

Выходы. С использованием существующих методов определены теплофизические свойства (теплоемкость, коэффициенты температуро- и теплопроводности) известняка и извести в широком диапазоне изменения температур. Полученные в работе значения могут быть использованы при совершенствовании тепловых процессов в агрегатах для производства извести, а также при оптимизации технологических режимов при производстве чугуна и стали в доменных и сталеплавильных печах, включая процессы, связанные с подготовкой железорудных материалов к металлургическому переделу.

УДК 621.643:628.147.22

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Скуратов С.М., Колесов В.П., Воробьев А.Ф. Термохимия. Часть вторая. – М.: изд. МГУ, 1966. – 434 с.
- Краткий справочник физико-химических величин / Н.М. Барон, Э.И. Квят, Е.Я. Подгорная и др. – Л.: Химия, 1974. – 200 с.
- Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
- Кудрявцев Е.Б., Чекалев К.Н., Шумаков Н.В. Нестационарный теплообмен. – М.: Наука, 1961. – 158 с.

© 2012 г. Б.П. Юрьев, Н.А. Спирин
Поступила 22 июля 2011 г.

Д.Б. Чапаев, А.А. Оленников

Сибирский государственный индустриальный университет

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ВНУТРЕННЕЙ КОРРОЗИИ ТРУБОПРОВОДОВ ВОДЯНЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Слабым звеном в теплоэнергетике остается линейная часть городских систем транспорта тепла, до 90 % общего числа повреждений которой приходится на долю коррозии. В связи с применением в последнее время герметично изолированных со стороны грунта конструкций, продолжительность безаварийной эксплуатации теплопроводов определяется коррозией внутренней поверхности стальной трубы. Расчет значений скорости коррозии таких участков позволит оценить их срок службы τ_c , год, с целью прогнозирования плановых ремонтов по уравнению

$$\tau_c = \frac{(s_{\text{исх}} - s_{\text{пр}})}{K w_{\text{л}}}, \quad (1)$$

где $s_{\text{исх}}$ и $s_{\text{пр}}$ – соответственно толщина стенки трубы по сортаменту и рассчитанная по прочностным характеристикам, мм (в настоящее время при определении значения $s_{\text{пр}}$ запас на коррозию не предусматривается); K – скорость внутренней коррозии трубы, мм/год; $w_{\text{л}}$ – локальный фактор коррозии, безразмерная величина.

На сегодняшний день важной задачей является создание расчетной методики оценки интенсивности коррозии водяных тепловых сетей, учитывающей характеристики металла теплопроводов, водно-химический, гидродинамический и температурный режимы теплоносителя. Сложность решения этой задачи объясняется множеством параметров, влияющих на коррозионный процесс, большой зоной их неопределенности, связанной со значительной протяженностью систем транспорта тепла, флуктуацией концентрации химических реагентов коррозии, электрических токов, химического состава материала труб и т.д.

Ранее в статье [1] представлены механизмы внутренней коррозии в водяных тепловых сетях и вывод формулы по оценке ее скорости. Расчет по работе [1] дает значения параметра K в несколько раз ниже, чем в реальных условиях эксплуатации теплосетей, вероятно ввиду более низких значений растворимости C_m , кг/м³, магнетита, полученных в лабораторных условиях, и нарушений водно-химического режима в теплосетях. Более того, эта разница существенно возросла при увеличении внутреннего диаметра d_b трубопровода. Для ее устранения в модель [1] предлагаются ввести функцию $q(d_b)$. Кроме того, в статье [1] принято допущение о снижении скорости внутренней коррозии по мере удаления от источника теплоснабжения, что в практике встречается довольно редко ввиду наличия просоков кислорода в теплосетевую воду и других факторов, а также не было учтено изменение пористости пленки магнетита в диапазоне температур 150 – 175 °C.

В настоящей работе предложена уточненная методика расчета скорости внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей, изготовленных из углеродистой стали марки 20, обычно используемой в отечественных системах теплоснабжения. Также, для удобства проведения расчетов на ПЭВМ в рассматриваемую методику интегрированы аппроксимирующие функции $C_m(t, pH)$ растворимости магнетита от температуры t и водородного показателя pH теплоносителя, а также плотности $\rho(t)$ и вязкости $\mu(t)$ сетевой воды от температуры.

Основываясь на результаты работы [1] и учитывая вышеизложенное, скорость внутренней коррозии можно оценить по следующей формуле:

$$K = \frac{\beta q}{\rho_c} \frac{\theta C_m}{\frac{1}{k} + (1-\chi) \left(\frac{h}{D} + \frac{1}{h_D} \right)}, \quad (2)$$

где β – коэффициент пересчета м/с в мм/год; q – коэффициент, зависящий от параметра d_b ; ρ_c – плотность стали, кг/м³; θ – пористость плотного слоя магнетита, возникающего на внутренней поверхности стальной трубы, доли ед.; k – скорость реакции коррозии на границе металл – оксид, м/с; χ – доля магнетита в продуктах коррозии ($\chi = 0,5$ для нормируемой концентрации кислорода в теплосети); h – толщина плотного слоя магнетита, м (принимается по результатам обследования конкретных участков теплосети, в среднем $h = 1 \cdot 10^{-5}$ м); D – коэффициент диффузии ионов железа в порах слоя магнетита, м²/с; h_D – коэффициент их массопереноса в ядро потока с границы оксид – поток теплоносителя, м/с.

Определим значения величин, входящих в уравнение (2):

1. Коэффициент пересчета определяется из выражения $\beta = 3,6 \cdot 10^6 \cdot \tau_p$, где τ_p – время работы теплосети в течение года, ч.

Значение τ_p принимается равным продолжительности отопительного периода или, в случае круглогодичной работы сети с учетом ее ежегодной остановки на плановый ремонт (15 суток), равным 8400 ч.

2. Коэффициент $q = q(d_b)$ – не учтенная в статье [1] функция, полученная в ходе сопоставления средних за год рассчитанных значений K , мм/год, со скоростями внутренней коррозии, полученными в ходе обследований теплопроводов различных диаметров, и сглаживающая разницу между ними: $q = 2,1 \cdot 10^5 d_b + 1400$.

3. Пористость пленки магнетита, доли ед., определяют из следующей системы уравнений:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0,03 & \text{при } t < 150^\circ\text{C}; \\ 0,15 - 0,8 \cdot 10^{-3} & \text{при } 150^\circ\text{C} \leq t \leq 175^\circ\text{C}; \\ 0,01 & \text{при } t > 175^\circ\text{C}, \end{cases}$$

где t – температура теплоносителя, °С.

4. Коэффициент D , м²/с, диффузии ионов железа в порах оксида и коэффициент h_D , м/с, их массопереноса в однофазный поток теплоносителя при турбулентном течении определены, соответственно, в работах [2, 3]:

$$D = 1 \cdot 10^{-15} \frac{273+t}{\mu}; h_D = \frac{D}{d_b} \left(2,0 + a \operatorname{Re}^b \operatorname{Sc}^{\frac{1}{3}} \right),$$

где μ – динамическая вязкость теплоносителя, кг/(м·с); $a = 0,86 - 10,00/(4,70 - \operatorname{Sc})^3$, $b = 0,0165 - 0,011 \operatorname{Sc} \exp(-\operatorname{Sc})$ – эмпирические коэффициенты; Re и Sc – числа Рейнольдса и Шмидта соответственно, которые имеют следующий вид: $\operatorname{Re} = v d_b \rho / \mu$, $\operatorname{Sc} = \mu / (\rho D)$, где $v = \frac{4G}{3600 \pi d_b^2 \rho}$, м/с,

и ρ , кг/м³ – скорость и плотность теплоносителя соответственно; G – расход теплоносителя на участке, кг/ч.

Для удобства проведения расчетов на ПЭВМ плотность $\rho(t)$, кг/м³, и вязкость $\mu(t)$, кг/(м·с), теплоносителя (воды) в диапазоне температур $t = 40 - 300$ °С предлагается определять по уравнениям $\rho(t) = 1001,3 - 0,0026t^2 - 0,1569t$; $\mu(t) = 0,0308t^{-1,0259}$.

5. Опытные значения по растворимости магнетита для различных значений температур t и водородного показателя pH теплосетевой воды, представленные в работе [4], для диапазона температур 40 – 300 °С записаны в виде зависимости $C_m(t, pH)$, кг/м³,

$$C_m(t, pH) = \rho (mt^2 - nt + p) \cdot 10^{-9} \quad (3)$$

где m , n , p – коэффициенты, принимаемые для различных диапазонов температур и значений pH из приведенных ниже данных:

pH	$t, ^\circ\text{C}$	m	n	p
8,0	40 – 150*	0,0188	2,4384	321,6100
	150 – 300	0,0102	6,9738	1190,8000
8,3	40 – 150*	0,0153	2,3004	220,0400
	150 – 300	0,0054	3,7749	659,9500
8,5	40 – 150*	0,0045	0,4888	102,6900
	150 – 300	0,0012	1,3557	304,5500
8,7	40 – 150*	0,0048	0,5701	67,7370
	150 – 300	0,0012	1,0986	232,7400
8,9	40 – 175*	0,0013	0,1782	33,4750
	175 – 300	0,0010	0,7579	146,3600
9,0	40 – 175*	0,0011	0,1021	20,4610
	175 – 300	0,0019	1,1084	172,7800
9,2	40 – 150*	0,0027	0,3368	19,0500
	150 – 300	0,0009	0,5586	93,3330
9,4	40 – 300	0	0,0104	6,6066
9,6	40 – 300	0	0,0089	4,2359
10,0	40 – 300	0	0,0040	1,4210

* – включительно.

Зависимость $C_m(t, pH)$ для характерных в системах теплоснабжения значений pH представлена на рис. 1, а. Представление опытных данных C_m в виде уравнения (3) позволяет реализовать вычислительный алгоритм на ПЭВМ.

6. Зависимость скорости $k(t)$, м/с, реакции коррозии от температуры определяется формулой Аррениуса:

$$k(t) = A \exp \left(-\frac{E_a}{R(273+t)} \right) = 8,45 \cdot 10^{17} \exp \left(-\frac{17861}{273+t} \right),$$

где A и E_a – соответственно предэкспоненциальный множитель, м/с, и энергия активации реакции коррозии, Дж/моль, (для коррозии углеродистой стали

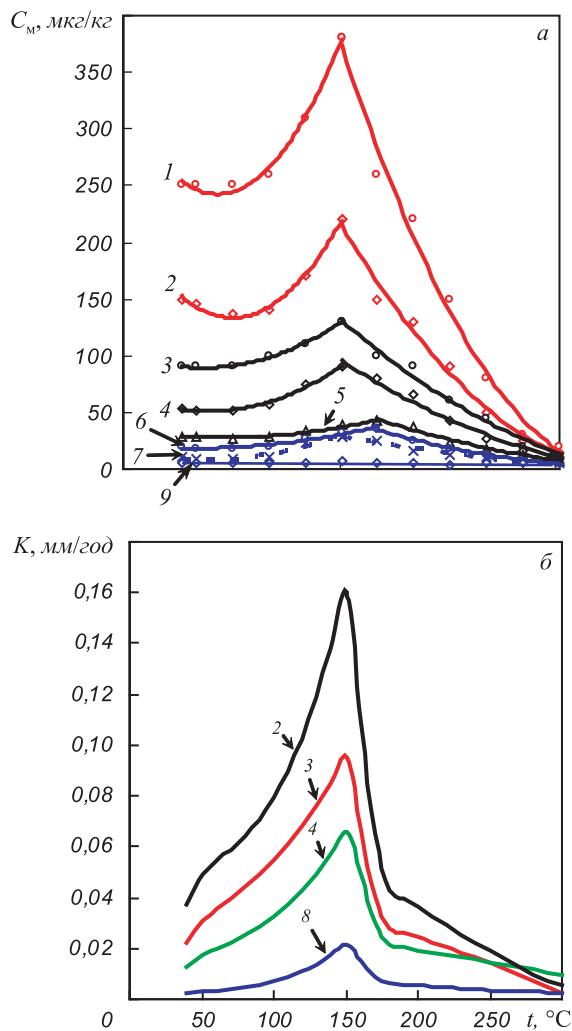


Рис. 1. Зависимость растворимости магнетита C_m (а) и скорости внутренней коррозии K (б) от температуры t и водородного показателя pH теплосетевой воды:
1 – $pH = 8,0$; 2 – $pH = 8,3$; 3 – $pH = 8,5$; 4 – $pH = 8,7$; 5 – $pH = 8,9$;
6 – $pH = 9,03$; 7 – $pH = 9,15$; 8 – $pH = 9,2$; 9 – $pH = 9,4$

в потоке теплоносителя в работе [3] предложены значения $A = 8,45 \cdot 10^{17} \text{ м/с}$; $E_a = 148\ 500 \text{ Дж/моль}$; $R = 8,3145 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ – универсальная газовая постоянная.

Результаты расчета скорости K внутренней коррозии по приведенной методике сопоставлены со значениями, найденными гравиметрическим методом (по потере массы металла за время эксплуатации) в ходе обследования теплосетей г. Новокузнецка.

Для этого вырезались образцы из трубопроводов (сталь 20) на различных аварийных (по причине коррозии) участках теплосети. Подавляющее большинство повреждений металла в результате внутренней коррозии происходит на подающих трубопроводах теплосети, поэтому образцы отбирались из таких труб. Наружная коррозия выбранных трубопроводов незначительна, следовательно, потеря массы металла трубы с наружной стороны чрезвычайно мала, что дало возможность с помощью гравиметрического метода оце-

нить скорость внутренней коррозии. Образцы подвергались обработке в соответствии с ГОСТ 9.908 – 85 и взвешивались с точностью $\pm 0,01 \text{ г}$. Время эксплуатации трубопроводов до аварии и расход теплоносителя определялись по значениям из технических паспортов на участки теплосети. Величины по водно-химическому (таблица) и температурному режиму теплосети принимались на основании показаний городских ТЭЦ. Важно заметить, что интенсивность внутренней коррозии остается примерно постоянной во времени. Значения параметра K для обследованных образцов, найденные гравиметрическим методом, колеблются в диапазоне $0,02 – 0,05 \text{ мм/год}$ в зависимости от участка сети (среднее значение $0,03 \text{ мм/год}$).

Затем выполнялся расчет скорости внутренней коррозии путем подстановки в расчетные формулы значений величин τ_p , t , pH , h , d_h , G , соответствующих условиям работы обследованных участков. Значения параметров t , pH принимались как средние за год, а величина G – согласно паспортам, оставалось постоянным в ходе всего периода эксплуатации. Средние годовые расчетные значения параметра K находятся в интервале $0,01 – 0,07 \text{ мм/год}$, что сопоставимо с результатами обследования тепловых сетей г. Новокузнецка.

В качестве примера по вышеупомянутой методике выполнен расчет на ПЭВМ скорости внутренней коррозии при различных температурах t теплоносителя и значений pH , имеющих место в практике эксплуатации теплосетей, при следующих исходных данных: $d_h = 325 \text{ мм}$; $s_{\text{исх}} = 8 \text{ мм}$; $G = 3,6 \cdot 10^5 \text{ кг/ч}$; $\tau_p = 8400 \text{ ч}$; $\chi = 0,5$; $h = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$; $\rho_c = 7800 \text{ кг/м}^3$. Расчетная зависимость функции $K(t, pH)$ представлена на рис. 1, б. Скорость внутренней коррозии растет с повышением температуры теплоносителя и достигает максимума при 150°C , т.е. как раз при наибольшей температуре в подающей магистрали теплосетей. Рост объясняется повышением растворимости магнетита в воде, а дальнейшее снижение связано с изменением знака температурного коэффициента растворимости при температуре $t \approx 150^\circ\text{C}$, обусловленным перестройкой кристаллической структуры в слое гидрооксидов железа. Рассматриваемый характер кривой $K(t, pH)$ наиболее

Водно-химический режим теплосетей г. Новокузнецка

Показатель	Значение показателя для теплоисточника			Норматив по работе [4]
	ТЭЦ КМК	Кузнецкая ТЭЦ	ЗС ТЭЦ	
pH	7,00 – 9,50	8,74	8,70	9,60 – 10,00
Кислород, мл/л	$\leq 0,050$	0,022	0,025	$\leq 0,020$
Хлориды, мг/л	–	–	6,5	$\leq 3,0$
Сульфаты, мг/л	–	94,0	10,8	$\leq 1,0$

ярко выражен при низких значениях pH . И наоборот, уже при $pH > 9,2$ функция начинает сглаживаться, а при нормативных значениях $pH = 9,6 - 10,0$ переходит в почти горизонтальную линию и скорость внутренней коррозии перестает зависеть от температурного режима в теплосети.

При круглогодичной работе ($\tau_p = 8400$ ч) теплосетей открытой системы теплоснабжения г. Новокузнецка среднегодовая температура теплоносителя составляет примерно 60°C . Если учесть, что при этом в теплосетях города в среднем $pH \approx 8,7$, то, согласно рис. 2, среднегодовое значение параметра K составляет 0,02 мм/год.

Характер изменения скорости внутренней коррозии в диапазоне $8,0 < pH < 10,0$ при среднегодовой температуре теплоносителя 60°C показан на рис. 2 (расчет выполнен по вышеприведенной методике). Скорость коррозии при нормируемых значениях $pH = 9,6 - 10,0$ практически равна нулю и экспоненциально растет при снижении величины pH .

Расчет по формуле (2) дает оценку интенсивности равномерного изнашивания трубопровода. Однако в реальных условиях эксплуатации тепловых сетей при $pH < 9,5$ коррозия труб из углеродистой стали носит локальный характер (причины – повышенное содержание ионов Cl^- и SO_4^{2-} , неоднородность железооксидных пленок на поверхности стали и наличие пар неравномерной аэрации, неметаллические включения и дислокации). Именно локальная коррозия является основной причиной аварийной остановки участков городских теплопроводов. Вследствие зависимости от множества случайных факторов рассчитать скорость локальной коррозии в настоящее время нельзя. Однако ее можно с приемлемой для инженерных расчетов точностью учесть при определении величины τ_c введением в формулу (1) локального фактора w_l , который показывает, во сколько раз скорость локальной коррозии превышает величину K . Значение w_l следует определять опытным путем как отношение средней глубины язв на внутренней поверхности стальной трубы к среднему утончению стенки трубы, вычисленному гравиметрическим методом (по потере массы металла за время эксплуатации).

Было определено значение w_l только для случая эксплуатации теплопроводов из углеродистой стали 20 в теплосетях г. Новокузнецка, когда на указанных выше образцах с помощью микрометрического индикатора с передвижным игольчатым щупом определялся профиль язв. Для $8,5 < pH < 9,0$ и среднегодовой температуре $t = 60^\circ\text{C}$ теплоносителя (круглогодичная работа теплосети $\tau_p = 8400$ ч) с приемлемой для практики точностью можно принять $w_l = 9,0$. Следует отметить, что при повышении pH до уровня более 9,5 внутренняя коррозия углеродистых сталей становится практически равномерной, т.е. $w_l = 1$ при $pH \geq 9,5$. Необходимо выполнить ряд обследований линейной части разных систем теплоснабжения, чтобы можно было говорить о значениях w_l для различных условий эксплуатации.

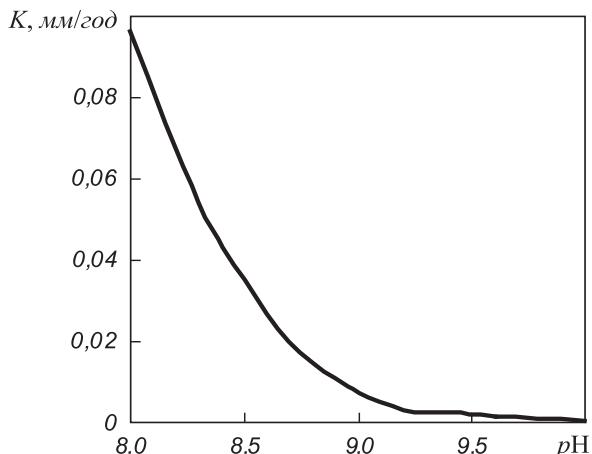


Рис. 2. Зависимость скорости внутренней коррозии K от водородного показателя pH при температуре 60°C

Выводы. Приведено уравнение по определению растворимости магнетита в теплосетевой воде при $pH = 8,0 - 10,0$ и различных температурах теплоносителя. Предложена методика расчета скорости внутренней коррозии тепловых сетей. Скорость коррозии растет при повышении температуры теплоносителя в диапазоне температур $40 - 150^\circ\text{C}$ и затем снижается. Чем ниже значение pH (в пределах, характерных для теплосетей), тем ярче выражен экстремум функции в районе температур $t \approx 150^\circ\text{C}$. И наоборот, при достижении $pH = 9,6$ скорость внутренней коррозии практически перестает зависеть от температурного режима в теплосети. При среднегодовой температуре 60°C теплоносителя в открытой системе теплоснабжения в диапазоне $pH = 8,0 - 10,0$ скорость внутренней коррозии при $pH > 9,6$ практически равна нулю и экспоненциально увеличивается при снижении pH . Расчет по приведенной методике дает оценку интенсивности равномерного изнашивания трубопровода. Для оценки скорости локальной коррозии, имеющей место в теплосетях при $pH < 9,5$, в формулу (1) по оценке срока службы трубопровода введен локальный фактор w_l коррозии. Для среднегодовой температуры 60°C теплоносителя в диапазоне $8,5 < pH < 9,0$ при определении срока службы городских теплопроводов в формуле (1) с достаточной для практики точностью можно принимать $w_l = 9,0$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Чапаев Д.Б., Басин А.С. // Изв. вуз. Строительство. 2004. № 2. С. 83 – 87.
- Зайчик Л.И., Нигматулин Б.И., Першуков В.А. // Теплоэнергетика. 1995. № 7. С. 12 – 15.
- Кек Р.Г., Гриффит П. // Современное машиностроение. Серия А. 1991. № 5. С. 41 – 48.
- Кристенсен О., Андерсен С. // Водоочистка. 2008. № 6. С. 56 – 60.