

Определение долговечности системы водяного отопления на основе совокупного расчета кислородопроницаемости и коррозии

А.Ю. Кашуркин^{1,2}, С.М. Усиков^{1,2}, И.В. Мельникова^{1,2}

*¹Научно-исследовательский институт строительной физики Российской
академии архитектуры и строительных наук*

*²Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет*

Аннотация: В настоящей работе освещается проблема определения долговечности систем водяного отопления на основе комплексного анализа кислородопроницаемости и коррозионных процессов. Основное внимание уделяется электрохимической коррозии стальных элементов системы. Рассматриваются такие виды коррозии как общая, локальная, питтинговая и язвенная. Проанализированы различные экспериментальные данные и из них получены количественные зависимости скорости коррозии, коррозионной проницаемости и глубины язвенной коррозии в зависимости от температуры теплоносителя и концентрации растворенного кислорода. Для систем водяного отопления с полимерными трубами без кислородного барьера предложена методика расчета динамики концентрации кислорода в теплоносителе. Разработан критерий оценки долговечности системы, связывающий накопленную глубину язвенной коррозии с толщиной стенки наиболее тонкостенного элемента. Показано, что долговечность системы напрямую зависит от начального содержания кислорода и кислородопроницаемости полимерных труб. Предложенный метод позволяет прогнозировать долговечность и планировать замену оборудования, предотвращая аварии.

Ключевые слова: язвенная коррозия, коррозия, системы отопления, полимерные трубы, теплоноситель, кислородопроницаемость, долговечность

Введение

В системах водяного отопления наибольшую опасность представляет электрохимическая коррозия, которая в большинстве случаев протекает в присутствии коррозионного агента – кислорода. Также агентами могут выступать углекислый газ и водород. Основными элементами системы, которые подвержены такому виду коррозии являются трубы, отопительные приборы, арматура и теплообменники (в том числе первичные теплообменники котлов), которые выполнены из стали. В некоторых случаях, в присутствии в теплоносителе кислот, оксидная защитная «пассивирующая» пленка смывается с поверхности алюминиевых элементов и тогда

интенсивной электрохимической коррозии становятся подвержены элементы из нержавеющей стали и алюминия.

Согласно [1], различают общую (сплошную коррозию) и локальную. Общая коррозия в свою очередь подразделяется на равномерную (протекает с одинаковой скоростью на всей поверхности металла), неравномерную (различная скорость на разных участках) и избирательную (коррозия при использовании различных материалов в системе).

Локальная коррозия, как правило, протекает интенсивнее общей, а признаки разгерметизации системы проявляются на более ранних сроках эксплуатации.

Локальная коррозия в свою очередь подразделяется на:

— питтинговую (точечную), при которой наблюдается повреждение малого диаметра (0,1-2 мм), но значительной глубины.

Представлена на рис. 1 (а,б);



а)



б)

Рис. 1. – Питтинговая коррозия секционного (а) и панельного (б) радиаторов

— язвенную, при которой глубина повреждения соизмерима с его диаметром. Представлена на рис. 2 (а,б);



а)



б)

Рис. 2. – Внешняя язвенная коррозия трубы (а) и стального панельного радиатора (б)

- коррозия пятнами, при которой поражение распространяется сравнительно не глубоко, но занимает значительные участки поверхности – чаще встречается при атмосферной коррозии;
- коррозионное растрескивание, возникающее при одновременном воздействии коррозионной среды и механических напряжений (в том числе под действием гидростатического давления) с образованием трещин (бывает межкристаллическая и транскристаллитная).

Также стоит отметить подплёночный вид коррозии, представленный на рис. 3, который возникает под слоем лакокрасочного материала, и может относиться как общей, так и локальной.



Рис. 3 – Подплёночная коррозия стальных панельных радиаторов

Определение скорости разрушения оборудования системы под действием процесса коррозии, с точки зрения практических расчетов, является достаточно сложной задачей, так как зависит от большого числа факторов и условий. Для систем водяного отопления, данный вопрос интересен для определения долговечности системы, предупреждения аварий и нахождения наиболее уязвимых мест в системе.

Скорость общей коррозии металлов насчитывают по потере массы в системе, отмеченной к единице поверхности и единице времени [2]. Тогда используют весовой показатель K , $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, который можно определить по формуле (1):

$$K = \frac{\Delta m}{ST}, \quad (1)$$

где Δm – потеря массы металла, г; S – общая поверхность корродирующего металла, м^2 ; T – продолжительность коррозионного процесса, ч.

Как отмечалось ранее, более интересным с точки зрения эксплуатации систем водяного отопления, является определение глубины коррозии. Тогда используют критерий проницаемости Π , $\text{мм}/\text{год}$, который является отношением средней глубины коррозии, отнесенной к единице времени. Данный параметр определяют по формуле (2):

$$\Pi = \frac{8,76K}{\rho_{\text{мет}}} = 8,76 \frac{\Delta m}{ST\rho_{\text{мет}}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{мет}}$ – плотность металла, для стали в среднем составляет $7,85 \text{ г}/\text{см}^3$.

Говоря о наиболее важной с точки зрения срока службы отдельных элементов питтинговой коррозии, оценивают максимальную глубину коррозионных разрушений $h_{\text{макс}}$, мм. А в зарубежной практике используют понятие “питтинговой фактор” $K_{\text{пит}}$, который является отношением

максимальной глубины питтинга к средней глубине проникновения коррозии:

$$K_{\text{пит}} = \frac{h_{\text{макс}}}{\Pi}. \quad (3)$$

Значение водородного показателя pH теплоносителя в значительной мере влияет на скорость коррозии углеродистых сталей. Согласно [1, 3] известна зависимость скорости общей коррозии от значения pH, которая представлена на рис. 4.

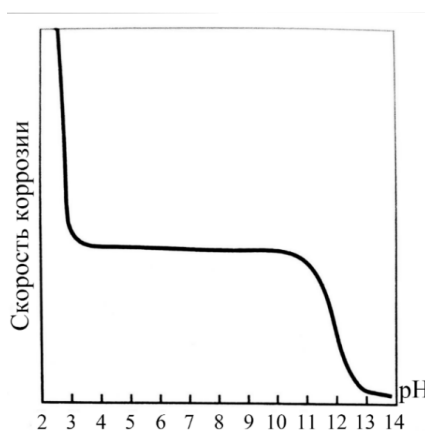


Рис. 4. – Влияние pH на скорость общей коррозии углеродистых сталей в аэрированной воде при 25 °С

Несмотря на то, что график построен для температуры воды, не характерной при эксплуатации системы отопления, стоит отметить, что скорость коррозии от показателя pH в диапазоне от 4 до 10,5 практически не изменяется. Согласно Правилам технической эксплуатации объектов теплоснабжения и теплопотребляющих установок (приказ Минэнерго № 511) в закрытых системах теплоснабжения данный показатель находится в диапазоне 8,3-10,5, а значит, скорость коррозии, при использовании в качестве подпитки воды из тепловой сети, не будет значительно изменяться под действием переменного показателя pH.

Значение pH во многом влияет и на локализацию коррозии. В работах ВТИ [4] было показано, что при повышении значения pH аэрированной воды

с 7 до 9,5 возможен переход от равномерной коррозии к локальной коррозии, в том числе питтинговой. Стоит отметить, что при деаэрированной воде такая зависимость не наблюдается, и скорость внутренней коррозии при pH более 9,5 значительно ниже.

В работе [5] приводится следующий график зависимости скорости коррозии стали в воде от содержания кислорода, который представлен на рис. 5.

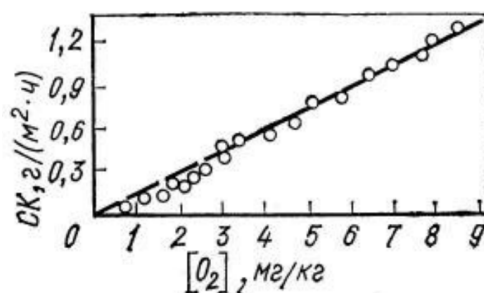


Рис. 5. – Зависимость скорости коррозии стали в воде от содержания кислорода

Примечательными являются исследования, проведенные в ВТИ [6]. Они показывают комплексное влияние температуры и концентрации кислорода применительно к реальным условиям теплосети. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица №1

Зависимость скорости коррозии стали в сетевой воде от концентрации O₂ и температуры

Температура, °С	Скорость общей коррозии, мм/год, при концентрации O ₂ , мкг/кг			
	40	70	120	170
40-57	0,163	0,400	0,441	0,480
80-86	0,177	0,450	0,504	0,588

В [2] отмечается, что в процессе электрохимической коррозии интенсивно расходуется кислород, а скорость его расходования тем выше, чем больше концентрация. В общем случае в процессе коррозии при расходовании 1 г кислорода растворяется 3,5 г железа.

В [6, 7] приведен график зависимости скорости общей и язвенной коррозии стали от содержания кислорода в сетевой воде, который представлен рис.6. Так, при повышении концентрации с 20 до 100 мкг/дм³ скорость коррозии возрастает в 3 раза.

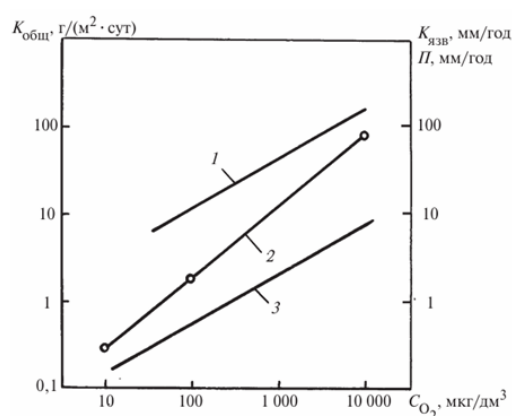


Рис. 6. – Зависимость скорости коррозии углеродистой стали от концентрации кислорода: 1 — общая коррозия; 2 — язвенная коррозия; 3 — проникаемость

В [8] отмечается, что согласно данным, полученным при эксплуатации оборудования, отношение максимальных значений скоростей язвенной и общей коррозии трубопроводов теплосети составляет 6—8. Исследования скорости язвенной коррозии углеродистой стали наиболее полно проведены при высоких концентрациях кислорода [5]. В частности показано, что в условиях полного насыщения исходного раствора кислородом при температуре 80 °С и рН = 8,5 скорость язвенной коррозии превышает скорость общей коррозии примерно в 30 раз. Это важная информация, которая в дальнейшем позволит косвенно связать газопроницаемость полимерных труб, концентрацию кислорода и срок службы системы.

При протекании электрохимической коррозии образуются вторичные продукты коррозии, такие как гидроокись железа $\text{Fe}(\text{OH})_2$, гидроокись железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Данные труднорастворимые соединения в нейтральной и слабощелочной среде в большинстве осаждаются из раствора. Осаждение

вторичных продуктов коррозии оказывает тормозящее действие на коррозионный процесс. Так, стендовые испытания, при температуре воды 40 °С и содержании кислорода 5 мг/кг [4] показали, что скорость коррозии стали за 10 суток уменьшилась в 2 раза. Данный график представлен на рис. 7.

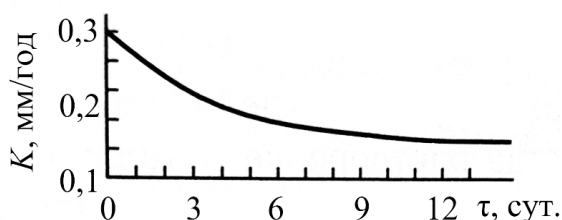


Рис. 7. –Зависимость скорости коррозии K, мм/год, углеродистой стали в воде от времени при 40 °С и концентрации O₂ 5 мг/кг

С повышением температуры увеличивается скорость всех коррозионных процессов. Для химической коррозии есть такое ориентировочно правило – с повышением температуры на 10 °С удваивается скорость коррозии.

Однако, при электрохимической коррозии с кислородной деполяризацией на скорость коррозии влияет снижение растворимости кислорода при повышенных температурах. Так повышение температуры влияет более «плавно» - примерно 20-30 % на 10 °С.

Кислородная электрохимическая коррозия наблюдается на пике при 60-70 °С. График представлен на рис. 8.

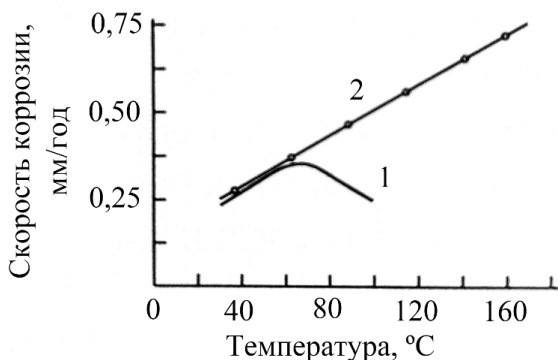


Рис. 8. – Зависимость скорости коррозии железа от температуры в открытом (1) и закрытом (2) объеме

Методы исследования

По данным, представленным выше, можно сделать вывод, что есть общая точка по концентрации кислорода в воде, а именно 40 г/м^3 :

1. Согласно графику (приведен на рис. 5) при концентрации 40 г/м^3 , наблюдается:

— общая коррозия $K = 0,5 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{ч)}$.

2. Согласно графикам (приведен на рис. 6-8) при концентрации 40 г/м^3 , наблюдается:

— общая коррозия $K = 8 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{сут.)} = 0,33 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{ч)}$;

— проницаемость $\Pi = 0,38 \text{ мм/год}$;

— глубина язвенной коррозии $K_{\text{язв}} = 1 \text{ мм/год}$.

3. Согласно таблице №1 при концентрации 40 г/м^3 , наблюдается:

— в диапазоне температуры $40\text{-}57^\circ\text{C}$ проницаемость $\Pi = 0,163 \text{ мм/год}$;

— в диапазоне температуры $80\text{-}86^\circ\text{C}$ проницаемость $\Pi = 0,177 \text{ мм/год}$.

Проницаемость по данным рис. 6 и таблице 1 отличаются. Вероятнее всего это связано с тем, что в [8] учитывалась коррозия в питательном тракте котла, а по [4] в тепловой сети. В питательном тракте не происходит снижение коррозии со временем, так как всегда поступает новая порция воды. Поэтому справедливо обратить внимание на график рисунка 7, что на 12 день скорость коррозии упала в 3 раза, что дает хорошее совпадение результатов.

Если учитывать динамику скорости коррозии в зависимости от изменения температуры теплоносителя (рис. 8), то пик наблюдается при 65°C , а скорость снижения по обе стороны пика наблюдается как $0,007 \text{ мм/год}$ отнесенное к изменению в 1°C , или примерно 30 % при изменении температуры на 10°C . Однако, в данном графике уже учитывается изменения растворимости кислорода в зависимости от температуры воды, а значит в расчете может произойти задвоение показатель. Поэтому справедливо с

точки зрения температуры говорить о допустимости использования прямой 2 на рис. 8. В таком случае, скорость коррозии возрастает на 0,0063 мм/год при увеличении температуры на 1 °С.

Результаты исследования

По результатам аппроксимации графиков и таблиц, получены таблицы 2, 3 и 4, с величинами проницаемости, скорости коррозии и язвенной коррозии, в зависимости от температуры и концентрации кислорода. В таблицах концентрация кислорода ограничена максимально-возможной при давлении ниже 6 атм. и температуре до 100 °С

Таблица №2

Коррозионная проницаемость стали П, мм/год, в зависимости от температуры и концентрации кислорода в теплоносителе

Температура, °С \ Концентрация кислорода, г/м ³	20	40	60	80	100
5	0,013	0,034	0,052	0,078	0,100
10	0,025	0,069	0,104	0,156	-
20	0,029	0,080	0,128	0,181	-
30	0,034	0,092	0,151	-	-
40	0,039	0,107	-	-	-
50	0,043	-	-	-	-

Таблица №3

Скорость коррозии К, г/(м²·сут), в зависимости от температуры и концентрации кислорода в теплоносителе

Температура, °С \ Концентрация кислорода, г/м ³	20	40	60	80	100
1	2	3	4	5	6
5	0,267	0,732	1,112	1,662	2,126
10	0,533	1,463	2,223	3,323	-
20	0,618	1,696	2,723	3,851	-
30	0,716	1,965	3,223	-	-
40	0,830	2,277	-	-	-
50	0,922	-	-	-	-

Таблица №4

Глубина язвенной коррозии $K_{язв}$, мм/год, в зависимости от температуры и концентрации кислорода в теплоносителе

Температура, °C \ Концентрация кислорода, г/м ³	20	40	60	80	100
5	0,075	0,206	0,313	0,469	0,600
10	0,150	0,413	0,627	0,937	-
20	0,174	0,478	0,768	1,086	-
30	0,202	0,554	0,909	-	-
40	0,234	0,642	-	-	-
50	0,260	-	-	-	-

Концентрацию кислорода в сетевой воде C , мг/кг, предлагается рассчитывать, решая следующее уравнение (4):

$$-\frac{dC}{d\tau} = \eta \frac{S_{ст}}{V} K - C_{п} \frac{D}{V} + C \frac{D}{V}, \quad (4)$$

где C – концентрация кислорода в сетевой воде, мг/кг; $C_{п}$ – концентрация кислорода в подпиточной воде, мг/кг; τ – время, ч; $S_{ст}$ – поверхность стали, контактирующей с сетевой водой, м²; V – объем системы, м³; D – расход подпиточной воды, м³/ч; η – коэффициент, учитывающий количество кислорода, расходующегося на растворение 1 г железа, г/г; K – скорость коррозии стали, г/(м²·ч).

Для систем отопления, без учета подпитки, но применения полимерных труб без кислородного барьера, формула (5) будет иметь следующий вид:

$$-\frac{dC}{d\tau} = \eta \frac{S_{ст}}{V} K - \frac{FS_{тр}}{V}, \quad (5)$$

где F – кислородопроницаемость стенок полимерной трубы, г/(м²·ч); $S_{тр}$ – площадь кислородопроницаемой стенки трубы, м².

В [9, 10] утверждается, что значение F является переменным. Кислородопроницаемость стенок полимерной трубы F , г/(м²·ч), зависит от материала, из которого она изготовлена [11], от концентрации кислорода в

теплоносителя, давления и температуры теплоносителя [12], а также от способа прокладки.

По результатам моделирования, представленного в [13], получены графики, на основании которых можно определить способность проникать кислород через стенку трубы из сшитого полиэтилена. Графики представлены на рис. 9, 10, 11.

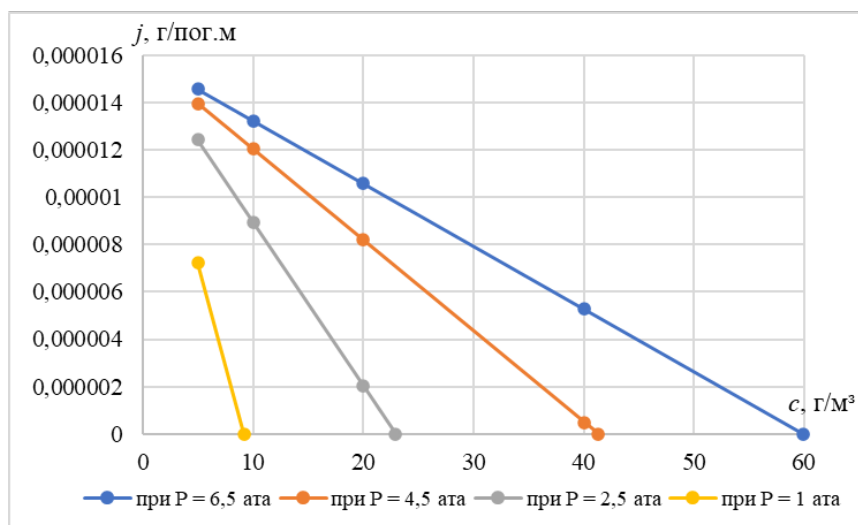


Рис. 9. – Поток кислорода j , г/пог.м, через стенку трубы из сшитого полиэтилена Ø16x2,0 при температуре 20 °С

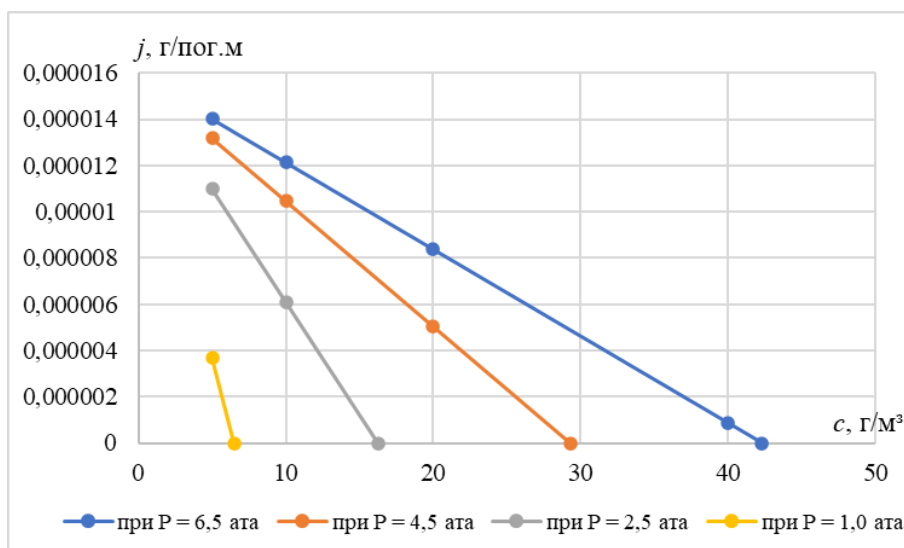


Рис. 10. – Поток кислорода j , г/пог.м, через стенку трубы из сшитого полиэтилена Ø16x2,0 при температуре 40 °С

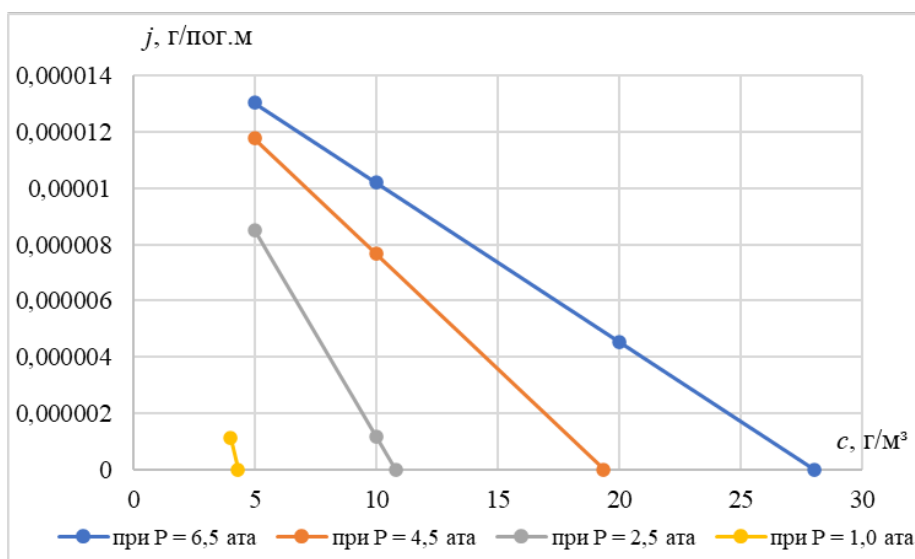


Рис. 11. – Поток кислорода j , г/пог.м, через стенку трубы из сшитого полиэтилена Ø16x2,0 при температуре 60 °С

Критерием долговечности системы может быть накопительное значение глубины язвенной коррозии, определяемой по таблице 4, исходя из динамики концентрации кислорода в теплоносителе, при решении уравнения (5). Тогда долговечность системы до первой плановой замены оборудования определяется условием, что глубина язвенной коррозии будем выше, чем наименьшая толщина стенки самого тонкостенного элемента системы. Накопительная глубина язвенной коррозии является интегралом по времени от функции скорости язвенной коррозии (6):

$$\delta_{\text{язв}} = \int_{\tau} K_{\text{язв}} d\tau, \quad (6)$$

При этом скорость язвенной коррозии будет переменной величиной в зависимости от скорости коррозии. При этом язвенная коррозия, согласно [8] принимается в 8 раз больше проницаемости Π , мм/год (7):

$$K_{\text{язв}} = 8,927K. \quad (7)$$

Соответственно, решается уравнение (5) относительно изменения концентрации кислорода во времени, затем по формуле (7) для каждого

временного интервала определяется значение скорости язвенной коррозии, и интегрируется по формуле (6). Расчет считается окончанным, когда значение $\delta_{\text{язв}}$ будет выше, чем наименьшая толщина стенки самого тонкостенного элемента системы. Например, согласно ГОСТ 31311-2022, толщина стенки панельных радиаторов должна быть не менее 1,15 мм, а толщина стенки вертикального канала в трубчатом радиаторе не менее 0,8 мм.

Результаты расчета для конкретных систем водяного отопления будут представлены в последующих публикациях.

Выводы

В ходе исследования получены следующие результаты:

1. На основании анализа экспериментальных данных из различных источников получена зависимость скорости коррозии стальных элементов от температуры теплоносителя и содержания кислорода.
2. Предложена формула для определения изменения концентрации кислорода теплоносителя в системах отопления с применением полимерных труб без кислородного барьера.
3. Получена зависимость потока кислорода через стенку трубы и сшитого полиэтилена, в зависимости от температуры и начальной концентрации кислорода в теплоносителе.
4. Предложен метод оценки долговечности элементов системы отопления в зависимости от скорости язвенной коррозии.

На основании результатов можно сделать выводы:

1. Поток кислорода через стенки полимерных труб зависит от множества факторов, будет значительно отличаться в разных точках системы.
 2. Долговечность систему будет зависеть от концентрации кислорода в исходном теплоносителе, а также от значения кислородопроницаемости полимерных труб.
-

В дальнейшем необходимо более детальное определение как величины потока диффундирующего кислорода, через стенки полимерных труб из различных материалов, так и соотношения площади коррозии к площади проницаемых для кислорода поверхностей.

Литература

1. Жук Н. П. Курс коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 1976. 472 с.
2. Балабан-Ирменин Ю.В., Липовских В.М., Рубашов А.М. Защита от внутренней коррозии трубопроводов тепловых сетей. М.: Издательство «Новости теплоснабжения», 2008. 288 с.
3. Улиг Г.Г., Ревя Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. Л.: Химия, 1989. 456 с.
4. Сухотин А.М. Коррозия и защита химической аппаратуры. Том 3. Л.: Химия, 1970. 308 с.
5. Акользин П. А. Предупреждение коррозии оборудования технического водо- и теплоснабжения. М.: Металлургия, 1988. 96 с.
6. Сазанов Р. П. Применение метода поляризационного сопротивления для измерения скорости коррозии // Водоснабжение и санитарная техника. 1989. Т. 11 №5. С. 470-472.
7. Василенко, Г. В., Мещеряков И.М. О влиянии кислорода на коррозию трубопроводов тепловой сети // Электрические станции. 2007. № 1. С. 58-60.
8. Василенко, Г. В. Влияние концентрации кислорода на коррозию тепловых сетей и теплообменных аппаратов // Теплоэнергетика. 2007. № 2. С. 66-68.
9. Петров-Денисов В.Г., Сладков А.В., Донников В.Е. Теоретические основы кислородопроницаемости пластмассовых труб в системах отопления // Пластические массы. 2003. №2. С. 29–37.

10. Иванов В., Карпухин О., Иванов А. Особенности диффузии кислорода в многослойной полимерной трубе // Полимерные трубы. 2015. № 1(47). С. 54-59.

11. Петров-Денисов В. Г., Сладков А. В., Донников В. Е. К вопросу о кислородопроницаемости пластмассовых трубопроводов отопительных систем // Сантехника. 2003. №4. С. 40–45.

12. Кашуркин А.Ю., Усиков С.М., Петров Г.А. Экспериментальное исследование газопроницаемости полимерных труб систем водяного отопления // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 4(32). С. 80-90.

13. Кашуркин А.Ю., Усиков С.М., Мельникова И.В. Математическая модель газопроницаемости полимерных труб под действием разницы парциального давления // Экономика строительства. 2024. № 11. С. 284-287.

References

1. Zhuk N. P. Kurs korrozii i zashhity metallov [Course on corrosion and protection of metals]. M.: Metallurgija, 1976. 472 p.

2. Balaban-Irmenin Ju.V., Lipovskih V.M., Rubashov A.M. Zashhita ot vnutrennej korrozii truboprovodov teplovyh setej [Protection against internal corrosion of heating network pipelines]. M.: Izdatelstvo «Novosti teplosnabzhenija», 2008. 288 p.

3. Ulig G.G., Revi R. U. Korrozija i borba s nej. Vvedenie v korrozionnuju nauku i tehniku [Corrosion and its control. An introduction to corrosion science and engineering]. L.: Himija, 1989. 456 p.

4. Suhotin A.M. Korrozija i zashhita himicheskoj apparatury [Corrosion and protection of chemical equipment]. Tom 3. L.: Himija, 1970. 308 p.

5. Akolzin P. A. Preduprezhdenie korrozii oborudovaniya tehničeskogo vodo- i teplosnabzhenija [Prevention of corrosion of technical water and heat supply equipment]. M.: Metallurgija, 1988. 96 p.
6. Sazanov R. P. Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika. 1989. T. 11 №5. pp. 470-472.
7. Vasilenko, G. V., Meshherjakov I.M. Jelektricheskie stancii. 2007. № 1. pp. 58-60.
8. Vasilenko, G. V. Teplojenergetika. 2007. № 2. pp. 66-68.
9. Petrov-Denisov V.G., Sladkov A.V., Donnikov V.E. Plasticheskie massy. 2003. №2. pp. 29–37.
10. Ivanov V., Karpuhin O., Ivanov A. Polimernye trubы. 2015. № 1(47). pp. 54-59.
11. Petrov-Denisov V. G., Sladkov A. V., Donnikov V. E. Santehnika. 2003. №4. pp. 40–45.
12. Kashurkin A.Ju., Usikov S.M., Petrov G.A. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologičeskogo universiteta. Serija: Materialy. Konstrukcii. Tehnologii. 2024. № 4(32). pp. 80-90.
13. Kashurkin A. Ju., Usikov S.M., Melnikova I.V. Jekonomika stroitelstva. 2024. № 11. pp. 284-287.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 7.11.2025

Дата публикации: 16.12.2025