

Ф.Ф. Чаусов (УдГУ); П.С. Дедюхин, директор Якушур-Бодьинского МППЖКХ;  
О.А. Бартнев, канд. техн. наук, М.А. Плетнев, канд. хим. наук, Г.А. Раевская (УдГУ)

## Распределение ингибиторов коррозии и накипеобразования в гидравлических сетях со сложной топологической структурой

Использование ингибиторов коррозии и накипеобразования — эффективный способ повышения долговечности и экономичности систем тепло- и водоснабжения [1, 2]. Большинство индивидуальных ингибиторов и ингибирующих систем дорогостоящи и работоспособны в определенном интервале концентраций [3, 4]. При снижении или повышении концентрации наблюдается повышение интенсивности коррозии и накипеобразования. Следовательно, равномерное распределение ингибитора по гидравлической сети — важнейшее условие эффективности данного способа борьбы с коррозией и накипеобразованием, а расчет поля концентраций ингибитора в гидравлической сети — актуальная задача.

Классический подход к решению этой задачи основан на расчете поля скоростей среды с последующим решением уравнения массопереноса. Для правильного учета конвективного массопереноса в трубопроводе поле скоростей должно быть определено решением уравнений Навье—Стокса в трехмерной области. В случае турбулентного течения (что обычно для инженерных гидравлических сетей) точное решение невозможно, в связи с чем представляет интерес усредненное поле концентраций.

Рассмотрим упрощенный подход к расчету концентрационного поля, который может быть использован для оценки равномерности распределения ингибитора в гидравлической сети со сложной топологической структурой.

Средняя по времени линейная скорость среды в цилиндрической трубе радиусом  $R$  на расстоянии  $r$  от оси трубы

$$\omega(r) = \frac{Q}{\pi R^2} \frac{n+2}{n} \left(1 - \frac{r^n}{R^n}\right), \quad (1)$$

где  $Q$  — расход среды;  $n$  — показатель степени, зависящий от гидравлического режима (известно [5], что в ламинарном режиме  $n = 2$ , а в установившемся турбулентном режиме  $n \approx 8$ ).

Пусть в момент времени  $t = 0$  на участке цилиндрической трубы (рис. 1) в сечении  $1-1$  (и слева от него) создается единичная концентрация ингибитора. Так как для гидродинамических режимов, свойственных инженерным гидравлическим сетям, характерная постоянная времени молекулярной диффузии значительно больше характерной постоянной времени конвективного массопереноса, в дальнейших выкладках влиянием молекулярной диффузии пренебрежем. С учетом этого граница между областями сред с единичной и нулевой концентрациями ингибитора описывается выражением  $\lambda(r, t) = t\omega(r)$ . Следовательно, в сечении  $2-2$ , расположенном от сечения  $1-1$  на расстоянии  $l$ , средняя по сечению трубы концентрация ингибитора составит

$$Y(l, R, Q, t) = \begin{cases} 0, & t < \frac{l\pi R^2}{Q} \frac{n}{n+2}; \\ r'^2, & t \geq \frac{l\pi R^2}{Q} \frac{n}{n+2}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $r'$  — радиус, определенный из условия  $\lambda(r', t) = l$ .

Решая уравнение (1) относительно  $r$  и подставляя полученное решение в формулу (2), получим

$$Y(l, R, Q, t) = \begin{cases} 0, & t < \frac{l\pi R^2}{Q} \frac{n}{n+2}; \\ \sqrt[n/2]{1 - \frac{l\pi R^2}{tQ} \frac{n}{n+2}} \left[ 1 + \frac{l\pi R^2}{tQ} \frac{2}{n+2} \right], & t \geq \frac{l\pi R^2}{Q} \frac{n}{n+2}. \end{cases} \quad (3)$$

$$t \geq \frac{l\pi R^2}{Q} \frac{n}{n+2}$$

Безразмерный комплекс  $\frac{tQ}{l\pi R^2}$  в выражении (3) имеет физический смысл безразмерного времени и показывает отношение расхода среды через трубу к собственному объему трубы. Обозначив  $\frac{tQ}{l\pi R^2} = T$ , выражение (3) можно записать в виде, не зависящем от геометрических размеров трубы:

$$Y(T) = \begin{cases} 0, & T < \frac{n}{n+2}; \\ \sqrt[n/2]{1 - \frac{n}{T(n+2)}} \left[ 1 + \frac{2}{T(n+2)} \right], & T \geq \frac{n}{n+2}. \end{cases} \quad (4)$$

Формула (4) описывает нормальную реакцию простейшей гидравлической сети (одна труба) на единичную загрузку (рис. 2). Она приближенно применима и для неразветв-



Рис. 1. К расчету средней концентрации ингибитора в заданном сечении трубы

ленной гидравлической сети, содержащей местные сопротивления (повороты, сужения, расширения, краны, вентили, задвижки, выступающие края прокладок и т.п.), которые не влияют отрицательно на перемешивание и на равномерность распределения ингибитора в потоке.

На практике удобнее использовать функцию Грина  $G(T) = \frac{dY(T)}{dT}$ . Для неразветвленной гидравлической сети функция Грина определяется уравнением

$$G(T) = \begin{cases} 0, T < \frac{n}{n+2}; \\ 2 \left[ 1 - \frac{n}{T(n+2)} \right]^{2n-1} \frac{n}{T^3(n+2)}, T \geq \frac{n}{n+2}. \end{cases} \quad (5)$$

Если концентрация ингибитора на входе неразветвленной гидравлической сети изменяется во времени в соответствии с функцией  $C_{in} = C_{in}(T)$ , то на выходе она может быть определена по формуле

$$C_{out}(T) = \int_{-\infty}^{\infty} G(T-\tau) C_{in}(\tau) d\tau. \quad (6)$$

Перейдем к решению задачи для разветвленной сети (рис. 3, а). Разветвленная сеть состоит из неразветвленных отрезков и «тройников» (1, 2, 3, 4). В реальных сетях могут быть также четырех-, пятиветвевые и более сложные примыкания. Точное распределение концентраций ингибитора в «тройниках» зависит от многих факторов (диаметров и углов примыкания труб, формы кривых, сопрягающих края труб, выступающих внутрь кромок, сварочного грата и т.п.). Эти факторы индивидуальны для каждой гидравлической сети и плохо поддаются контролю. Для оценки реальной картины поля концентраций рассмотрим два крайних случая.

#### Случай 1 («оптимистический»)

В каждом из «тройников» происходит полное усреднение состава потока. В этом случае каждый из участков (А, 1); (1, 2); (2, В<sub>2</sub>, 3); (2, В<sub>3</sub>, 3); (1, В<sub>1</sub>, 4); (3, 4); (4, С)

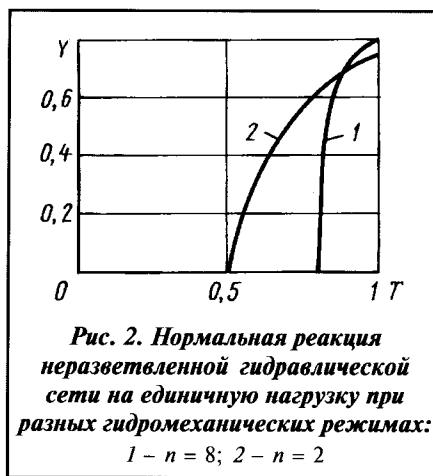


Рис. 2. Нормальная реакция неразветвленной гидравлической сети на единичную нагрузку при разных гидромеханических режимах: 1 - n = 8; 2 - n = 2

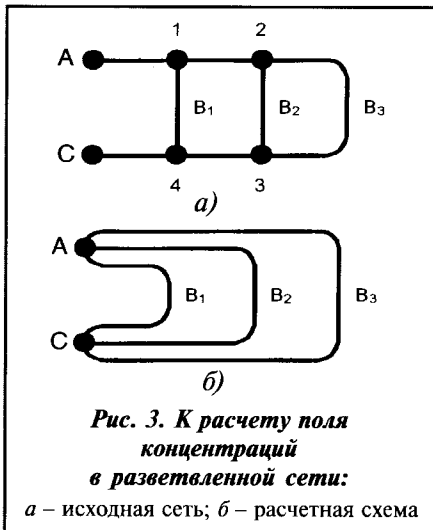


Рис. 3. К расчету поля концентраций в разветвленной сети:

а - исходная сеть; б - расчетная схема

описывается уравнением типа (6). Следовательно, если концентрация ингибитора в точке А изменяется во времени в соответствии с функцией  $C_A = C_A(T)$ , то концентрация ингибитора в точке С может быть рассчитана по формуле

$$C(T) = \frac{1}{Q} \int_{-\infty}^{\infty} G_{(4,C)}(T-\tau_1) \times \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} G_{(3,4)}(\tau_1-\tau_2) \int_{-\infty}^{\infty} [Q_2 G_{(2,B_2,3)} \times (\tau_2-\tau_3) + Q_3 G_{(2,B_3,3)}(\tau_2-\tau_3)] \times \int_{-\infty}^{\infty} G_{(1,2)}(\tau_3-\tau_4) \int_{-\infty}^{\infty} G_{(A,1)}(\tau_4-\tau_5) \times C_A(\tau_5) d\tau_5 d\tau_4 d\tau_3 d\tau_2 + Q_1 \int_{-\infty}^{\infty} G_{(1,B_1,4)}(\tau_1-\tau_4) \int_{-\infty}^{\infty} G_{(A,1)} \times (\tau_4-\tau_5) C_A(\tau_5) d\tau_5 d\tau_4 \right\} d\tau_1, \quad (7)$$

где  $Q_1, Q_2$  и  $Q_3$  — расход среды через ветви соответственно В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub> и В<sub>3</sub>;  $Q = \sum_{i=1}^3 Q_i$ ;  $G_{(A,1)}$ ;  $G_{(1,2)}$ ;  $G_{(1,B_1,4)}$ ;  $G_{(2,B_2,3)}$ ;  $G_{(2,B_3,3)}$ ;  $G_{(4,C)}$  — функции Грина для неразветвленных участков (А, 1); (1, 2); (1, В<sub>1</sub>, 4); (2, В<sub>3</sub>, 3); (2, В<sub>2</sub>, 3); (3, 4) и (4, С).

#### Случай 2 («пессимистический»)

Потоки в каждой ветви гидравлической сети независимы друг от друга. Тогда вся гидравлическая сеть может быть представлена как параллельное соединение независимых друг от друга труб (рис. 3, б). Если концентрация ингибитора в точке А по-прежнему описывается функцией  $C_A = C_A(T)$ , то концентрация ингибитора в точке С описывается выражением

$$C_C(T) = \frac{1}{Q} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ Q_1 G \left[ (T-\tau) \frac{l_{max}}{l_1} \right] + Q_2 G \left[ (T-\tau) \frac{l_{max}}{l_2} \right] + Q_3 G \left[ (T-\tau) \frac{l_{max}}{l_3} \right] \right\} C_A(\tau) d\tau, \quad (8)$$

где  $l_i$  — полная длина i-й ветви сети (от источника до потребителя и обратно);  $l_{max}$  — max ( $l_1, l_2, l_3$ ).

Сравнивая рассмотренные случаи, можно сделать вывод, что следует пользоваться «пессимистической» оценкой. Во-первых, лучше недооценить равномерность распределения ингибитора, чем придерживаться «оптимистического» подхода и необоснованно считать распределение ингибитора более равномерным, чем оно является в действительности. Во-вторых, вычисления многократного интеграла (7) достаточно громоздки. Поэтому для оценочного расчета концентрации ингибитора на выходе из гидравлической сети со сложной топологической структурой, включающей N потребителей, можно предложить следующую формулу:

$$C_{out}(T) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{in}(\tau) \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{Q} G \left[ (T-\tau) \frac{l_{max}}{l_i} \right] d\tau, \quad (9)$$

где  $C_{in}(t)$  — концентрация ингибитора на входе гидравлической сети;  $Q_i$  — расход среды на  $i$ -го потребителя (для тепловых сетей — тепловая нагрузка  $i$ -го потребителя)

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i; l_{\max} = \max_{i=1, N} l_i.$$

Рассмотрим замкнутые гидравлические сети. Особенность их заключается в том, что выход сети соединен со входом при помощи ряда устройств (насосов, коллекторов, грязевиков и т.п.), которые усредняют состав среды по сечению потока, но не изменяют общей концентрации ингибитора. Для замкнутых сетей справедливо следующее утверждение: равномерное распределение ингибитора по сети  $C_{in} = C_{out} = \text{const}$  является асимптотически устойчивым. В этом случае уравнение (9) можно переписать в виде

$$C_{out}(T) = C_{in}(t) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Q_i}{Q} G \left[ (T - \tau) \frac{l_{\max}}{l_i} \right] d\tau,$$

эквивалентном очевидному тождеству

$$\int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{Q} G \left[ (T - \tau) \frac{l_{\max}}{l_i} \right] d\tau = 1.$$

При этом можно использовать разнообразные режимы дозирования ингибитора и простые и надежные дозирующие устройства эжекторного типа взамен сложных, ненадежных и дорогостоящих дозаторов инжекторного типа, содержащих механические насосы и приводы.

Было проведено исследование тепловой сети микрорайона поселка Якшур-Бодья (рис. 4), получены сведения о нагрузках и длинах каждой из 44 ветвей сети. Распределение концентрации ингибитора в сети, рассчитанное для различных способов дозирования ингибитора, представлено на рис. 5. Можно отметить, что даже при «залповом» дозировании ингибитора [ $C_{in}(T) = \delta(T)$ , где  $\delta(T)$  — функция Дирака] (см. рис. 5, а) уже при  $T \in [2, 3]$  отсутствуют резкие перепады концентрации ингибитора в сети, а при  $T \in [6, 7]$  рас-

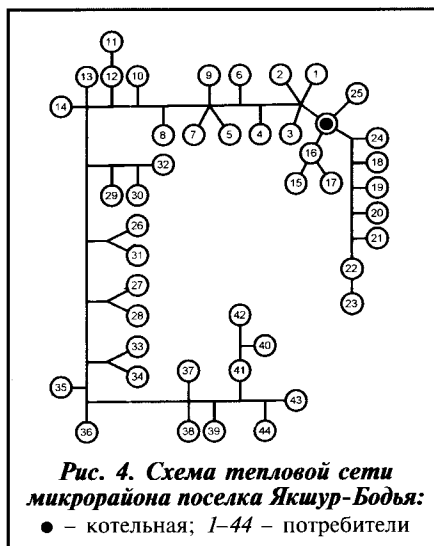


Рис. 4. Схема тепловой сети микрорайона поселка Якшур-Бодья: ● — котельная; 1–44 — потребители

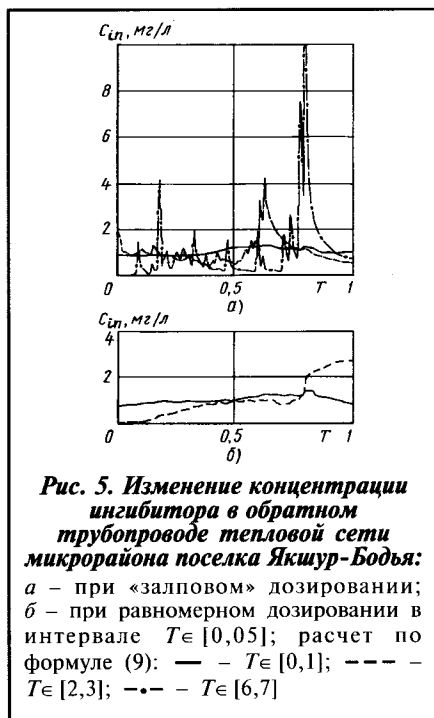


Рис. 5. Изменение концентрации ингибитора в обратном трубопроводе тепловой сети микрорайона поселка Якшур-Бодья: а — при «залповом» дозировании; б — при равномерном дозировании в интервале  $T \in [0, 0,5]$ ; расчет по формуле (9): — —  $T \in [0, 1]$ ; - - - —  $T \in [2, 3]$ ; - · - —  $T \in [6, 7]$

пределение ингибитора практически равномерное. При

$$C_{in}(T) = \begin{cases} 0, & T < 0 \\ 2, & 0 \leq T < 0,5 \\ 0, & T \geq 0,5 \end{cases}$$

(см. рис. 5, б) равномерное распределение ингибитора по сети достигается уже при  $T \in [2, 3]$ .

Переход к реальному масштабу времени  $t$  (ч) может быть осуществлен по формуле

$$t = \left( T \frac{V}{Q_n} \right), \quad (10)$$

где  $V$  — собственный объем сети,  $\text{м}^3$ ;  $Q_n$  — производительность сетевого насоса,  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Так, для рассмотренной тепловой сети указанного микрорайона собственный объем составляет  $160 \text{ м}^3$ , а производительность сетевого насоса  $240 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Анализируя полученные результаты расчетов с учетом выражения (10), можно заключить, что при «залповом» дозировании ингибитора равномерное распределение его по сети достигается за период  $T = 6$  (или в реальном масштабе времени по истечении 4 ч). При подаче полной дозы реагента в интервале  $T = 0,5$  (или в течение 20 мин) равномерное распределение ингибитора достигается уже при  $T = 2$  (или в течение 80 мин). Оба рассмотренных варианта вполне приемлемы с точки зрения эксплуатации тепловой сети и могут быть реализованы при использовании эжекторных дозаторов типа «Иж-25».

Таким образом, проведенные исследования позволили принять решение об использовании на тепловой сети микрорайона разработанных и выпускаемых Удмуртским государственным университетом недорогих и надежных дозаторов «Иж-25» и отказаться от сложных и дорогостоящих инжекторных дозаторов фирмы «Тензор» (г. Екатеринбург). Вероятно, при аналогичном подходе к расчету других гидравлических сетей можно также экономически оправдано решить проблему дозирования ингибитора.

#### Список литературы

1. Маргулова Т.Х. Применение комплексонов в теплоэнергетике. М.: Энергия, 1973.
2. Маргулова Г.Х., Мартынова О.И. Водные режимы тепловых и атомных электростанций. М.: Высшая школа, 1981. А. с. 876789 СССР. 1981. БИ № 40.
3. Руководящие указания по стабилизационной обработке охлаждающей воды в оборотных системах охлаждения с градирнями оксигенидифосфоновой кислотой. М.: СПО «Союзтехэнерго», 1981.
4. Циборовский Я. Основы процессов химической технологии / Пер. с польского под ред. П.Г. Романкова. Л.: Химия, 1967.