C_0 + \Delta C(x)$ растворенной соли жесткости CaCO_3 имеет перенасыщение $\Delta C(x)$ относительно равновесной концентрации C_0 . Координата x изменяется в пределах $x \in [0, L]$, где L — длина трубы теплообменника. При этом рекомбинация ионов солей жесткости происходит на твердой поверхности — как на взве-

¹Работа выполнена в рамках Программы ОЭ-14 ОЭММПУ РАН «Динамика многофазных и неоднородных жидкостей».

²Кошоридзе Семен Иосифович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института прикладной механики РАН.

³Левин Юрий Константинович, канд. техн. наук, заместитель директора Института прикладной механики РАН.

⁴Яновский Юрий Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, директор Института прикладной механики РАН.

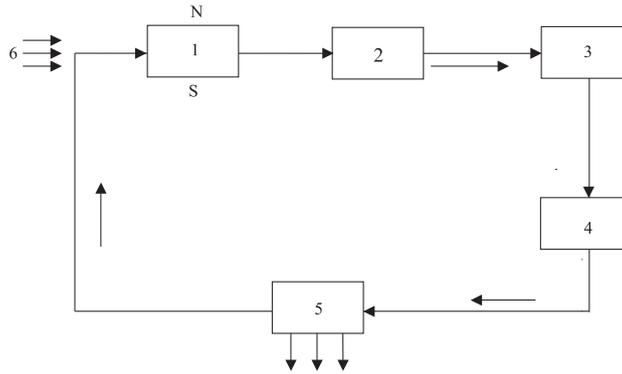


Рис. 1. Схема оборотной системы водоснабжения. 1 — магнитный аппарат; 2 — теплообменник; 3 — накопительный водяной бак, 4 — насос; 5 — водоотборный узел; 6 — поток J_1 воды, поступающий в систему

шенных в водном потоке кристаллах CaCO_3 , так и на стенках канала теплообменника. Поэтому значение $C(x)$ с ростом x постепенно уменьшается, а концентрация кристаллов с эффективным диаметром d_s в воде теплообменника $C_s(x)$ растет. Под концентрацией C и C_s подразумевается массовое содержание растворенной и кристаллической соли CaCO_3 в единице массы воды, соответственно, кг/кг. Соотношение скоростей указанных процессов обозначим коэффициентом $k(x)$, который, очевидно, равен отношению площади суммарной поверхности всех взвешенных кристаллов к площади стенок трубы и определяется следующей формулой:

$$k(x) = 1,5C_s(x) \frac{d_t \rho}{d_s(x) \rho_s}, \quad (1)$$

где ρ, ρ_s , кг/м³ — плотность воды и кристаллов CaCO_3 , соответственно.

При этом полагали, что с ростом x суммарная площадь поверхности всех взвешенных кристаллов изменяется при условии $n_s = \text{const}$ в канале теплообменника.

Уравнения сохранения массы в элементе объема трубки $dx \cdot \pi d^2/4$ для растворенной и кристаллической соли CaCO_3 имеют вид

$$\frac{\pi d_t^2}{4} \rho V_0 C(x) = \frac{\pi d_t^2}{4} \rho V_0 C(x + dx) + j_1 \pi d_t dx (k(x) + 1), \quad (2)$$

$$\frac{\pi d_t^2}{4} \rho V_0 C_s(x) = \frac{\pi d_t^2}{4} \rho V_0 C_s(x + dx) - j_1 \pi d_t k(x) dx. \quad (3)$$

Здесь и далее использованы следующие обозначения: $\rho V_0 C(x)$ и $\rho V_0 C_s(x)$ — плотности

массовых потоков растворенной и кристаллической соли CaCO_3 в водном потоке, кг/м²с, соответственно; $j_1 = \rho \beta \Delta C(x)$ — плотность массового потока растворенной соли CaCO_3 , осаждаемой на твердые поверхности (стенок канала или взвешенных кристаллов), кг/м²с; β — коэффициент массопередачи растворенной соли CaCO_3 , осаждаемой на твердые поверхности, м/с; n_s — число кристаллов, взвешенных в единичном объеме водного потока в канале теплообменника, м⁻³; D — коэффициент диффузии молекул CaCO_3 в воде, м²/с; V_0 — скорость потока воды в канале теплообменника, м/с; ν — кинематическая вязкость воды, м²/с.

В результате преобразований с использованием чисел Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля

$$\text{Nu} = \beta \frac{d_t}{D}; \quad \text{Re} = V_0 \frac{d_t}{\nu}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu}{D},$$

а также известного выражения для эмпирической связи между вышеуказанными характеристиками [4]

$$\text{Nu} = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{1/3}$$

и очевидного соотношения

$$d_s(x) = 2 \sqrt[3]{\frac{6 \rho C_s(x)}{\pi n_s \rho_s}},$$

формулы (2) и (3) приводятся к системе уравнений

$$\frac{d\Delta C(x)}{dx} = -\Delta C(x) 0,092 \text{Re}^{-0,2} \text{Pr}^{-2/3} \frac{1 + k(x)}{d_t}, \quad (4)$$

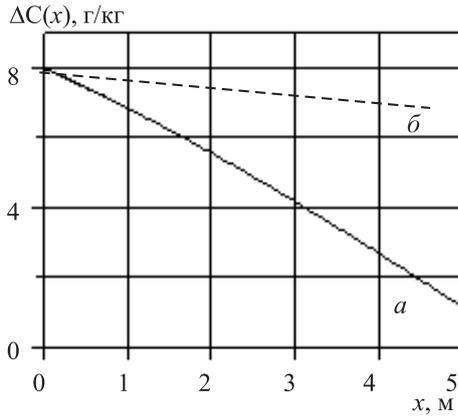


Рис. 2. Зависимость перенасыщения воды $\Delta C(x)$ по CaCO_3 от координаты x ; а) с учетом роста кристаллов в теплообменнике; б) увеличение размеров кристаллов в теплообменнике не учтено

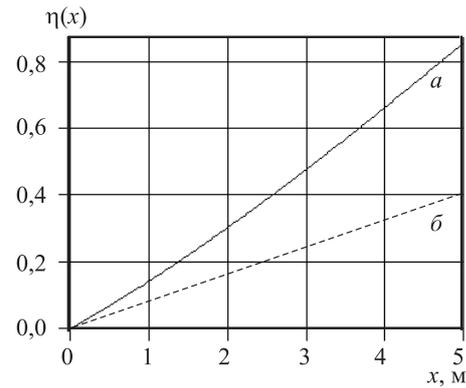


Рис. 3. Зависимость относительного изменения перенасыщения $\eta(x)$ в зависимости от смещения x вдоль канала теплообменника. а) с учетом роста кристаллов в теплообменнике; б) увеличение размеров кристаллов в теплообменнике не учтено

$$\frac{dC_s(x)}{dx} = 0,092\text{Re}^{-0,2}\text{Pr}^{-2/3}k(x)\frac{\Delta C(x)}{d_t}, \quad (5)$$

$$k(x) = d_t \left(1,76n_s C_s^2(x) \frac{\rho^2}{\rho_s^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (6)$$

Следует отметить, что на практике теплообменник имеет следующие типичные значения параметров:

$$\begin{aligned} d_t &= 0,05 \text{ м}; \quad \rho = 1000 \text{ кг/м}^3; \\ C_s(0) &= 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ кг/кг}; \\ n_s &= 2 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}; \\ \rho_s &= 2000 \text{ кг/м}^3, \\ L &= 5 \text{ м}; \quad \text{Re} = 10^7; \quad \text{Pr} = 2000; \\ \Delta C(0) &= 8 \cdot 10^{-3} \text{ кг/кг}. \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом значений (7) численным решением системы (4)–(6) определены величины: $\Delta C(x)$ — избыточной концентрации молекул CaCO_3 в водном потоке; $\eta(x) = \frac{\Delta C(0) - \Delta C(x)}{\Delta C(0)}$ — относительного изменения перенасыщения в канале в зависимости от смещения x вдоль канала теплообменника.

На рис. 2а и рис. 3а представлены зависимости $\Delta C(x)$ и $\eta(x)$.

Полученный результат уточняет решение этой же задачи в работе [4], где ситуация моделировалась единственным уравнением (4), решенным в приближении неизменности размеров кристаллов в канале теплообменника

$$C_s(x), k(x) = \text{const}, \quad (8)$$

чему соответствуют кривые, приведенные на рис. 2б и рис. 3б.

Различие кривых «а» от «б» на рис. 2 и рис. 3 объясняется тем, что рост кристаллов в теплообменнике сопровождается дополнительным снижением жесткости воды и уменьшением отложений солей на его стенках по сравнению с ситуацией в условиях (8).

Следует отметить, что увеличение концентрации кристаллов взвеси $C_s(x)$ соответствует уменьшению отложений на стенках, поскольку поток рекомбинирующих ионов перераспределяется между поверхностью кристаллической взвеси и стенками канала теплообменника. Поэтому рост величины $C_s(x)$ непосредственно отображает снижение отложения солей в теплообменнике и является количественным показателем эффективности магнитной обработки при борьбе с накипеобразованием.

Известно, что влияние магнитной обработки возрастает с течением времени работы МА, «генерирующего» взвешенные кристаллы соли CaCO_3 .

Аналитический расчет концентрации взвешенных кристаллов CaCO_3 в баке 3 после включения МА в зависимости от времени проведен в работе [5] в приближении (8). Однако в реальных условиях (с учетом роста кристаллов в теплообменнике) анализ проводился численным методом. Поскольку аналитическое решение невозможно, предложен метод дискретного анализа с временным шагом $t_{\text{ш}} = 1$ ч, что справедливо с учетом соотношения $\tau \gg t_{\text{ш}}$, где $\tau = \frac{\rho V}{J_1}$ — характерное время процесса накопления кристаллов CaCO_3 в баке [5].

Адекватность дискретного метода покажем на примере расчета концентрации кристаллов в зависимости от числа рециркуляций воды в системе в приближении (8).

Введем параметр n , характеризующий эффективность работы МА, равный отношению массы генерированных кристаллов к общей массе растворенных молекул CaCO_3 , прошедших через МА ($n \ll 1$).

Запишем выражения, определяющие концентрацию C_{V_k} кристаллов CaCO_3 в баке после k -го шага,

$$\begin{aligned} C_{V1} &= \frac{J C n}{\rho V}, \\ C_{V2} &= C_{V1} + C_{V1} \left(1 - \frac{J_1}{\rho V}\right), \\ C_{V_k} &= \frac{J C n}{\rho V} + C_{V_{k-1}} \left(1 - \frac{J_1}{\rho V}\right), \end{aligned}$$

где $k = 2, 3, 4, \dots$, а $C = C(0)$.

Искомую величину C_{V_k} находим как сумму бесконечно убывающей геометрической прогрессии

$$C_{V_k} = \frac{J C n}{J_1} \left[1 - \left(1 - \frac{J_1}{\rho V}\right)^k\right], \quad (9)$$

Видно, что при $k \rightarrow \infty$ концентрация кристаллов CaCO_3 в баке стремится к величине

$$C_V = J C n / J_1, \quad (10)$$

что совпадает с результатами работы [5] и показывает справедливость дискретного подхода.

Расчет концентрации C_{V_k} кристаллов в баке в зависимости от числа рециркуляций $k = 1, 2, 3, \dots$ с учетом изменения их концентрации $C_{s_k}(x)$ в теплообменнике проведем по той же дискретной методике. На каждом шаге находилось численное решение системы (4)–(6).

Приведем выражения, определяющие плотность числа кристаллов n_{sk} в теплообменнике, их концентрацию C_{V_k} в баке и концентрацию кристаллов $C_{sk}(0)$ на входе теплообменника после k -го шага. После первого шага имеем

$$\begin{aligned} n_{s1} &= n_s, \\ C_{V1} &= \frac{J C_{s1}(L)}{\rho V}, \\ C_{s1}(0) &= C n, \end{aligned} \quad (11)$$

после второго шага

$$n_{s2} = n_s \left(2 - \frac{J_1}{\rho V}\right).$$

$$C_{V2} = C_{V1} \left(1 - \frac{J}{\rho V}\right) + C_{s2}(L) \frac{J}{\rho V},$$

$$C_{s2}(0) = \left(\frac{J - J_1}{J} C_{V1} + C n\right)$$

и, после k -го шага

$$\begin{aligned} n_{sk} &= n_s \left[1 + \left(1 - \frac{J_1}{\rho V}\right) + \left(1 - \frac{J_1}{\rho V}\right)^2 + \dots \right. \\ &\quad \left. \dots + \left(1 - \frac{J_1}{\rho V}\right)^{k-1}\right] = \\ &= n_s \left[1 - \left(1 - \frac{J_1}{\rho V}\right)^k\right] \frac{\rho V}{J_1}, \quad (12) \end{aligned}$$

$$C_{V_k} = C_{V_{k-1}} \left(1 - \frac{J}{\rho V}\right) + C_{s_k}(L) \frac{J}{\rho V},$$

$$C_{s_k}(0) = \left(\frac{J - J_1}{J} C_{V_{k-1}} + C n\right),$$

где $k = 2, 3, 4, \dots$, поскольку регулярная зависимость (12) выполняется, начиная со второго шага.

Для типичных параметров теплообменника, магнитного аппарата $n = 0,01$ и системы водоснабжения $V = 1000 \text{ м}^3$, $J = 25 \cdot 10^3 \text{ кг/ч}$, $J_1 = 2 \cdot 10^3 \text{ кг/ч}$ решением системы (12) рассчитано изменение концентрации взвешенных в водяном баке кристаллов CaCO_3 со временем t . Соответствующая кривая $C_V(t)$ представлена на рис. 4а. Результат приближенного расчета по формуле (9) приведен на рис. 4б.

Кривая зависимости $C_V(t)$ на рис. 4а, учитывающая увеличение размеров кристаллов в теплообменнике, растет быстрее, достигает насыщения раньше и более высокого уровня, чем построенная по упрощенной теории [5] кривая рис. 4б с определенным формулой (10) предельным значением C_V .

Заключение

В работе проведен анализ процесса кристаллизации соли CaCO_3 в воде после ее магнитной обработки на основе численного решения системы дифференциальных уравнений. Учтено дополнительное снижение жесткости воды в теплообменнике, связанное с рекомбинацией ионов на кристаллической взвеси.

Рассчитано содержание кристаллической взвеси в баке системы, которое является интегральной характеристикой эффективности применения магнитной обработки воды, поскольку перевод накипи во взвешенную форму

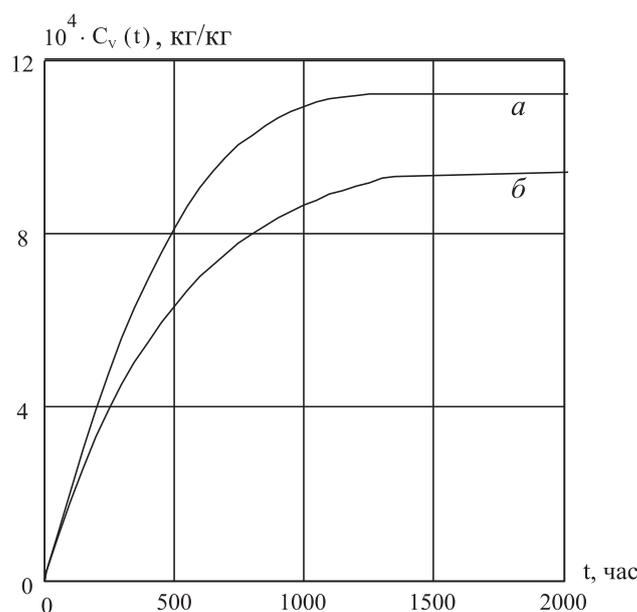


Рис. 4. Зависимость концентрации кристаллов CaCO_3 в водяном баке от времени t : а) с учетом роста кристаллов в теплообменнике; б) увеличение размеров кристаллов в теплообменнике не учтено

препятствует ее осаждению на стенках теплообменника и снижению КПД теплопередачи.

Показано, что при борьбе с образованием накипи реальная эффективность магнитной обработки, определенная с учетом перераспределения потока рекомбинирующих ионов в теплообменнике, на самом деле существенно выше приближенных оценок [4, 5]. При этом достижение максимальных значений концентрации взвеси в накопительном баке системы происходит быстрее, чем ожидалось по упрощенной оценке теории [5].

Кроме того, есть основания ожидать реальный противонакипный эффект еще более высоким. Это поясняется тем, что в реальной ситуации скорость рекомбинации ионов на поверхности взвешенных кристаллов выше, чем на поверхности теплообменника из-за их большей конформности с аутогенной поверхностью кристаллов CaCO_3 по сравнению с металлической поверхностью стенки теплообменника (из-за большего значения энергии когезии кристаллов CaCO_3 по сравнению с энергией их адгезии к материалу стенки теплообменника, например, Fe_2O_3 или Fe_3O_4).

Литература

1. Кошоридзе С. И., Левин Ю. К., Полотнюк О. Я., Шафранова Е. И., Яновский Ю. Г. Механизм воздействия магнитного поля на кристаллизацию солей в водном потоке // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2006. № 4. С. 77–81.
2. Кошоридзе С. И., Левин Ю. К., Полотнюк О. Я., Шафранова Е. И., Яновский Ю. Г. Влияние магнитного поля на кристаллизацию солей в водном потоке // Тез. докл. 12-я Междунар. конф. по магнитным жидкостям (30 августа – 2 сентября 2006 г.) Плес, С. 256–261.
3. Кошоридзе С. И., Левин Ю. К., Полотнюк О. Я., Шафранова Е. И. Процессы массообмена и гидродинамики водного потока в магнитном поле // Современные проблемы механики гетерогенных сред: Сборник трудов. Т. II. М.: ИПРИМ РАН, 2005. С. 205–210.
4. Мартынова О. И., Копылов А. С., Кашинский В. И., Очков В. Ф. Расчет противонакипной эффективности ввода затравочных кристаллов в теплоэнергетических устройствах // Теплоэнергетика. 1979. № 9. С. 21–25.
5. Очков В. Ф., Гузеева А. А., Кашинский В. И. Особенности применения некоторых методов ограничения карбонатных отложений в прямоточных и оборотных системах водоснабжения // Труды МЭИ. 1980. Вып. 466. С. 39–47.