УДК 532.516

МЕХАНИЗМ СНИЖЕНИЯ НАКИПИ ПРИ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКЕ ВОДНОГО ПОТОКА

Кошоридзе С.И., Левин Ю.К.

ФГБУН «Институт прикладной механики» Российской академии наук, Москва, e-mail: iam-ras@mail.ru

В работе рассматривается поведение пересыщенного раствора солей накипи $CaCO_3$ после магнитной обработки водного потока. Объяснен известный на практике факт снижения накипи, которое является следствием существенного изменения характера процессов массопереноса и фазовых трансформаций в омагниченном водном потоке. Предложена физическая модель, согласно которой после магнитной обработки коллоидный раствор теряет устойчивость из-за деформации двойного электрического слоя (ДЭС) и в нем начинается коагуляция критических зародышей. В растворе возникают частицы с радиусом больше критического, для которых степень пересыщения раствора повышается. Этим стимулируется гетерогенная кристаллизация молекул $CaCO_3$ на взвесь. Поверхность взвеси конкурирует с поверхностью стенок теплообменника не только за счет своей площади, но и за счет существенно большего коэффициента массопереноса на взвесь по сравнению с массопереносом на стенки трубы. Массоперенос молекул $CaCO_3$ на частицы взвеси происходит по модели молекулярной диффузии на неподвижную сферу, поскольку эти частицы перемещаются вместе с потоком. Этот процесс существенно превышает сорбцию на стенки, которая происходит по модели массопереноса при ламинарном течении в круглой трубе. Убыль концентрации критических зародышей из-за коагуляции восполняется в процессе гомогенной генерации зародышей из пересыщенного раствора, что также увеличивает кристаллизацию на взвеси. Дополнительное усиление противонакипного эффекта обеспечивается и размерными эффектами – снижением удельной энергии образования новой поверхности и уменьшением критического радиуса зародышей при их гомогенной генерации. Количественные оценки формирования накипи в омагниченном водном потоке приводят к результирующему противонакипному эффекту, согласующемуся с экспериментом, что подтверждает предложенную авторами гипотезу о механизме магнитной обработки воды. Результаты имеют важное практическое значение для повышения энергоэффективности гидротермических установок.

Ключевые слова: кристаллизация, накипь, зародышеобразование, молекулярная диффузия, константа Толмена

THE MODEL OF REDUCING THE SCALE WITH MAGNETIC TREATMENT OF WATER FLOW

Koshoridze S.I., Levin Y.K.

Institute of Applied Mechanics Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: iam-ras@mail.ru

In this paper we considered the behavior of a supersaturated solution of $CaCO_3$ after magnetic treatment of water flow. Explained by the well-known fact that, in practice, a significant change in the nature of mass transfer and phase transformations in supersaturated water flow when the magnetic treatment. A physical model, according to which, after the magnetic treatment of the colloidal solution becomes unstable due to the deformation of the electrical double layer (EDL), and it starts coagulation critical nuclei. In solution, there are particles with a radius greater than the critical value, for which the degree of supersaturation of the solution increases. This stimulated heterogeneous crystallization of molecules on the suspension of $CaCO_3$. Surface slurry competes with the surface of the walls of the heat exchanger not only due to its area, but also due to a considerably larger mass transfer coefficient for the slurry as compared to the mass transfer at the pipe wall. Mass transport of molecules into particles of $CaCO_3$ slurry occurs by molecular diffusion pattern on a stationary sphere, because these particles move with the flow. This process is significantly higher than the sorption on the walls, which occurs on the model of mass transfer in laminar flow in a circular pipe. Decrease of the critical nucleation concentration of coagulation is compensated for in the generation of homogenous nucleation of the supersaturated solution, which also increases the crystallization slurry. Additional strengthening antiscaling effect is provided be size effects – decrease the specific energy of formation of a new surface and a decrease in the critical radius of nuclei in their homogeneous generation. Quantitative estimates of the formation of scale in the magnetized water flow leads to the result antiscaling effect, consistent with the experiment that confirms the hypothesis proposed by the authors of the mechanism of magnetic water treatment. The results are of practical importance to improve the energy efficiency of hydrothermal systems.

Keywords: crystallization, scale, nucleation, molecular diffusion, constant of Tolman

В 1936 году бельгийский инженер Т.И.С. Вермейрен обнаружил, что при нагревании воды, пересекшей силовые линии магнитного поля, на теплообменной поверхности не образуется накипь (отложение, инкрустация). Первый в мире патент на аппарат магнитной обработки воды был выдан Т.И.С. Вермейрену 01.10.1946 г.

С тех пор началось активное применение магнитных полей для обработки жидкостей, главным образом в теплоэнергетике, где каждый миллиметр осадка на стенке нагревательного котла снижает мощность нагрева на 5%. В общемировых масштабах годовой ущерб составляет многие миллиарды долларов. Однако долгое время наука

не могла понять причины проявления этого эффекта, поскольку вода, как считалось, не обладает магнитными свойствами. Из-за отсутствия на сегодняшний день удовлетворительной теории количественно предсказывать результаты магнитной обработки воды (МОВ) затруднительно. В данной работе представлена гипотеза, поясняющая механизм снижения накипи и позволяющая делать адекватные количественные оценки противонакипного эффекта при омагничивании водного потока.

Широко известно объяснение противонакипного эффекта МОВ на основе теории ДЛФО (Дерягин, Ландау, Фервей, Овербек) [5], согласно которой сила Лоренца деформирует двойной электрический слой (ДЭС) коллоидной частицы (КЧ), вызывая коагуляцию коллоидного раствора [1].

На рис. 1 показана положительно заряженная коллоидная частица $CaCO_3$, находящаяся в водной среде. Ее заряд создают так называемые потенциалообразующие или ко-ионы Ca^{2+}, $CaCO_3$, которые химически закреплены на поверхности частицы. Вокруг коллоидной частицы расположен очень тонкий слой Штерна (порядка 1–2 атомных размеров), содержащий кроме потенциалообразующих ионов также захваченные отрицательные противоионы HCO_3^-. Дальше в водном растворе, окружающем коллоидную частицу, расположен диффузионный слой, состоящий преимущественно из анионов бикарбоната кальция HCO_3^-.

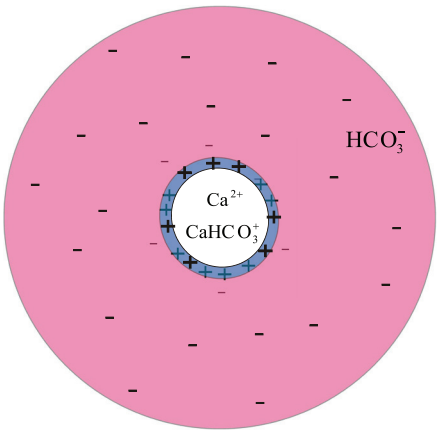

Рис. 1. Строение двойного электрического слоя коллоидной частицы $CaCO_3$

Согласно теории ДЛФО взаимодействие двух заряженных частиц обусловлено как силами молекулярного притяжения, так и силами электрического отталкивания. Суперпозиция этих сил для энергии взаимодействия дает формулу

$$E = E_1 + E_2, \qquad (1)$$

где лондоновская энергия притяжения определяется формулой Гамакера:

$$E_1 = -\frac{k_{\text{Н}}}{6}\cdot\left[\frac{2}{s^2-4}+\frac{2}{s^2}+\ln\left(1-\frac{4}{s^2}\right)\right], \qquad (2)$$

а выражение для кулоновской энергии отталкивания следующее:

$$E_2 = \frac{\varepsilon_0\,\varepsilon\cdot a\cdot\psi_d^2}{2}\ln\left[1+\exp(-a(s-2)\chi)\right], \qquad (3)$$

где ψ_d – электростатический потенциал на границе штерновского и диффузионного слоев, который почти во всех теоретических работах приравнивается к электрокинетическому потенциалу коллоидной частицы; $k_{\text{Н}}$ – константа Гамакера; ε_0 – электрическая константа; ε – диэлектрическая постоянная для воды; $s = \frac{l}{a}$, где l – расстояние между центрами частиц эффективного радиуса a; $\chi = \sqrt{\frac{2F^2z^2c}{\varepsilon_0\varepsilon RT}}$ – обратная длина Дебая; F – число Фарадея; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; z – степень ионизации ионов; c – мольная концентрация ко-ионов вдали от коллоидной частицы.

Для эксперимента, описанного в [9], имеем: $T = 300\ K$, $C = 2{,}6$ моль/м^3, $z = 2$, длина Дебая $1/\chi = 3{,}07\cdot10^{-9}$ м. Из-за высокого потенциального барьера электрического отталкивания коагуляция обычно не происходит и коллоидный раствор стабилен [4]. Согласно [5] вероятность коагуляции определяется безразмерной величиной $1/W$, где W – так называемый коэффициент замедления

$$W = 2\cdot\int_2^\infty \frac{\exp\left[\frac{E(s)}{k_B T}\right]}{s^2}\,ds. \qquad (4)$$

В стабильном коллоидном растворе $W >> 1$.

Расчеты, проведенные по формулам (1)–(4) в условиях эксперимента [9] ($B = 0{,}2$ Т, $\tau_0 = 0{,}25$ с, $v = 2$ м/с), показали [3, 4], что после магнитной обработки начинается интенсивная коагуляция и раствор теряет устойчивость. Частицы укрупняются, раствор для них становится пересыщенным и поток кристаллизации молекул солей жесткости перераспределяется от стенок трубы к взвеси. Таким образом, МОВ за счет деформации двойного электрического слоя коллоидных частиц вызывает коагуляцию. Это первый фактор, запускающий комплексный механизм МОВ.

Для дальнейшего анализа полезно подробнее рассмотреть поведение зародыша $CaCO_3$ радиуса r в пересыщенном растворе. По отношению к критическому зародышу ($r = r_{cr}$) раствор не имеет пересыщения, и такой зародыш с равной вероятностью может сорбировать на своей поверхности молекулу из раствора либо десорбировать молекулу со своей поверхности. После сорбции зародыш становится закритическим ($r > r_{cr}$), далее монотонно растет и переходит в осадок. После десорбции зародыш становится докритическим ($r < r_{cr}$) и снова исчезает. Итак, наиболее устойчивая форма твердой фазы в растворе – критические зародыши, но гетерогенной кристаллизации из раствора, по определению, на них не происходит.

Итак, важно отметить, что с началом коагуляции в результате магнитной обработки водный поток приобретает новое качество – в нем возникает твердая фаза надкритического размера. Ее поверхность начинает конкурировать с поверхностью теплообменника в процессе выпадения солей накипи из пересыщенного раствора. Понятно, чем больше площадь поверхности взвеси, тем большая часть общей массы накипи оседает на ней и, соответственно, меньше накипи оседает на стенке теплообменника. Это второй фактор, участвующий в механизме противонакипного эффекта МОВ.

Величина критического радиуса r_{cr0}, согласно уравнению Гиббса – Томсона [5], определяется выражением

$$r_{cr0} = \frac{2\sigma_{s.l} M}{RT\rho \ln\left(\frac{c}{c_0}\right)}, \qquad (5)$$

где $c_0 = 0{,}14$ моль/м^3 – равновесная мольная концентрация кальцита в воде; $M = 0{,}1$ кг/моль – молярная масса $CaCO_3$; $\rho = 2711$ кг/м^3 – плотность твердой фазы; $\sigma_{s.l}$ – поверхностное натяжение на плоской границе твердая фаза/жидкость.

Краевой угол смачивания плоской границы раздела твердая фаза (кальцит) – жидкость (вода) равен $\vartheta = 20°$, тогда легко показать, что $\sigma_{s.l} = 0{,}16$ Дж/м^2 [3]. Однако, как показано в [7], при гомогенной генерации зародышей малого радиуса проявляется размерный эффект – при наличии протяженной межфазной области, соизмеримой с радиусом наночастицы, заметное влияние оказывает толщина поверхностного слоя, характеризуемая константой Толмена δ. При этом процесс гомогенного формирования наноразмерного зародыша определяется эффективным значением σ_{eff}, которое зависит от δ и существенно снижается, облегчая рождение новых зародышей в пересыщенном растворе. Радиус реального критического зародыша вычисляется по формуле

$$r_{cr} = \frac{r_{cr0}}{2} \cdot \left(1 - \frac{4\delta}{r_{cr0}} + \sqrt{\frac{4\delta + r_{cr0}}{r_{cr0}}}\right),$$

где параметр δ принимает значения в интервале $0 \le \delta \le 1{,}5 r_{cr0}$ (r_{cr0} – значение радиуса критического зародыша, соответствующее (5)). Зависимость радиуса критического зародыша r_{cr} от безразмерного параметра Толмена δ/r_{cr0} дана на рис. 2.

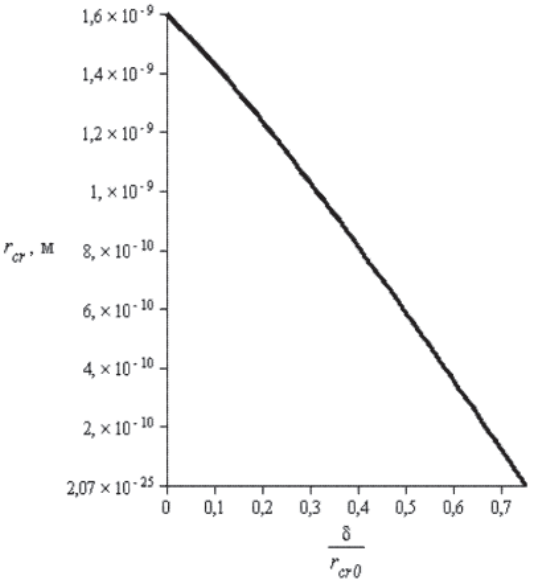

Рис. 2. Зависимость радиуса критического зародыша r_{cr} от нормированного параметра Толмена δ/r_{cr0}

Зависимость поверхностного натяжения σ_{eff} от радиуса критического зародыша r_{cr} с учетом размерного эффекта аппроксимирована формулой Толмена [7]:

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma_{l.s}}{1 + \frac{2\delta}{r_{cr}}}$$

и показана на рис. 3. Энергия Гиббса образования зародыша с радиусом r [6]:

$$\Delta G(r) = \frac{4\pi r^3 \sigma_{l.s}}{3}\left(\frac{3}{r + 2\delta} - \frac{2}{r_{cr0}}\right).$$

Будем считать, что в водном растворе соли $CaCO_3$ присутствуют лишь зародыши с размером, близким к критическому: большие зародыши отсутствуют ввиду малой вероятности их образования, а маленькие исчезают сразу после появления. Если разложить функцию $\Delta G(r)$ по малому параметру ($r - r_{cr}$), сохраняя только квадратичные члены, и учесть, что первая производная

по определению в точке максимума равна нулю, можно написать

$$\Delta G(r) = \Delta G_{cr} + \left.\frac{d^2\Delta G}{dr^2}\right|_{r=r_{cr}} \cdot (r - r_{cr})^2.$$

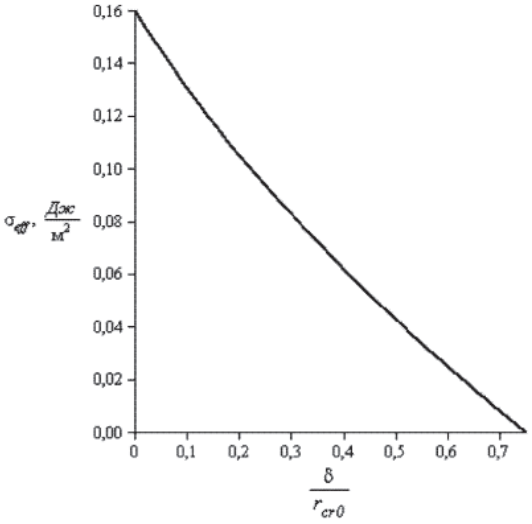

Рис. 3. Зависимость эффективного поверхностного натяжения σ_{eff} от нормированной константы Толмена δ/r_{cr0}

Тогда для функции распределения зародышей с размерами, близкими к критическому, получим выражение

$$f(r) = \frac{r_{cr}^{\ 2}}{V_L \cdot V_S} \exp\left(-\frac{\Delta G_{cr}}{k_B T}\right) \exp\left[\frac{b(r - r_{cr})^2}{2k_B T}\right],$$

где $V_L = \dfrac{1}{cN_A}$; $V_S = \dfrac{M}{\rho N_A}$ – объемы, приходящиеся на одну молекулу $CaCO_3$ в воде и зародыше; N – число молекул в критическом зародыше. Величина b определяется по формуле

$$b = -\left.\frac{d^2\Delta G}{dr^2}\right|_{r=r_{cr}} > 0.$$

Радиус критического зародыша лежит в критической области, где значение свободной энергии Гиббса лежит в диапазоне, определяемом величиной тепловой флуктуации $k_B T$:

$$r_{cr} - \delta r_{cr} \le r \le r_{cr} + \delta r_{cr},$$

где $\delta r_{cr} = \sqrt{\dfrac{k_B T}{4\pi\sigma_{eff}}}$.

Тогда концентрация критических зародышей определяется интегралом

$$n = \int_{r_{cr}-\delta r_{cr}}^{r_{cr}+\delta r_{cr}} f(r)dr, \qquad (6)$$

график которого приводится на рис. 4.

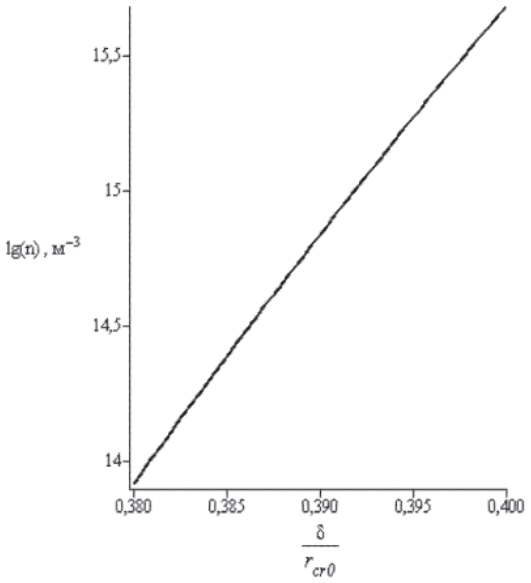

Рис. 4. Зависимость концентрации критических зародышей (в логарифмическом масштабе) от нормированной константы Толмена δ/r_{cr0}

Как и ожидалось, влияние размерного эффекта уменьшает величину поверхностного натяжения и радиус критических зародышей, увеличивая их концентрацию в растворе. Соответственно, ускоряется процесс кристаллизации солей накипи на взвесь, чем усиливается эффект МОВ. Таким образом, размерный эффект вносит существенный вклад в уменьшении накипи при МОВ. Это третий фактор, участвующий в механизме противонакипного эффекта МОВ.

При отсутствии магнитного поля весь поток I_{10} (моль/с) молекул $CaCO_3$ осаждается на стенки теплообменной трубы в соответствии с формулой

$$I_{10} = \beta_I L\pi d(C - C_0),$$

где πLd – площадь поверхности трубы диаметра d и длины L.

Коэффициент массопередачи β_1 на поверхность стенки теплообменника (м/с) зависит от гидродинамических характеристик потока в канале и для турбулентного потока в круглой трубе описывается выражением [6]:

$$\beta_1 = 0{,}023\mathrm{Re}^{-0,2}\,\mathrm{Pr}^{-2/3}\,v.$$

Здесь Re и Pr – числа Рейнольдса и Прандтля, а v – скорость водного потока в трубе.

После магнитной обработки тот же самый поток молекул распределяется между взвесью и стенкой пропорционально их площадям и коэффициентам массопередачи, причем размер частиц взвеси и пересыщение раствора по отношению к этим частицам изменяется в ходе коагуляции, и на каждом k-м ее этапе определяется теорией быстрой коагуляции Смолуховского [5]. С учетом этого поток молекул $I_{2\text{mag}}$ (моль/с) на поверхность кристаллов, взвешенных в водном потоке, вычисляется по формуле

$$I_{2mag} = \sum_{k=2} I_{2kmag} = \sum_{k=2} \beta_2 S_k (c - c_k), \quad (7)$$

где β_2 – коэффициент массопередачи между жидкостью и зародышем радиуса r. Следует отметить, что коэффициент массопередачи солей накипи на поверхность взвеси рассчитывается иначе, чем на стенки теплообменника. Процесс осаждения накипи на взвесь не связан с гидродинамикой, поскольку частицы взвеси переносятся вместе с потоком жидкости, поэтому массообмен протекает за счет молекулярной диффузии и эквивалентен массопереносу на твердую сферу в неподвижной среде. В соответствии с [8] $\beta_2 = D/r_{cr}$ (D – коэффициент диффузии молекул $CaCO_3$ в воде). Как отмечалось ранее, процесс осаждения накипи на стенках трубы в сильной мере зависит от гидродинамики течения, тогда как кристаллизация на взвеси определяется молекулярной диффузией. Различие физической сущности процессов массопереноса $CaCO_3$ на взвесь и на стенки приводит к существенному отличию соответствующих коэффициентов $\beta_2/\beta_1 = 7 \cdot 10^4$ в условиях эксперимента [9], что вносит существенный вклад в снижение накипи при МОВ. Это четвертый фактор, участвующий в механизме противонакипного эффекта МОВ.

В (7) I_{2kmag}, S_k и C_k соответственно поток молекул накипеобразователя на частицы k-го порядка коагуляции, или порядка k, общая поверхность таких частиц и равновесная мольная концентрация молекул $CaCO_3$ относительно частицы порядка k.

Суммирование в (7) распространяется на все частицы, кроме первичных с $k = 1$ (критического радиуса), так как для них по определению пересыщение отсутствует и поток кристаллообразующих молекул на них равен нулю (процессы сорбции и десорбции уравновешены).

Поскольку частица k-го порядка имеет радиус $r_{cr} \cdot \sqrt[3]{k}$, то для нее справедливо соотношение [3]:

$$c - c_k = c - c_0 \cdot \left(\frac{c}{c_0}\right)^{\frac{1}{\sqrt[3]{k}}}.$$

Тогда поток кристаллизации молекул $CaCO_3$ на поверхность коллоидной частицы k-го ($k = 2, 3, \ldots$) порядка в омагниченном водном потоке определяется выражением

$$I_{2kmag} = \beta_2 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot 4\pi r_{cr}^2 \cdot \sqrt[3]{k^2} \cdot \left(c - c_0 \cdot \left(\frac{c}{c_0}\right)^{\frac{1}{\sqrt[3]{k}}}\right) \int_0^L n_k(x) \cdot dx, \quad (8)$$

где $n_k(x)$ – концентрация коллоидных частиц порядка k на расстоянии x от начала трубы.

Критические зародыши с начальной концентрацией n (6) коагулируют, образуя частицы надкритического размера $r_k = r_{cr} \cdot \sqrt[3]{k}$ на k-м этапе коагуляции. По отношению к ним увеличивается пересыщение ($c - c_k$) раствора и поток молекул $CaCO_3$ на частицу k-го порядка постепенно возрастает. В формуле (8) за время t расстояние от начала трубы определяется по формуле $x = vt$.

Теория быстрой коагуляции Смолуховского дает следующее выражение для расчета изменения со временем концентрации $n_k(t)$ коллоидных частиц первого, второго и др. порядков [5]:

$$n_k(t) = \frac{n_0 \cdot \left(\frac{t}{\tau}\right)^{k-1}}{\left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{k+1}}, \quad k = 1, 2, 3, \ldots \quad (9)$$

где $\tau = \dfrac{3\eta W}{4 k_Б T n_0}$ так называемое время коагуляции, причем коэффициент замедления W определяется выражением (4); η – динамическая вязкость воды при температуре T.

Формула (9) в нашем случае требует уточнения, т.к. она не учитывает того, что уменьшение концентрации критических зародышей в ходе коагуляции неизбежно должно сопровождаться восполнением их концентрации до равновесной за счет гомогенной нуклеации новых частиц в объеме пересыщенного раствора. Появление новых зародышей увеличивает поверхность взвеси и также вносит вклад в противонакипный эффект. Это пятый фактор, участвующий в механизме противонакипного эффекта МОВ.

Уточненная формула для расчета концентрации коллоидных частиц $n_k(t)$ ($k = 2, 3, \ldots$) со временем учитывает восполнение концентрации первичных

(критических) зародышей и имеет следующий вид [3]:

$$n_1(t) = n_0 = \text{const},$$

$$n_k(t) = n_0 \cdot \left(\frac{t}{\tau + t}\right)^{k-1}. \qquad (10)$$

Подстановкой (10) в (8) с учетом $x = vt$ находится поток молекул $CaCO_3$ на коллоидные частицы I_{2kmag}.

Проведем количественный расчет антинакипной эффективности МОВ. Противонакипный эффект – снижение накипи на стенках трубы (теплообменника) за счет магнитной обработки воды – определяется удобной для практики формулой

$$\Theta = \frac{I_{10}}{I_{1mag}},$$

где I_{10}, I_{1mag} – поток молекул $CaCO_3$ на стенке теплообменника при отсутствии и наличии МОВ соответственно. В работе [2] показано, что при таком механизме магнитной обработки справедлива формула:

$$\Theta = 1 + \frac{\sum_{k=2} I_{2kmag}}{\beta_1 L \pi d (C - C_0)}. \qquad (11)$$

Из формулы (11) с учетом (8) видно, что противонакипный эффект МОВ кроме отношения коэффициентов массопереноса на взвесь и на стенки зависит также от соотношения площадей поверхности взвешенных частиц и стенок. Из вышеизложенного ясно, что после начала коагуляции это соотношение стало резко увеличиваться в пользу поверхности взвеси. Это шестой фактор, участвующий в механизме противонакипного эффекта МОВ.

Переходя к количественным оценкам, вычислим по (11) зависимость коэффициента Θ от безразмерной константы Толмена $\frac{\delta}{r_{cr0}}$, которая представлена на рис. 5. С помощью данного графика, зная величину Θ = 30 из эксперимента [9], можно оценить δ ≈ 0,4 нм, что согласуется с ожидаемым значением данного параметра δ < 1 нм [7] и является косвенным доказательством адекватности представленной модели. Кроме того, $r_c \approx 0{,}83$ нм, число молекул в критическом зародыше $N \approx 40$ и $\sigma_{eff} \approx 0{,}064$ Дж/м^2.

Резюмируем изложенную выше гипотезу о механизме снижения накипи при магнитной обработке водного потока. В основе гипотезы – положения известной теории ДЛФО о деформации двойного электрического слоя силами Лоренца в магнитном поле с утратой устойчивости коллоидного раствора и коагуляцией коллоидных частиц. Показано, что шесть существенных обстоятельств определяют величину противонакипного эффекта:

1. Деформация двойного электрического слоя дает начало процессу коагуляции коллоидных частиц.

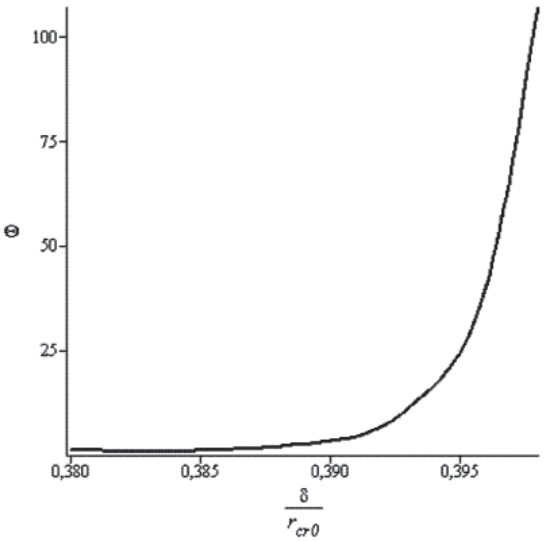

Рис. 5. Зависимость коэффициента Θ от нормированного параметра Толмена δ/r_{cr0}

2. По отношению к коагулированным частицам на начальных этапах коагуляции пересыщение раствора резко возрастает и в объеме воды идет активная кристаллизация на поверхность взвеси.

3. Влияние межфазного слоя, определяемого константой Толмена, уменьшает энергию образования критических зародышей, экспоненциально увеличивая скорость их гомогенной генерации и концентрацию в растворе.

4. Массоперенос кристаллизующихся молекул из водного раствора на взвесь протекает намного активнее, чем на стенки теплообменника.

5. Убыль концентрации критических зародышей непрерывно восполняется за счет гомогенной генерации новых критических зародышей для сохранения динамического равновесия жидкой и твердой фаз в пересыщенном растворе.

6. Увеличение концентрации взвеси в объеме омагниченного водного потока приводит к радикальному перераспределению накипи между стенкой и взвесью в пользу последней, что и определяет наблюдаемый противонакипный эффект магнитной обработки.Таким образом, определена совокупность известных физических явлений, приводящая к противонакипному

эффекту, отмеченному в эксперименте [9], причем значение константы Толмена, при которой реализуется указанный эффект, согласуется с известной оценкой диапазона ее значений. Это в целом подтверждает предложенную авторами гипотезу о механизме снижения накипи при магнитной обработке воды.

Список литературы

1. Гамаюнов Н.И. Воздействие постоянного магнитного поля на движущиеся растворы и суспензии // Коллоидный журнал – 1994. – Т. 56. – № 2. – С. 290–298.

2. Кошоридзе С.И., Левин Ю.К. Влияние коагуляции коллоидных частиц на снижение накипеобразования при магнитной обработке воды в теплоэнергетических устройствах // Теплоэнергетика. – 2011. – № 7. – С. 13–16.

3. Кошоридзе С.И., Левин Ю.К. Механизм снижения накипи при магнитной обработке воды в теплоэнергетических устройствах // Теплоэнергетика. – 2013. – № 3. – С. 74–77.

4. Кошоридзе С.И., Левин Ю.К. Влияние магнитного поля на коагуляцию наноразмерных коллоидных частиц // ПЖТФ. – 2014. – Т.40. – Вып.16. – С. 80–87.

5. Наука о коллоидах. Т.1. Необратимые процессы; под ред. Г.Р. Кройта. – М.: Иностранная литература,1955. –538 с.

6. Ньюмен Дж. Электрохимические системы. – М.: Мир, 1977. – 463 с.

7. Рехвиашвили С.Ш., Киштикова Е.В., Розенберг Б.А. Модель наночастицы в теории неоднородной среды // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. – № 12. – С. 10–13.

8. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача. – М.: Химия, 1982. – 696 с.

9. Szkatula A, Balanda M., Kopec M. Magnetic treatment of industrial water. Silica activation // The Europ. Phys. J. – Appl. Phys. – 2002. – Vol. 18. – № 2. – P. 41–49.

References

1. Gamayunov N.Y.Vozdeystvie postoyannogo magnitnogo polya na dvizhuschiesya rastvory i suspenzii. Kolloidnyy zhurnal.1994. no.2. pp. 290–298.

2. Koshoridze S.I.,Levin Yu.K.Vlianie koagulyatsii kolloidnych chastits na snizhenie nakipeobrazovaniya pri magnitnoy obrabotke vody v teploenergeticheskikh ustroystvach. Teploenergetica. 2011. no.7. pp. 13–16.

3. Koshoridze S.I.,Levin Yu.K. Mekhanizm cnizhenia nakipi pri magnitnoy obrabotke vody v teploenergeticheskikh ustroystvach. Teploenergetica. 2013. no. 3. pp. 74–77.

4. Koshoridze S.I.,Levin Yu.K. Vliyanie magnitnogo polya na koagulyatsiyu nanorazmernykh kolloidnych chastits.PZhTF. 2014. Vol. 40. no.16. pp. 80–87.

5. Nauka o kolloidach.Vol.1. Neobratimye protsesy [edited by H.R. Kruyt]. M.: Inostrannaya literatura. 1955. 538 p.

6. Nyumen J. Electrokhimicheskie sistemy. M.: Mir, 1977. 463 p.

7. Rekhviashvili S.Sh., Kishtikova E.V., Rozenberg B.A. Model nanochastitsy v teorii neodnorodnoy sredy. Zhurnal technicheskoy fiziki. 2009. Vol.79. no. 12. pp. 10–13.

8. Sherwood T.K., Picford R.L., Wilke C.R. Massoperedacha. M.: Khimia, 1982. 496 p.

9. Szkatula A, Balanda M., Kopec M. Magnetic treatment of industrial water. Silica activation. The Europ. Phys. J. Appl. Phys. 2002. Vol. 22. no. 18. pp. 41–49.

Рецензенты:

Яновский Ю.Г., д.т.н., профессор, директор, ФГБУН «Институт прикладной механики» Российской академии наук, г. Москва;

Бошенятов Б.В., д.т.н., ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт прикладной механики» Российской академии наук, г. Москва.

Работа поступила в редакцию 15.09.2014.