

# К вопросу о кислородопроницаемости пластмассовых трубопроводов отопительных систем

В. Г. Петров - Денисов, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, А. В. Сладков, канд. техн. наук, заведующий лабораторией инженерного оборудования, ГУП «НИИМосстрой», В. Е. Донников

Необходимость разработки расчетных и экспериментальных методов оценки кислородопроницаемости пластмассовых трубопроводов обусловлена перспективой их широкого внедрения в практику сооружения систем отопления и горячего водоснабжения. В отличие от стальных трубопроводов, которые непроницаемы для кислорода, через стенки пластмассовых трубопроводов кислород из окружающего воздуха в процессе эксплуатации насыщает циркулирующую в них воду, что может привести к интенсивной коррозии стальных элементов отопительных систем. В связи с этим в немецких нормах [1] при кислородопроницаемости пластмассовых трубопроводов, превышающих определенную величину, рекомендуется применять защитные строительные покрытия.

Методика оценки кислородопроницаемости пластмассовых труб в отечественных нормативных документах в настоящее время отсутствует.

Механизм кислородопроницаемости пластмассовых трубопроводов и насыщение циркулирующей в них воды кислородом определяется в основном диффузией кислорода из окружающего воздуха через стенку трубопровода. В отечественной и зарубежной литературе имеется огромное число работ, посвященных диффузии газов и жидкостей через пористые среды, в том числе и через пластмассы [2, 3, 4]. Однако в них рассматриваются задачи диффузионного переноса через газовые и жидкие среды, находящиеся в пористой стенке, разделяющей среды с различными концентрациями диффузионных веществ.

В рассматриваемом случае пористая среда (стенка пластмассового трубопровода) разделяет газ и воду. При этих условиях использовать известные расчетные соотношения не представляется возможным. Поэтому в настоящей работе на основе известных теоретических представлений о диффузионном переносе разработаны расчетные

зависимости, описывающие процессы диффузионного насыщения кислородом воды в пластмассовых трубопроводах, и на их основе выполнены экспериментальные исследования и численная оценка их кислородопроницаемости.

## 1. Результаты экспериментальных исследований кислородопроницаемости пластмассовых трубопроводов

В [1] для оценки кислородопроницаемости пластмассовых труб используется величина  $D$  ( $\text{г}/\text{м}^3 \cdot \text{сут.}$ ), определяющая интенсивность потока кислорода, диффундирующего из воздуха через стенки пластмассового трубопровода в движущийся по нему в стационарном режиме поток воды.

Для определения  $D$  испытывается образец пластмассовой трубы длиной  $l$  (м) с наружным диаметром  $d_n$  и толщиной стенки  $\delta$  (м), через который пропускается вода с малым начальным содержанием кислорода  $C(\text{O}_2)_{l=0}$  ( $\text{мг}/\text{л}$ ), расходом  $Z$  ( $\text{л}/\text{ч}$ ) в течение  $\tau = 24$  ч. В процессе испытаний в установившемся режиме измеряется концентрация кислорода  $C(\text{O}_2)_l$  ( $\text{мг}/\text{л}$ ) в потоке воды на выходе из образца. На основании результатов испытаний поток кислородной диффузии через стенки образца  $Q_m(\text{O}_2)$  ( $\text{мг}/\text{сут.}$ ) вычисляется по формуле:

$$Q_m(\text{O}_2) = [C(\text{O}_2)_l + C(\text{O}_2)_{l=0}] \cdot Z \cdot \tau; \quad (1)$$

величину  $D$  выражают как отношение потока диффузии  $Q_m(\text{O}_2)$  к внутреннему объему образца трубопровода:

$$D = Q_m(\text{O}_2) / (d_n - 2\delta)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot l \cdot 10^{-3}. \quad (2)$$

Определяемый таким образом параметр  $D$  в [1] предлагается использовать в качестве нормируемого показателя, значение которого для предотвращения коррозии металлических элементов отопительных систем с применением пластмассовых трубопроводов не должно превышать  $0,1 \text{ г}/\text{м}^3 \cdot \text{сут.}$  Однако в связи с тем, что величина  $D$  зависит не только от кислородопроницаемости материала образца трубы, используемого в опытах при ее экспериментальном определении, но также от ее диаметра и толщины стенки, этот показатель не может использоваться в качестве нормативного. Справедливость этого утверждения подтверждается результатами расчетов, приведенных ниже.

Плотность диффузионного потока кислорода  $q_m$  ( $\text{мг}/\text{м} \cdot \text{ч}$ ) (14)\* можно определить через параметр  $D$  соотношением:

$$q_m = D \cdot f^1 \cdot \frac{1000}{24}, \quad (3)$$

где  $f$  – внутренний объем единицы длины трубопровода,  $\text{м}^3/\text{м}$ , равный:

$$f^1 = \frac{\pi}{4} (d_n - 2\delta)^2; \quad (4)$$

Таблица 1  
Растворимость кислорода воздуха в воде  $C(\text{O}_2)$   
и константа растворимости  $K$

Температура, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$C_3(\text{O}_2)$ , $\text{г}/\text{м}^3$ ( $\text{мг}/\text{л}$ )	14,5	10,9	9,1	7,1	6,4	5,3	4,5	3,4	2,7	1,6	0
$K \cdot 10^2$ , $\text{г}/\text{м}^3$ ( $\text{мг}/\text{л}$ ) мм рт. ст	9,1	7,1	5,9	4,6	4,2	3,4	2,9	2,2	1,75	1,03	0
$K \cdot 10^4$ , $\text{г}/\text{м}^3$ ( $\text{мг}/\text{л}$ ) Па	7,25	5,45	4,55	3,55	3,2	2,65	2,25	1,70	1,35	1,8	0
$K$ , $\text{мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па})$	0,72	0,54	0,45	0,35	0,32	0,26	0,22	0,17	0,13	0,08	0

1 000 – коэффициент перевода из граммов в миллиграммы, мг/г;  
24 – коэффициент перевода из суток в часы, ч/сут.

Используя рекомендуемое в [1] значение  $D$ , равное  $0,1 \text{ г/см}^3 \cdot \text{сут.}$ , определим по (3) для трубопровода  $d_n = 0,02$  и  $\delta = 0,02$  м эквивалентное значение  $q_m$ :

$$q_m = 0,1 \cdot 0,785 \cdot (0,02 - 2 \cdot 0,02)^2 \cdot \frac{1000}{24} = 8,37 \cdot 10^{-4} \text{ мг/м} \cdot \text{ч},$$

а затем с помощью (14)\* сопротивление кислородопроницаемости стенки трубы:

$$R_m = \frac{P(O_2)_в - P(O_2)_м}{q_m}, \quad (5)$$

где  $P(O_2)_в$  – парциальное давление кислорода в воздухе по (7)\*, равное 19 800 Па.

Средняя по длине опытного участка трубопровода величина концентрации кислорода в потоке воды, проходящей через него при экспериментальном определении кислородопроницаемости  $D$ , обычно составляет  $0,1-0,2$  мг/л. Используя значение константы растворимости (табл. 1) при  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  (рекомендуемая в [1] температура воды при определении  $D$ ), равное  $0,320 \text{ мг/м}^3 \cdot \text{Па}$ , определим среднее по длине образца парциальное давление кислорода на внутренней поверхности стенки трубопровода:

$$P(O_2)_м = \frac{1000}{0,32} \cdot \frac{0,1 + 0,2}{2} = 469 \text{ Па}.$$

По (5) найдем  $R_m$ :

$$R = \frac{19\,800 - 469}{8,37 \cdot 10^{-4}} = 2,31 \cdot 10^7 \frac{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}}{\text{мг}}$$

и по формуле (15)\* – значение кислородопроницаемости материала стенки трубопровода:

$$\lambda_m = \frac{\ln 20/16}{2,31 \cdot 10^{-7} \cdot 6,28} = 1,54 \cdot 10^{-9} \text{ мг/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}.$$

Аналогичные вычисления проведены для трубопроводов  $d_n = 12$  и  $32$  мм.

Анализ данных табл. 2 показывает, что при экспериментальном определении кислородопроницаемости по [1] пластмассовых труб различных диаметров, например  $d_n = 12, 20, 32$  мм, изготовленных из материала, обладающего одной и той же кислородопроницаемостью ( $\lambda_m = 1,54 \cdot 10^{-9} \text{ мг/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$ ) значения  $D$  будут разными: для образцов  $d_n = 12$  и  $\delta = 1,8$  мм –  $0,04$ ; для  $d_n = 20$  и  $\delta = 2$  мм –  $0,1$ ; для  $d_n = 32$  и  $\delta = 4,4$  мм –  $0,3 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$  Таким образом, показатели кислородопроницаемости  $D$ , полученные на образцах с наружным диаметром 20 мм и меньше, будут удовлетворять нормативному, а больше 20 мм – нет.

Исходя из приведенных соображений для определения кислородопроницаемости пластмассовых труб, используемых в системах отопления, вместо параметра  $D$  следует использовать общепринятую во всех технических приложениях для оценки диффузионной проницаемости пористых сред [2, 3] величину – коэффициент кислородопроницаемости  $\lambda_m$ .

Рассматриваемые исследования кислородопроницаемости пластмассовых труб проводились путем экспериментальной реализации процесса, описываемого уравнением (16)\*, а обработка опытных данных – на основе результатов его решения (17, 18)\* и формулы (20)\*.

### 1.1. Методика проведения испытаний

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Поток обескислороженной воды для определения кислородопроницаемости пластмассовых труб приготавливался в устройстве подготовки (6), где сначала конденсировался 10-ти атмосферный пар, получаемый с ТЭЦ-9, который затем охлаждался до комнатной температуры и далее последовательно очищался в механическом и Н-катионитовом фильтрах. После этого конденсат подавался на вход испытываемого образца через фильтр, заполненный кислородопоглощающей смолой. Концентрация кислорода на входе в образец измерялась кислородометром. Установившийся уровень кислорода в воде

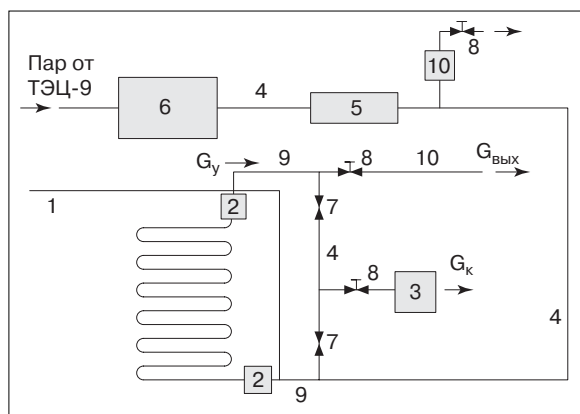


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения кислородопроницаемости пластмассовых труб: 1 – образец пластмассовой трубы; 2 – герметичные соединения сальникового типа; 3 – кислородомер мембранного типа КМЦ-06; 4 – подающие трубы из нержавеющей стали 6 x 1 мм; 5 – кислородопоглощающий фильтр; 6 – устройство подготовки конденсата; 7 – пережимы; 8 – регулирующий зажим; 9 – трубка 7 x 1 мм; 10 – термопара ХК в термометрической гильзе

в опытах не превышал 10 мг/л. Расход пробы через кислородомер в течение всех опытов составлял 8–9 л/ч. Э.Д.С. термопары ХК измерялся ампер-вольтметром ФЗО. В опытах измерения концентрации кислорода выполнялись с цифрового индикатора (шкалы) при диапазоне измерения 200 мг/л. Кроме того, показания кислородомера с его аналогового выхода регистрировались на самопишущем потенциометре.

Чувствительность кислородомера КМЦ-06 при диапазоне измерения 0–200 мг/л составляет 0,1 мг/л, основная погрешность кислородомера равна 10 %.

Образец перед проведением опытов ежедневно по 6 ч в течение недели промывался обескислороженной водой с максимальным расходом, равным 30 л/ч до достижения стационарного уровня кислорода на выходе из участка.

Таблица 2

Результаты расчетов показателей кислородопроницаемости пластмассовых труб

Размеры труб $d_n \times \delta$ , мм	Кислородопроницаемость		Поток диффузии кислорода $q \cdot 10^4$ , мг/м <sup>2</sup> ·ч	Сопротивление кислородопроницанию $R_m \cdot 10^{-7}$ , м·ч·Па/мг
	$D$ , г/м <sup>3</sup> ·сут.	$\lambda_m \cdot 10^{-9}$ , мг/м·ч·Па		
12×1,8	0	0,68	2,29	8,40
20×2	0	1,54	8,40	2,31
32×4,4	0	4,7	17,71	1,09

Опыт начинали с достижения установившейся концентрации кислорода на входе в испытательный участок при максимальном расходе воды через него. После достижения стационарного состояния в журнал наблюдений записывались время, Э.Д.С. термопары, температура холодного спая, показания со шкалы кислородомера и величины расходов через датчик кислородомера и через сливную линию, установленную на выходе из образца.

Затем кислородомер с помощью переключения соответствующих пережимов подключался к выходу из опытного образца. После переключения кислородомера со входа на выход опытного образца расходы воды через кислородомер и образец корректировались, чтобы их величины оставались неизменными. Когда концентрация кислорода на выходе из участка оставалась постоянной в течение часа, в журнал записывались соответствующие показания.

После этого кислородомер вновь присоединялся ко входу в образец, а величину расхода через него уменьшали примерно в 2 раза, и замеры повторяли. Когда в результате такого ступенчатого уменьшения расхода воды через образец достигали минимального расхода через него, равного номинальному расходу пробы через датчик кислородомера, кислородомер опять присоединяли ко входу воды в образец и в последний раз контролировали концентрацию кислорода в ней, и на этом опыт заканчивали.

## 1.2. Результаты испытаний

Испытания кислородопроницаемости проводились на трех образцах пластмассовых труб, характеристика которых приведена в табл. 3. Полученные в процессе проведения испытаний данные приведены в табл. 4, 5, 6, где указаны:

- порядковый номер опыта;
- $P$  – атмосферное давление, мм. рт. ст.;
- $t_{\text{возд}}$  – температура окружающего воздуха, °C;
- $G_y$  – расход воды через образец, л/ч;
- $C_k$  – концентрация кислорода на выходе из образца, мг/л;
- $C_n$  – концентрация кислорода на входе в образец, мг/л;
- $\sigma C_n$  – перепад концентрации кислорода в воде при прохождении через образец, мг/л;
- $\sigma C$  – перепад концентрации кислорода в воде при прохождении через образец после введения поправки на показания кислородомера, мг/л;
- $t_{\text{пр}}$  – температура воды, проходящей через образец, °C;

Таблица 3

Характеристика образцов пластмассовых труб, использованных для определения кислородопроницаемости

№ образца	Материал и конструкция трубы	Размеры образцов		
		длина, м	наружный диаметр, мм	толщина стенки, мм
1	Труба из полипропилена без защитного слоя	26,4	20	2
2	Труба из полипропилена с защитным слоем из алюминиевой фольги шириной около 15 мм и толщиной 0,2 мм намотанной винтообразно с нахлестом 2 мм	26,0	20	2
3	Труба из сшитого полиэтилена без защитного слоя	27,0	22	3

- $g$  – поток кислорода через стенку испытуемой трубы, мг/ч;
- $D$  – кислородопроницаемость, рассчитанная по формуле (2), г/м<sup>3</sup>·сут.;
- $\lambda_m$  – коэффициент кислородопроницаемости стенки трубы, определенный по (20)\*, мг/м·ч·Па.

Таблица 4

Результаты испытаний кислородопроницаемости образца № 1

Опыт 1. $P = 741$ мм рт. ст., $t_{\text{возд}} = 24,4$ °C								
$G_y$	$C_k$	$C_n$	$\sigma C_n$	$\sigma C$	$t_{\text{пр}}$	$g$	$D$	$\lambda_m \cdot 10^{-6}$
л/ч	мгк/л	мгк/л	мгк/л	мгк/л	°C	мг/ч	г/м <sup>3</sup> ·сут.	мг/м·ч·Па
32,6	14,5	-	7,8	11,6	25,8	0,379	1,714035	0,031
24,6	15,5	-	8,9	13,3	23,5	0,326	1,474009	0,026
15,1	18,6	-	11,9	17,7	23,3	0,268	1,209759	0,021
9	32,9	-	26,2	39	23,2	0,351	1,587519	0,028
								Ср. = 0,026
Опыт 2. $P = 741$ мм рт. ст., $t_{\text{возд}} = 21$ °C								
$G_y$	$C_k$	$C_n$	$\sigma C_n$	$\sigma C$	$t_{\text{пр}}$	$g$	$D$	$\lambda_m \cdot 10^{-6}$
л/ч	мгк/л	мгк/л	мгк/л	мгк/л	°C	мг/ч	г/м <sup>3</sup> ·сут.	мг/м·ч·Па
32,8	14,7	-	7,7	11,5	21,5	0,376	1,701392	0,029
23,4	17,9	-	12	17,9	21,7	0,418	1,89048	0,034
15,2	23,9	-	18	26,8	23	0,408	1,846854	0,032
								Ср. = 0,032
Опыт 3. $P = 739$ мм рт. ст., $t_{\text{возд}} = 23,5$ °C								
$G_y$	$C_k$	$C_n$	$\sigma C_n$	$\sigma C$	$t_{\text{пр}}$	$g$	$D$	$\lambda_m \cdot 10^{-6}$
л/ч	мгк/л	мгк/л	мгк/л	мгк/л	°C	мг/ч	г/м <sup>3</sup> ·сут.	мг/м·ч·Па
32,8	18,3	-	9,8	14,6	25,1	0,479	2,165408	0,003
9	33,2	-	25,2	37,5	24,9	0,338	1,526926	0,027
33	16,2	-	8,8	13,1	24,9	0,432	1,955112	0,037
								Ср. = 0,031

Таблица 5

Результаты испытаний кислородопроницаемости образца № 2

Опыт 1. $P = 745$ мм рт. ст., $t_{\text{возд}} = 20,5$ °C								
$G_y$	$C_k$	$C_n$	$\sigma C_n$	$\sigma C$	$t_{\text{пр}}$	$g$	$D$	$\lambda_m \cdot 10^{-6}$
л/ч	мгк/л	мгк/л	мгк/л	мгк/л	°C	мг/ч	г/м <sup>3</sup> ·сут.	мг/м·ч·Па
15,2	8,7	-	2,4	3,57	23,4	0,054	0,245651	0,044
16,5	8,3	-	2	2,98	23,4	0,049	0,222749	0,041
13,3	9,7	-	3,4	5,06	23,4	0,068	0,305206	0,053
5,54	12,3	-	6	8,9	23,4	0,049	0,223725	0,035
								Ср. = 0,041
Опыт 2. $P = 745$ мм рт. ст., $t_{\text{возд}} = 20,5$ °C								
$G_y$	$C_k$	$C_n$	$\sigma C_n$	$\sigma C$	$t_{\text{пр}}$	$g$	$D$	$\lambda_m \cdot 10^{-6}$
л/ч	мгк/л	мгк/л	мгк/л	мгк/л	°C	мг/ч	г/м <sup>3</sup> ·сут.	мг/м·ч·Па
22,1	8,4	6,4	2	2,98	23,4	0,066	0,297306	0,053
13,8	9,1	6,2	2,9	4,32	23,4	0,06	0,269434	0,047
14,9	9,2	6,1	3,1	4,62	23,4	0,069	0,310556	0,054
21,7	7,8	6,2	1,6	2,38	23,4	0,052	0,233967	0,042
								Ср. = 0,049

На основании полученных данных установлено, что коэффициенты кислородопроницаемости стенки  $\lambda_m$  и кислородопроницаемости по [1] труб, изготовленных из полипропилена и сшитого полиэтилена (табл. 4, 6) одинаковы и в среднем составляют соответственно:  $\lambda_m = 0,03 \cdot 10^{-6}$  мг/м<sup>3</sup>·ч·Па;  $D = 2$  г/м<sup>3</sup>·сут.; при отклонении опытных данных от среднего значения не более 10 %. Следует отметить, что найденная величина  $\lambda_m$  коррелируется с данными для полиэтилена, приведенными в [4].

Устройство в трубе из полипропилена защитного слоя из ленты алюминиевой фольги, намотанной винтообразно с нахлестом 2 мм, снижает кислородопроницаемость ее стенки в 10 раз (табл. 5), но при этом она все же в 2 раза превышает требуемую по [1].

Отметим, что методика экспериментального определения кислородопроницаемости пластмассовых труб, реализующая стационарный процесс диффузии кислорода из окружающего воздуха в поток воды, движущийся с постоянным расходом через образец трубопровода, обладает существенным недостатком.

Для измерения перепада концентраций кислорода по длине образца с достаточной точностью испытания прихо-

дится проводить при очень низких скоростях воды в образцах от 0,01 до 0,05 м/с при значениях критерия Рейнольдса от 140 до 800, т. е. при ламинарном режиме движения.

В трубопроводах системы отопления скорость воды значительно выше, и преобладающим режимом движения воды в них является турбулентный. При испытаниях пластмассовых труб, обладающих малой кислородопроницаемостью величины перепада концентраций кислорода, которые требуется измерять, составляют 0,0005–0,001 мг/л, что находится на пределе чувствительности кислородомера.

Для преодоления этих затруднений экспериментальное определение кислородопроницаемости пластмассовых трубопроводов целесообразно производить в нестационарном режиме насыщения воды, циркулирующей в замкнутом контуре пластмассового трубопровода, а для обработки опытных данных использовать уравнение (22)\* и его решение (29)\*.

## 2. Оценка и нормирование кислородопроницаемости пластмассовых труб для отопительных систем

В качестве обоснования принятой в [1] нормативной величины кислородопроницаемости пластмассовых труб для отопительных систем ( $D \leq 0,1$  г/м<sup>3</sup>·сут.) в DIN 4726 приводится следующая аргументация:

- пластмассовые трубы для горячего водоснабжения и теплых полов требуют для обеспечения длительной прочности, 50 лет, при максимальных критических условиях применения коэффициента надежности 2,5;

- по мере накопления опыта применения пластмассовых труб для горячего водоснабжения и теплых полов на основе дополнительных исследований будут усилены соответствующие требования.

Назначение для кислородонепроницаемых труб допустимой проницаемости 0,10 г/м<sup>3</sup>·сут. имеет следующее обоснование. Проницаемость труб при 40 °С соответствует 5 г/м<sup>3</sup>·сут. За 200 дней работы проходит стократный обмен нагретой воды на свежую с концентрацией кислорода 10 г/м<sup>3</sup>. Следует стремиться, чтобы обмен за отопительный период (200 дней) был примерно однократным. При этом не будет коррозии. Отсюда следует коэффициент 0,05 г/м<sup>3</sup>·сут., который удваивается, принимая во внимание спорные результаты исследований различных пластмасс.

Логика приведенных соображений следующая: под свежей водой следует понимать воду с концентрацией кислорода 10 г/м<sup>3</sup>, соответствующей его растворимости в ней при длительном контакте с воздухом при температуре 18–20 °С и нормальном давлении (табл. 1). Разделив 10 г/м<sup>3</sup> на 5 г/м<sup>3</sup>·сут. – кислородопроводность пластмассовых труб, получают двукратную замену воды в трубопроводе на свежую за сутки, а за отопительный период (200 дней) стократную. Затем утверждается, что при однократной замене воды на свежую за 200 дней эксплуатации отопительной системы, смонтированной с применением пластмассовых труб, коррозии ее металлических элементов не будет. Полученное на основе этого утверждения значение нормативной кислородопроницаемости (0,05 г/м<sup>3</sup>·сут.) удваивается по соображениям спорности имеющихся в настоящее время результатов исследований кислородопроницаемости различных видов пластмасс.

Оценивая обоснования назначения в [1] нормированной величины кислородопроницаемости пластмассовых трубопроводов  $D = 0,1$  г/м<sup>3</sup>·сут., необходимо отметить следующее:

- Во-первых, принятый для ее определения механизм насыщения кислородом воды, циркулирующей в пластмассовых трубопроводах в процессе эксплуатации отопительных

Таблица 6  
Результаты испытаний кислородопроницаемости образца № 3

Опыт 1. P = 740 мм рт. ст., t <sub>возд.</sub> = 19 °С								
G <sub>y</sub>	C <sub>к</sub>	C <sub>н</sub>	σC <sub>н</sub>	σC	t <sub>пр</sub>	g	D	λ <sub>m</sub> · 10 <sup>-6</sup>
л/ч	мгк/л	мгк/л	мгк/л	мгк/л	°С	мг/ч	г/м <sup>3</sup> ·сут.	мг/м <sup>3</sup> ·ч·Па
19,4	21,6	6,1	15,5	23,1	23,4	0,449	2,028631	0,036
19,4	21,5	6	15,5	23,1	23,4	0,449	2,028631	0,036
14	26,6	5,1	21,5	32	23,4	0,449	2,032226	0,036
14	26,5	5,1	21,4	31,9	23,4	0,447	2,022814	0,035
9	36	5,1	30,9	46	23,4	0,414	1,872302	0,032
9	36,4	5,1	31,3	46,6	23,4	0,419	1,896539	0,033
								Ср. = 0,035
Опыт 2. P = 745 мм рт. ст., t <sub>возд.</sub> = 18,2 °С								
G <sub>y</sub>	C <sub>к</sub>	C <sub>н</sub>	σC <sub>н</sub>	σC	t <sub>пр</sub>	g	D	λ <sub>m</sub> · 10 <sup>-6</sup>
л/ч	мгк/л	мгк/л	мгк/л	мгк/л	°С	мг/ч	г/м <sup>3</sup> ·сут.	мг/м <sup>3</sup> ·ч·Па
18,6	20,4	5,8	14,6	21,7	23,4	0,404	1,828272	0,032
18,6	20,3	5,8	14,5	21,6	23,4	0,402	1,81575	0,032
16,3	22,9	4,9	18	26,8	23,4	0,437	1,977733	0,035
16,3	22,8	4,9	17,9	26,7	23,4	0,435	1,966746	0,034
12,6	24,6	4,9	19,7	29,3	23,4	0,37	1,671136	0,029
12,6	24,7	4,9	19,8	29,5	23,4	0,371	1,679619	0,029
18,2	18,6	4,6	14	20,8	23,4	0,38	1,719206	0,03
18,2	18,4	4,6	13,8	20,5	23,4	0,375	1,694646	0,029
								Ср. = 0,031
Опыт 3. P = 745 мм рт. ст., t <sub>возд.</sub> = 19 °С								
G <sub>y</sub>	C <sub>к</sub>	C <sub>н</sub>	σC <sub>н</sub>	σC	t <sub>пр</sub>	g	D	λ <sub>m</sub> · 10 <sup>-6</sup>
л/ч	мгк/л	мгк/л	мгк/л	мгк/л	°С	мг/ч	г/м <sup>3</sup> ·сут.	мг/м <sup>3</sup> ·ч·Па
18,2	18,7	5,1	13,6	20,3	23,4	0,369	1,670086	0,029
18,2	18,8	5,1	13,6	20,4	23,4	0,372	1,682366	0,029
13,9	22,4	4,3	18,1	27	23,4	0,374	1,696262	0,30
13,9	22,3	4,4	17,9	26,7	23,4	0,371	1,677518	0,029
11,5	26,2	4,4	21,8	32,5	23,4	0,374	1,690768	0,03
11,5	26,2	4,4	21,8	32,5	23,4	0,374	1,690768	0,03
18,2	16,2	4,7	11,5	17,1	23,4	0,312	1,412205	0,025
18,2	15,6	4,6	11	16,4	23,4	0,299	1,350805	0,024
								Ср. = 0,028

систем, не соответствует действительности. Никакого обмена нагретой воды на свежую при этом в системе не происходит.

С момента заполнения системы водой перед началом отопительного сезона ( $\tau = 0$ ) с содержанием кислорода  $C(O_2)_{\tau=0}$  и до его окончания в течение около 200 суток (центральный регион Европейской части России) циркулирующий в замкнутом контуре трубопроводов постоянный объем воды (независимая схема присоединения к тепловой сети) непрерывно насыщается кислородом, диффундирующим через стенки пластмассовых трубопроводов из окружающего воздуха. Условием исключения коррозии металлических элементов отопительной системы при этом является низкая концентрация кислорода в циркулирующей в системе воде. По-видимому, для этого достаточно, чтобы в течение отопительного сезона концентрация кислорода в ней не превышала 0,05 мг/л – нормативное значение [6] для подпиточной воды тепловых сетей.

- Во-вторых, утверждение о том, что при двукратной в течение отопительного сезона замене воды в системе на свежую с концентрацией 10 г/м<sup>3</sup> (10 мг/л) коррозии не будет, не имеет ни теоретического, ни экспериментального подтверждения.

Если в дополнение к высказанным соображениям учесть то обстоятельство (см. раздел 1), что при экстремальном определении кислородопроницаемости по [1] величина  $D$  зависит не только от сопротивления диффузии кислорода материала стенки опытного образца трубы, но также от его геометрических размеров (диаметр и толщина стенки), а в [1] эти параметры не нормируются, следует заключить: применение рекомендуемого в [1] критерия для оценки кислородопроницаемости пластмассовых труб, используемых в системах отопления, и степени определяемой ею интенсивности коррозионного воздействия на металлические элементы этих систем не позволяет получить необходимые для практики достоверные рекомендации.

Ниже на конкретном примере рассматривается применение для этих целей расчетных методов, основанных на теоретических предпосылках, изложенных в первом разделе работы.

Расчеты выполняются для системы отопления теплопроизводительностью 12 кВт, смонтированной из пластмассовых труб, характеристики которых представлены в табл. 7.

Объем воды в системе – 0,145 м<sup>3</sup>, ее средняя температура принята 60 °С (константа растворимости – 0,225 мг/м<sup>3</sup>·Па).

При заполнении системы отопления водой из тепловой сети в начале отопительного сезона концентрация растворенного в ней кислорода  $C(O_2)_{\tau=0} = 0,02$  мг/л, что соответствует парциальному давлению на внутренних стенках пластмассовых труб  $P(O_2)_{m(\tau=0)} = 89$  Па. Парциальное давление кислорода в воздухе по (7)\*  $P(O_2)_B = 19\,800$  Па.

Предварительная динамика насыщения кислородом воды в системе в процессе эксплуатации определяется без учета расхода кислорода на коррозию ее металлических элементов при  $N = 0$  по (29)\* для двух значений кислородопроницаемости труб:  $D = 0,1$  г/м<sup>3</sup>·сут.;  $\lambda_m = 1,64 \cdot 10^{-9}$  мг/м·ч·Па и  $D = 2,0$  г/м<sup>3</sup>·сут.;  $\lambda_m = 3,6 \cdot 10^{-8}$  мг/м·ч·Па при значениях параметра  $M$  (табл. 7).

$$M = \frac{7,38 \cdot 10^{-6}}{225 \cdot 0,145} = 2,26 \cdot 10^{-4} - 4u \cdot \frac{1,62 \cdot 10^{-4}}{0,225 \cdot 0,145} = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

Результаты расчетов (рис. 2), выполненных по (29)\* без учета расхода кислорода на коррозию, при параметрах  $M$  (табл. 7) показали, что при значении кислородопроницаемости пластмассовых труб  $\lambda_m = 1,64 \cdot 10^{-9}$  мг/м·ч·Па, удовлетворяющем нормативные требования [1] ( $D = 0,1$  г/м<sup>3</sup>·сут.), концентрация кислорода в воде, циркулирующей в системе,

Таблица 7

Характеристики пластмассовых труб системы отопления

i	d <sub>i</sub> , м	d <sub>в</sub> , м	δ, м	l <sub>p</sub> , м	F <sub>p</sub> , м <sup>2</sup>	F <sub>i</sub> ·λ <sub>m</sub> /δ <sub>i</sub> при:	
						D = 0,1 г/м <sup>3</sup> ·сут. λ <sub>m</sub> = 1,64·10 <sup>-9</sup> мг/м·ч·Па	D = 2 г/м <sup>3</sup> ·сут. λ <sub>m</sub> = 3,6·10 <sup>-8</sup> мг/м·ч·Па
1	0,016	0,0124	0,0018	56	2,5	2,8·10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-5</sup>
2	0,020	0,016	0,002	56	3,16	2,6·10 <sup>-6</sup>	5,69·10 <sup>-5</sup>
3	0,047	0,038	0,0045	15	2,0	0,73·10 <sup>-6</sup>	1,6·10 <sup>-5</sup>
4	0,04	0,032	0,004	20	2,26	0,93·10 <sup>-6</sup>	2,03·10 <sup>-5</sup>
5	0,032	0,025	0,0035	20	1,79	0,84·10 <sup>-6</sup>	1,84·10 <sup>-5</sup>
$\sum_{i=1}^5 F_i \cdot \lambda_m / \delta_i =$						7,38·10 <sup>-6</sup>	1,62·10 <sup>-4</sup>

к концу отопительного сезона достигает 2,96 мг/л, а среднеинтегральное за 200 суток – 1,8 мг/л. Таким образом, выполнение нормативного требования [1] не исключает коррозию металлических элементов системы в процессе эксплуатации.

В связи с полученными результатами используем решение (29)\* для ответа на вопрос: какой кислородопроницаемостью должны обладать пластмассовые трубы, чтобы при начальном содержании кислорода в воде  $C(O_2)_{\tau_0}$ , циркулирующей в системе отопления из пластмассовых труб, при длительности отопительного сезона  $\tau_0$  концентрация кислорода при его окончании  $C(O_2)_{\tau_0}$  не превышала заданной величины.

Из уравнения (29)\* получим:

$$M = \frac{P(O_2)_B - \frac{1000}{K} C(O_2)_{\tau_0}}{P(O_2)_B - \frac{1000}{K} C(O_2)_{\tau_0}} \cdot \tau_0 \quad (6)$$

и по (24)\*

$$\lambda_m = \frac{M \cdot V \cdot K}{\sum_{n=1}^n \frac{F_n}{\delta_n}} \quad (7)$$

Принимая  $C(O_2)_{\tau_0} = 0,02$  мг/л;  $C(O_2)_{\tau_0} = 0,05$  мг/л;  $\tau_0 = 4\,800$  ч и используя данные табл. 7, находим:

$$M = \frac{19\,800 - \frac{1\,000}{0,225} \cdot 0,05}{19\,800 - \frac{1\,000}{0,225} \cdot 0,02} = \frac{-\ln 0,99325}{4\,800} = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$$

$$\lambda_m = \frac{1,4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,145 \cdot 0,225}{4\,500} = 1,1 \cdot 10^{-11} \text{ мг/м·ч·Па,}$$

т. е. для того чтобы предотвратить коррозию металлических элементов в рассматриваемой системе, в ней следует использовать практически не кислородопроницаемые пластмассовые трубы.

В заключение рассмотрим влияние коррозии металлических элементов в системе с пластмассовыми трубами на динамику насыщения кислородом циркулирующей воды. Для этого

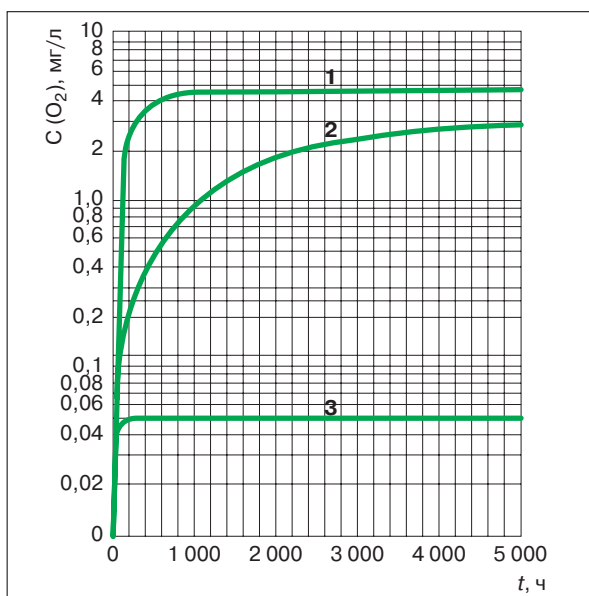


Рис. 2. Динамика насыщения кислородом воды, циркулирующей в отопительной системе при кислородопроницаемости пластмассовых труб: 1 –  $\lambda_m = 3,6 \cdot 10^{-8}$  мг/м·ч·Па ( $D = 2$  г/м<sup>3</sup>·сут.); 2 –  $\lambda_m = 1,64 \cdot 10^{-9}$  мг/м·ч·Па ( $D = 0,1$  г/м<sup>3</sup>·сут.); 3 – то же при наличии металлических элементов в системе с площадью коррозионного взаимодействия  $F_k = 0,454$  м<sup>2</sup>

используем формулу (30)\* которая показывает, что при достаточно большой продолжительности работы системы ( $\tau \rightarrow \infty$ ) концентрация кислорода в воде не зависит от начальной и однозначно определяется постоянными параметрами  $P(O_{2B})$ ;  $M$  и  $N$ .

Из (30)\* при известных значениях  $M$  и  $P(O_{2B})_{\tau \rightarrow \infty}$ , связанного с заданной  $C(O_2)_{\tau \rightarrow \infty}$  соотношением:  $P(O_{2B})_{\tau \rightarrow \infty} = [C(O_2)_{\tau \rightarrow \infty}] / (10^{-3}K)$ , где  $K$  – константа растворимости при 60°, равная 0,225 мг/м<sup>3</sup>·Па; с помощью выражения (26)\* определим площадь поверхности коррозионного взаимодействия  $F_k$  (м<sup>2</sup>), которая обеспечит заданную концентрацию кислорода в циркулирующей воде при  $\tau \rightarrow \infty$ :

$$F_k = \frac{N \cdot K \cdot V}{\psi \cdot \delta} \quad (8)$$

Используя приведенные зависимости, найдем  $F_k$  для примера, рассмотренного выше (рис. 2, кривая 2), при  $M = 7,3 \cdot 10^{-6} / 0,225 \cdot 0,145 = 2,26 \cdot 10^{-4}$  1/ч (табл. 7) и  $C(O_2)_{\tau \rightarrow \infty} = 0,05$  мг/л.

Предварительно исходя из условий поставленной задачи определим параметр  $N$ :

$$N = \frac{M[P(O_{2B})_{\tau \rightarrow \infty} - P(O_{2m})_{\tau \rightarrow \infty}]}{P(O_{2m})_{\tau \rightarrow \infty}} = \frac{2,25 \cdot 10^{-4} (19\,800 - 222)}{222} = 0,0199.$$

По (8), принимая константу скорости коррозии по данным [7, 8], равной  $\psi = 0,005$  мг/м<sup>2</sup>·ч·Па, получим:

\* Теоретические основы кислородопроницаемости пластмассовых труб в системах отопления см. в журнале «Пластические массы», 2003, № 2, с. 29–37. Нумерация формул соответствует оригиналу.

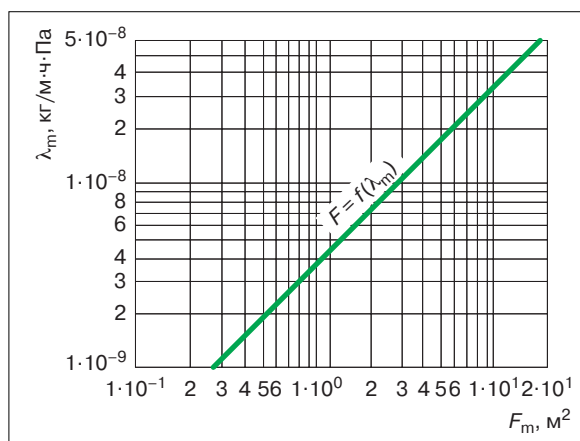


Рис. 3. Требуемая поверхность коррозионного взаимодействия  $F_k$  (м<sup>2</sup>), обеспечивающая концентрацию кислорода в системе отопления (табл. 7), не превышающую 0,05 мг/л, в зависимости от кислородопроницаемости пластмассовых труб  $\lambda_m$

$$F_k = \frac{0,0199 \cdot 0,225 \cdot 0,145}{0,005 \cdot 0,286} = 0,454 \text{ м}^2$$

Расчитанная с помощью (28)\* для  $M = 2,26 \cdot 10^{-4}$  и  $N = 0,0199$  1/ч, кривая насыщения кислородом воды, циркулирующей в системе, характеристики которой приведены в табл. 7, при наличии в ней корродирующих металлических элементов с площадью  $F_k = 0,454$  м<sup>2</sup>, что на практике, по-видимому, всегда будет выполняться, показывает (рис. 2, кривая 3), что уже спустя 5 суток после начала отопительного периода в циркулирующей воде устанавливается требуемая концентрация кислорода:  $C(O_2)_{\tau \rightarrow \infty} \approx 0,05$  мг/л.

Приведенные выше результаты, полученные с помощью расчетных зависимостей, найденных на основе теоретического анализа кислородопроницаемости пластмассовых труб в отопительных системах (первый раздел работы), позволяют сделать важный для практики вывод: при разработке требований по кислородопроницаемости пластмассовых труб следует учитывать не только процесс диффузионного переноса кислорода из окружающего воздуха через стенки труб в циркулирующую по ним воду, но и сопутствующий ему – поглощение кислорода при коррозии металлических элементов отопительной системы.

Реализация такого подхода на основе предложенного расчетного метода, иллюстрируемого графиком  $F_k = f(\lambda_m)$  (рис. 3), позволит при соблюдении определенных условий (наличие в системе отопления металлических элементов, подвергающихся коррозии) снизить требования к защитным покрытиям пластмассовых труб. ●

Вопросы и отзывы по статье просим присылать по e-mail: [vopros@abok.ru](mailto:vopros@abok.ru)

## Литература

1. DIN 4762, DIN 472, DIN 4792.
2. Бэрер Р. Диффузия в твердых телах. М., 1948.
3. Рейтлингер С. А. Проницаемость полимерных материалов. М., 1974.
4. Николаев Н. И. Диффузия в мембранах. М., 1980.
5. Петров-Денисов В. Г., Сладков А. В., Донников В. Е. Кислородопроницаемость пластмассовых трубопроводов отопительных систем // Пластические массы. 2003. № 2. С. 29–37.
6. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации СПО «ОРГРЭС». М., 1996.
7. Уллик Г. Г., Ревин Р. У. Коррозия и борьба с ней. Л., 1989.
8. Коррозия и защита химической аппаратуры / Под ред. А. М. Сухотина. Т. 3. Л., 1970.