

УДК 532

МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ СОЛЕЙ В ВОДНОМ ПОТОКЕ¹

Кошоридзе С. И.², Левин Ю. К.³, Полотнюк О. Я.⁴, Шафранова Е. И.⁵, Яновский Ю. Г.⁶

THE MECHANISM OF MAGNETIC FIELD EFFECT ON SALT CRYSTALLIZATION IN WATER FLOW

Koshoridze S. I., Levin Yu. K., Polotnuk O. Ya., Shafranova E. I., Yanovsky Yu. G.

The working capacity of many hydraulic devices is intimately interconnected with mass transfer and hydrodynamics processes therein, particularly with deposition of hardness salts on panels of heat exchangers.

Some problems bound with principles of magnetic water treatment are discussed. It is shown that the decrease of a scale formation can be explained by redistribution of salt-forming ions concentration when a non-homogeneous magnetic field of a particular configuration is used. The analysis of the optimum configuration of this field is carried out. The so-called "storage effect" of magnetized water solution is discussed.

Введение

Работоспособность гидротехнических аппаратов и протекающие в них процессы массообмена, приводящие к отложению солей жесткости на панелях теплообменников, исследовались в течение полувека. Высказано множество гипотез, поясняющих механизмы указанных процессов, однако единой теоретической концепции, достаточно согласованной с накопленным экспериментальным материалом, пока не выработано.

Как известно, в водонагревательных промышленных установках основная часть накипи по своему химическому составу представляет собой карбонат кальция CaCO_3 . Поэтому влияние магнитной обработки на свойства выпадающего в осадок CaCO_3 изучалось наиболее интенсивно [1–8].

В частности, было установлено, что магнитная обработка воды в ряде случаев снижает интенсивность накипеобразования на теп-

лопередающей стенке за счет усиления шлакообразования в водном объеме. Механизм этого явления и процессы, протекающие в зазоре магнитного аппарата, изучены недостаточно полно, что препятствует научно обоснованному применению этой технологии борьбы с накипью в теплообменных системах [1].

Таким образом, по-прежнему актуален основной вопрос реальной практики о причинах снижения осадка на стенках теплообменника при омагничивании водного потока.

1. Изменение концентрации ионов под действием неоднородного магнитного поля

В настоящей работе обсуждаются причины уменьшения накипи в условиях, когда магнитная обработка производится неоднородным поперечным магнитным полем. В этом случае перераспределение концентрации рекомбинирующих в водном потоке ионов Ca^{+2}

¹Работа выполнена при поддержке РФФИ (04-03-32365).

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.

⁴Полотнюк Олег Ярославович, канд. хим. наук, старший научный сотрудник Института прикладной механики РАН.

⁵Шафранова Елена Иосифовна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник Института прикладной механики РАН.

⁶Яновский Юрий Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, директор Института прикладной механики РАН.

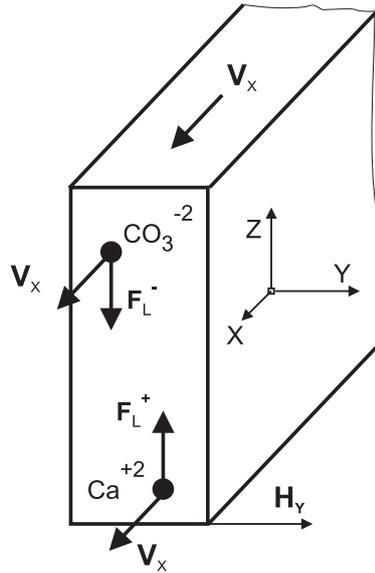


Рис. 1. Иллюстрация геометрических характеристик системы магнитной обработки воды

и CO_3^{-2} происходит под действием силы Лоренца \vec{F}_l , которая определяется известной формулой

$$\mathbf{F}_l = \mu_0 q e [\mathbf{V}\mathbf{H}], \quad (1.1)$$

где μ_0 — константа магнитной проницаемости; q — кратность заряда иона; e — заряд электрона; $\mathbf{V} = \mathbf{x}_0 V$ — скорость течения жидкости с компонентами $\{V, 0, 0\}$ в системе координат x, y, z с осями $\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0$; $\mathbf{H} = \mathbf{y}_0 H$ — напряженность магнитного поля с компонентами $\{0, H, 0\}$, при этом также положим: $\mathbf{H} = \text{const}(x, y)$, $\mathbf{H} = \mathbf{H}(z)$.

Для иллюстрации воздействия силы Лоренца на ионы обратимся к рис. 1, где показано, что при направлении водного потока вдоль оси x , а магнитного поля вдоль оси y вектор скорости ионов Ca^{+2} приобретает поперечную компоненту скорости — вдоль оси z . Соответственно, скорость ионов CO_3^{-2} будет иметь противоположное направление.

Известно, что скорость дрейфа ионов $\mathbf{V}_{\text{др}}(z)$ в поле некоторой силы, в нашем случае — силы Лоренца, определяется формулой [9]

$$\mathbf{V}_{\text{др}}(z) = \eta \mathbf{F}_l(z), \quad (1.2)$$

где η — подвижность иона, определяемая выражением

$$\eta = \tau / m, \quad (1.3)$$

где τ — среднее время между столкновениями иона с другими молекулами в растворе; m — масса иона.

Пусть в слое толщиной dz распределены ионы с концентрацией n . В ходе дрейфа в по-

ле сил $\mathbf{F}_l(z)$, с учетом его неоднородности, интервал dz за время dt изменяется на величину $dV_{\text{др}}(z)dt$. Очевидно, концентрация ионов в этом слое обратно пропорциональна его толщине, что выражается соотношением

$$\frac{n}{n + dn} = \frac{dz + dV_{\text{др}}(z)dt}{dz},$$

приводящимся к следующему уравнению

$$\frac{dV_{\text{др}}(z)}{dz} dt + \frac{dn}{n} = 0.$$

Решение данного уравнения имеет вид

$$n = n_0 \exp \frac{-dV_{\text{др}}(z)}{dz} t,$$

где n_0 — концентрация ионов в начальный момент времени $t = 0$.

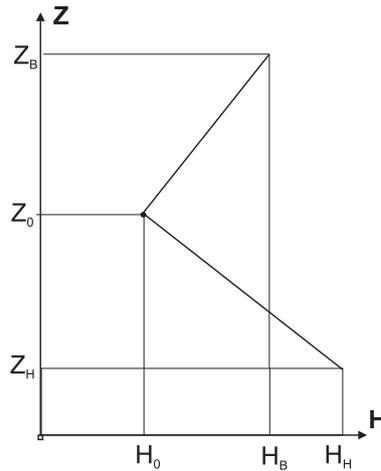
Отсюда следует условие повышения концентрации ионов при их дрейфе в магнитном поле:

$$\frac{dV_{\text{др}}(z)}{dz} < 0.$$

Конечно, для ионов с противоположными зарядами одновременно в одной точке пространства это условие невыполнимо. Поэтому следует обеспечить выполнение этого условия раздельно — для катионов Ca^{+2} в нижней половине сечения потока, а для анионов CO_3^{-2} — в верхней половине.

На рис. 2 представлена зависимость напряженности магнитного поля для нижнего и верхнего полусечений потока в виде функций $H_H(z)$ и $H_B(z)$ соответственно

$$H_H(z) = H_0 + \Delta H_H |Z - Z_0|, \quad (1.4)$$


 Рис. 2. Вид неоднородности магнитного поля $H_Y(z)$ в объеме водного потока

$$H_B(z) = H_0 + \Delta H_B |Z - Z_0|, \quad (1.5)$$

где $H_H = H_0 + \Delta H_H$ и $H_B = H_0 + \Delta H_B$ — значения магнитного поля на верхней и нижней границах водного потока, имеющих z -координаты, соответственно, Z_H и Z_B ; $Z_0 = \frac{Z_H + Z_B}{2}$ — координата средней линии потока по оси z .

Тогда приходим к желаемому результату: под действием магнитного поля ионы противоположных знаков Ca^{+2} и CO_3^{-2} движутся навстречу друг другу в объеме водного потока. С приближением к оси их концентрация постоянно нарастает. Как известно, количество кристаллизованного вещества связано с произведением концентраций ионов в растворе следующим выражением [9]:

$$K_D = \frac{[A^+][B^-]}{[AB]},$$

где K_D — константа равновесия, A^+ и B^- — концентрации положительно и отрицательно заряженных ионов (катионов и анионов).

Отсюда следует, что в осевой части потока, т.е. при $z = Z_0$, где произведение концентраций $[\text{Ca}^{+2}] \cdot [\text{CO}_3^{-2}]$ будет максимальным, обеспечивается лавинообразное протекание процесса формирования зародышей — центров кристаллизации и их быстрого роста. При этом в верхнем и нижнем пристеночных слоях ($Z = Z_H$ и $Z = Z_B$) произведение концентраций $[\text{Ca}^{+2}] \cdot [\text{CO}_3^{-2}]$ будет снижаться вследствие неоднородного распределения ионов в объеме из-за их дрейфа в поле силы Лоренца. У одной из стенок это относится, например, к ионам CO_3^{-2} , у другой — к ионам Ca^{+2} . Но в том и другом случаях вблизи стенки про-

изведение концентраций $[\text{Ca}^{+2}] \cdot [\text{CO}_3^{-2}]$, определяющее скорость процесса кристаллизации, уменьшается.

Этим могут обеспечиваться экспериментально наблюдаемые в неоднородном магнитном поле эффекты усиления шлакообразования в объеме раствора и снижения образования накипи на стенках теплообменников.

Условию оптимальности рассматриваемого процесса рекомбинации ионов в толще водной среды соответствует, очевидно, равенство скоростей дрейфа $V_{др}^+(z)$ для ионов Ca^{+2} и $V_{др}^-(z)$ для CO_3^{-2} . Приравняем выражения для скоростей дрейфа указанных ионов, используя формулу (1.2):

$$\eta^+ \mathbf{F}_L^+(z) = \eta^- \mathbf{F}_L^-(z), \quad (1.6)$$

где η^+ и η^- — подвижности ионов Ca^{+2} и CO_3^{-2} , соответственно.

Из формул (1.3) и (1.6), получим

$$\mathbf{F}_L^+(z) / \mathbf{F}_L^-(z) = m^+ / m^-,$$

где массы m^+ и m^- указанных ионов — 40 и 60 ед. [10], соответственно.

Отсюда с учетом (1.4) и (1.5) получаем формулу

$$(H_0 + \Delta H_B) / (H_0 + \Delta H_H) = 0,67,$$

позволяющую найти оптимальное соотношение, связывающее степень неоднородности напряженности магнитного поля H_B , т.е. $\text{grad } H_B$ в верхнем полусечении потока и H_H , т.е. $\text{grad } H_H$ в нижнем полусечении, а также H_0 и сечение потока $\Delta Z = Z_B - Z_H$

$$|\text{grad } H_B| = 0,67 |\text{grad } H_H| - 0,33 \frac{2H_0}{\Delta Z}.$$

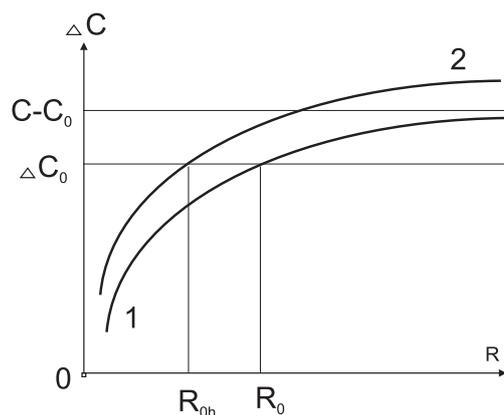


Рис. 3. Зависимости $\Delta C(R)$ [4]: кривая 1 — в отсутствие магнитного поля ($\Delta h = 0$), кривая 2 — после его наложения ($\Delta h > 0$)

2. Объяснение эффекта «памяти» при магнитной обработке

Рассмотрим поведение вновь сформированных кристаллических зародышей после их выхода из зоны магнитной обработки и покажем, что «память» о магнитной обработке раствора сохраняется в его новых кинетических характеристиках.

Пересыщение раствора ΔC , определяющее скорость роста кристаллов CaCO_3 , согласно работе [4], описывается выражением

$$\Delta C = C - C_0 \exp\left(\frac{a}{R} - \Delta h\right), \quad (2.1)$$

где C — концентрация соли в растворе; C_0 — номинальная растворимость; a — численный коэффициент, определяемый экспериментально; R — радиус частицы; Δh — феноменологический параметр, отображающий влияние магнитного поля на степень пересыщения раствора, причем предполагалось, что скорость изменения радиуса частицы пропорциональна перенасыщению раствора: $dR(t)/dt \approx \Delta C$.

Зависимость $\Delta C(R)$ представлена на рис. 3 (кривая 1, соответствует отсутствию магнитного поля, т. е. при значении $\Delta h = 0$ в выражении (2.1)).

Этот рисунок, в частности, интересен тем, что позволяет наглядно отобразить смысл характеристики «растворимость». Она справедлива лишь вблизи бесконечной границы (поверхности) раздела жидкой и твердой фаз, т. е. при радиусе частицы $R \rightarrow \infty$. Для малых частиц величина пересыщения становится меньше номинального значения растворимости, а при $R < R_0 = \frac{a}{\ln \frac{C}{C_0}}$ (на основании уравнения (2.1) раствор становится даже ненасыщен-

ным, и частицы начинают растворяться, причем тем быстрее, чем меньше их радиус.

Преобразованием формулы (2.1) получаем

$$\Delta C = \Delta C_0 + C_0 \Delta h \exp\left(\frac{a}{R}\right),$$

где ΔC отвечает $\Delta h > 0$, а $\Delta C_0 - \Delta h = 0$. Отсюда следует, что зависимость $\Delta C(R)$ (кривая 1 на рис. 3) после наложения магнитного поля $\Delta h > 0$ сдвигается вверх на величину $C_0 \Delta h \exp\left(\frac{a}{R}\right)$ (кривая 2 на рис. 3).

При этом на величину

$$\frac{a \Delta h}{\left(\ln \frac{C}{C_0}\right) \left(\ln \frac{C}{C_0} + \Delta h\right)}$$

уменьшается значение радиуса частицы, соответствующего динамически равновесному состоянию системы раствор/кристалл, когда размер частиц не меняется во времени.

Таким образом, после выхода из зоны магнитной обработки кристаллы CaCO_3 имеют увеличенные размеры и им, как показано на рис. 3, соответствует большая степень пересыщения. С учетом вышеизложенного в результате магнитной обработки кинетика раствора соли CaCO_3 должна сдвигаться в сторону выделения твердой фазы из раствора, что действительно подтверждается реальной практикой [1].

Заключение

Использование неоднородного поперечного магнитного поля специальной конфигурации позволяет в приосевой области движущегося потока воды направленно изменять концентрацию ионов Ca^{+2} и CO_3^{-2} , создавая тем

самым условия для их ускоренной рекомбинации и образования центров кристаллизации. Как следствие, снижается концентрация ионов как в объеме, так и в пристеночной области водного потока, что снижает образование накипи на стенках теплообменника.

Известное явление магнитной «памяти», т. е. сохранения эффекта магнитной обработки после окончания воздействия магнитного поля, можно объяснить изменением размера кристаллов соли в зоне магнитной обработки с учетом зависимости пересыщения раствора от указанного параметра.

Литература

1. *Класен В. И.* Омагничивание водных систем. М.: Химия, 1982. 296 с.
2. *Бондаренко Н. Ф., Гак Е. З.* Электромагнитные явления в природных водах. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 187 с.
3. *Дерягин Б. В., Чураев Н. В.* Новые свойства жидкостей. М.: Наука, 1971. 162 с.
4. *Михельсон М. Л.* Определение скорости роста и растворения кальцита в омагниченном водном растворе бикарбоната кальция // Коллоидный журнал. 1977. Т. 38. № 4. С. 821–822.
5. *Михельсон М. Л.* Проявление силы Лоренца при совместном и раздельном воздействии электрических и магнитных полей на растворы // Коллоидный журнал. 1977. Т. 39. № 3. С. 577–578.
6. Физико-химическая механика дисперсных структур в магнитных полях / Под. ред. Круглицкого Н. Н. Киев: Наукова думка, 1976. 241 с.
7. *Богорош Т.* Вопросы накипеобразования. Киев: Выща шк., 1990. 92 с.
8. *Присяжнюк В. А.* Физико-химические основы предотвращения кристаллизации солей на теплообменных поверхностях // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2003. № 10. С. 26–30.
9. *Фейнман Р. и др.* Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1965. 335 с.
10. *Паничев С. А., Юффа А. Я.* Химия. Основные понятия и термины. М.: Химия, 2000. 544 с.
11. *Глинка Н. Л.* Общая химия. Л.: Химия, 1972. 712 с.

Статья поступила 20 июня 2006 г.

Институт прикладной механики РАН, г. Москва

© Кошоридзе С. И., Левин Ю. К., Полотнюк О. Я., Шафранова Е. И., Яновский Ю. Г., 2006