

## Определение растворимости газов в теплоносителе водяных систем отопления при характерных эксплуатационных режимах

*А.Ю. Кашуркин<sup>1,2</sup>, С.М. Усиков<sup>1,2</sup>, И.В. Мельникова<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** В поквартирных горизонтальных коллекторных системах применяются трубы из различных материалов, в том числе полимерных. Одновременно с этим в системах отопления применяются стальные, алюминиевые и биметаллические радиаторы отопления, которые подвержены коррозии. В случае высокого содержания кислорода в теплоносителе процессы коррозии происходят достаточно интенсивно, что приводит к снижению срока службы стальных элементов. Полимерные трубы обладают газопроницаемостью, что может быть следствием попадания кислорода в теплоноситель. Отдельным вопросом для задачи газопроницаемости полимерных труб является определение растворимости. Целью данной работы является определение растворимости газов в теплоносителе при характерных режимах эксплуатации системы водяного отопления. В работе представлен один из подходов для определения растворимости газов в теплоносителе исходя из совокупности экспериментальных данных, полученных в прошлом веке для определённого диапазона температуры и давления воды. По результатам исследования построены графики зависимости растворимости атмосферных газов в теплоносителе систем водяного отопления при эксплуатационных режимах. Данные результаты несколько отличаются от значений, представленных в нормативной документации по определению кислородопроницаемости полимерных труб, что говорит о необходимости проведения дополнительных натурных испытаний, в условиях (температура и давление) характерных для систем водяного отопления.

**Ключевые слова:** система водяного отопления, кислородопроницаемость, газопроницаемость, полимерные трубы, растворимость газов

### Введение

В современных системах отопления широкое распространение получили трубы из полимерных материалов [1, 2]. Наибольшее количество таких труб применяется в поквартирных горизонтальных системах, получившие широкое распространение в многоэтажных многоквартирных зданиях, в системах отопления в индивидуальном жилищном строительстве, а также в зданиях со сложной архитектурой.

Как правило, в качестве теплопроводов применяются однослойные трубы из термопластов, в которых гидравлическую прочность обеспечивает

---

внутренний полимерный слой, а именно: из полипропилена рандомсополимера (PP-R), из полипропилена рандомсополимера повышенной термостойкости с модифицированной кристалличностью (PP-RCT), из сшитого полиэтилена (PE-X), из полиэтилена повышенной термостойкости (PE-RT). Также широкое распространение получили напорные многослойные трубы.

С точки зрения значения параметров давления и температуры теплоносителя в системах водяного отопления, могут быть использованы все вышеперечисленные материалы, однако, есть один фактор, который долгое время вызывает споры в профессиональном сообществе, а именно – газопроницаемость полимерных труб [3-5]. Если быть корректным, то в основном всех интересует процесс проникания молекул кислорода через стенку полимерной трубы внутрь системы, а также растворимость кислорода в теплоносителе [6-8].

Это связано с тем, что одновременно с полимерными трубами в системах отопления применяются стальные, алюминиевые, чугунные и другие металлические элементы системы, которые подвержены коррозии [9], при значительном содержании кислорода в теплоносителе. Кроме этого, при интенсивном проникании газов через неметаллические трубы, возможно образование воздушных пробок, ухудшающих циркуляцию теплоносителя, и снижающих площадь теплообмена между теплоносителем и внутренней поверхностью отопительных приборов, а значит снижению общей тепловой мощности приборов. Кроме того, наличие растворенных газов в теплоносителе может вызывать кавитацию и шум от движения теплоносителя [3].

Отдельным процессом, который необходимо рассматривать с точки зрения проницаемости полимерных труб систем отопления, является растворимость атмосферных газов в теплоносителе. Растворимостью газов в

---

воде занимались такие ученые, как Ашмян К.Д., Скрипка В.Г., Бондарева М.М., Олейник П.М., Намиот А.Ю. Среди зарубежных ученых стоит отметить Alvarez J., Crovetto R., Fernandez - Prini R., Cramer S.D., Enns T., Scholander P.F., Bradstreet E.D.

Основным показателем, используемым в целях определения растворимости газов в воде, является коэффициент Генри, который определяется экспериментальными данными по растворимости. Экспериментальные исследования фазовых равновесий между газом и водой разделяются на две основные группы [10]. Первая группа относится к давлениям, существенно не превышающим атмосферное, и к температурам, верхний предел которых не выходит за 100 °С, вторая — к давлениям, значительно превышающим атмосферное и в отдельных случаях достигающим сотен мегапаскалей. Температуры в исследованиях второй группы меняются в широких пределах — от температур замерзания водных растворов до критической температуры воды и даже до более высоких температур. В нашем случае интересует именно первая группа, так как температура теплоносителя при использовании полимерных труб не превышает 90 °С, а избыточное давление в системах отопления, как правило не более 1,6 МПа.

Опубликовано много работ, посвященных растворимости газов в воде при низких давлениях [11]. Коэффициенты Генри, определенные по данным исследований при низких давлениях, аппроксимированы в зависимости от температуры [10] (1):

$$\ln H = A + B / T + C \ln T + DT, \quad (1)$$

где  $H$  – коэффициент Генри, МПа;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  – коэффициенты, которые для растворимости атмосферных газов составляют:

— азот (в диапазоне температуры от 0 до 73 °С):  $A = 162,723$ ;  $B = -8435,7$ ;  $C = -21,6766$ ;  $D = -0,00843921$ ;

---

— кислород (в диапазоне температуры от 0 до 75 °С):  $A = 142,13$ ;  $B = -7777,8$ ;  $C = -18,4038$ ;  $D = -0,00944686$ ;

— диоксид углерода  $\text{CO}_2$  (в диапазоне температуры от 0 до 80 °С):  $A = 157,592$ ;  $B = -8744,6$ ;  $C = -21,6766$ ;  $D = 0,00110298$ .

Стоит отметить, что растворимость газов, молекулы которых имеют меньшие размеры, значительно меньше, чем растворимость газов с большим размером молекул. Однако, с точки зрения проникания полимерной стенки трубы зависимость обратная – чем больше размер молекулы газа, тем меньше проницаемость. Газы, молекулы которых образуют водородные связи и химические соединения с молекулами воды, растворяются весьма хорошо (например, диоксид углерода).

Используя формулу закона Генри и формулу, полученную аппроксимацией экспериментальных данных (1), можно получить общую формулу для определения максимальной возможной концентрации (растворимости) газа в воде (2):

$$c = e^{A+B/T+C \ln T+DT} p. \quad (2)$$

где  $p$  – абсолютное давление газа, МПа.

### Методы исследования

Парциальное давление газов в атмосферном воздухе определяется по формуле (3):

$$p_i = \frac{\alpha_i (p_a - p_{H_2O})}{100}, \quad (3)$$

где  $\alpha_i$  – процентное содержание газа в воздухе, % (у азота  $\alpha_{N_2} \approx 78$  %, у кислорода  $\alpha_{O_2} \approx 21$  %, у углекислого газа  $\alpha_{CO_2} \approx 0,03$  %);  $p_a$  – атмосферное давление, принято как 101 325 Па;  $p_{H_2O}$  – парциальное давление водяных паров во влажном воздухе, Па, при температуре воздуха 20 °С, определяемое по формуле (4):

$$p_{H_2O} = 1,84 \cdot 10^{11} e^{-\frac{5330}{T_{\text{возд}}}} = 1,84 \cdot 10^{11} e^{-\frac{5330}{273,15+20}} = 2336 \text{ Па}, \quad (4)$$

где  $T_{\text{возд}}$  – температура воздуха, К.

Тогда получим следующее значение парциального давления газов, находящихся в воздухе, при температуре 20 °С и атмосферном давлении:

- азота:  $p_{N_2} \approx 77211 \text{ Па}$ ;
- кислорода:  $p_{O_2} \approx 20788 \text{ Па}$ ;
- углекислого газа:  $p_{CO_2} \approx 30 \text{ Па}$ .

Данные о растворимости газов, приведенные в ГОСТ Р 55911-2015 приведены при парциальном давлении кислорода 0,18 бар, что вызывает сомнения, с точки зрения актуальности для эксплуатации систем отопления.

Определим растворимость газа согласно коэффициенту Оствальда. В [10] приведены значения коэффициента Оствальда, для различных газов, при температуре до 65 °С, однако, учитывая зависимость коэффициента Оствальда и коэффициента Генри (5):

$$k_o = \frac{0,101325 \cdot 1244 \cdot T}{H \cdot 273}, \quad (5)$$

а также принимая во внимание формулу для определения коэффициента Генри (1), можно ориентировочно определить растворимость газов при температуре до 90 °С. Результаты расчета продемонстрированы в табл. 1.

Таблица №1

Значения коэффициента Оствальда в зависимости от температуры воды

Температура, °С	0	20	40	60	80	90
Коэффициент Оствальда,	0,0244440 97	0,0173112 6	0,0144470 13	0,0137120 82	0,0144102 8	0,0152468 36

для азота						
Коэффициент Оствальда, для кислорода	0,0503561 19	0,0343020 25	0,0273630 78	0,0247183 29	0,0246528 1	0,0253916 11
Коэффициент Оствальда, для диоксида углерода	1,7670823 1	0,9647113 05	0,6264608 93	0,4662119 5	0,3865975 43	0,3640857 38

### Результаты исследования

Растворимость газов в воде,  $c_i$ , г/м<sup>3</sup>, в зависимости от температуры при атмосферном давлении, с учетом перевода величин, определим по формуле (6):

$$c_i = 10^{-8} \cdot k_o p_i \cdot \rho_i, \quad (6)$$

где  $\rho_i$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>, при температуре  $t$ , °С, определяемая по формулам (7-9):

— для азота:

$$\rho_{N_2} = 4,364 \cdot 10^{-6} t^2 - 3,398 \cdot 10^{-3} t + 1,219; \quad (7)$$

— для кислорода:  $\rho_{O_2} = 10^{-5} t^2 - 0,005 t + 1,4276;$

(8)

— для диоксида углерода:

$$\rho_{CO_2} = 8,969 \cdot 10^{-6} t^2 - 5,837 \cdot 10^{-3} t + 1,922. \quad (9)$$

На рисунке 1 представлены графики зависимости растворимости газов при атмосферном давлении воды, определенные по формулам (6-9).

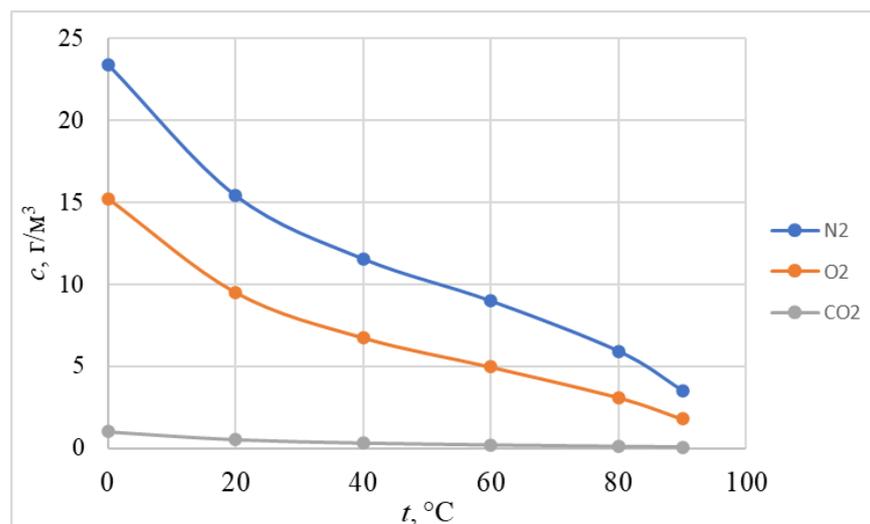


Рис. 1. – Растворимость азота, кислорода и углекислого газа в воде, при атмосферном давлении

Стоит отметить, что системы водяного отопления, где применяются полимерные трубы, согласно СП 60.13330.2020, могут обладать рабочим давлением до 1 МПа. Как правило, в системах данное давление выбирается как давление столба жидкости в системе, плюс запас 0,5 бар для исключения кавитационных процессов в верхней части системы. В высотном строительстве предусматривается многозонная система отопления, высота зоны которой не превышает 10-15 этажей (до 45 м). Тогда в нижней части зоны системы отопления создается давление около 5 бар избыточного давления, а в верхней около 0,5 бар избыточного давления.

Согласно закону Генри, растворимость газов  $c_i^t, \text{г/м}^3$ , при давлении больше атмосферного и при температуре  $t$  можно определить по формуле (10):

$$c_i^t = c_i^{t,a} \left( \frac{p_i^t}{p_i^a} \right), \quad (10)$$

где  $c_i^{t,a}$  – растворимость газа,  $\text{г/м}^3$ , при атмосферном давлении и температуре  $t$ ;  $p_i^a$  – парциальное давление газа, Па, при атмосферном

давлении и температуре  $t$ ;  $p_i^t$  – парциальное давление газа при температуре  $t$  и рассматриваемом давлении воды, Па.

Согласно формуле (10) построены графики зависимости растворимости атмосферных газов в воде от абсолютного давления теплоносителя и его температуры (см. рис. 2 - 4).

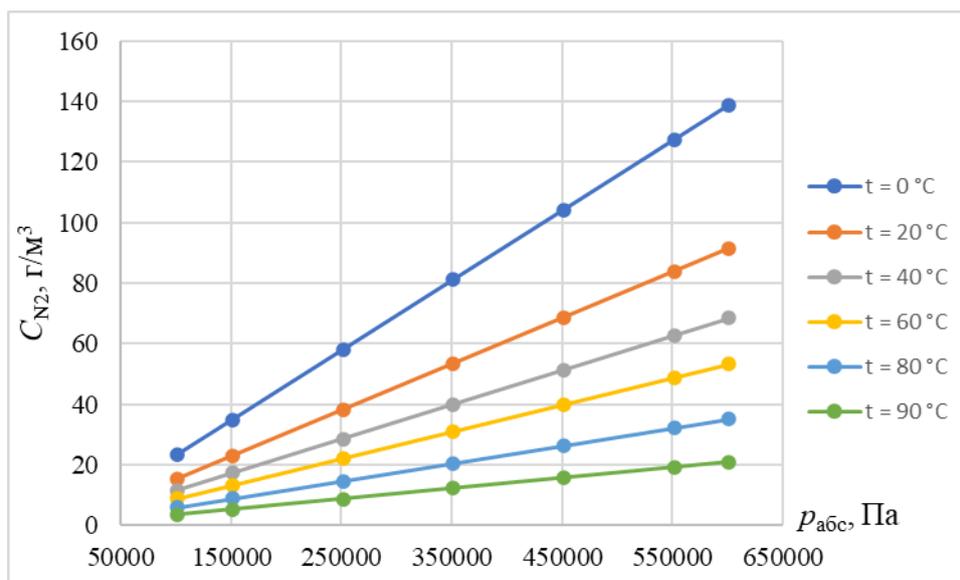


Рис. 2. – Растворимость азота в воде, при различной температуре и различном давлении

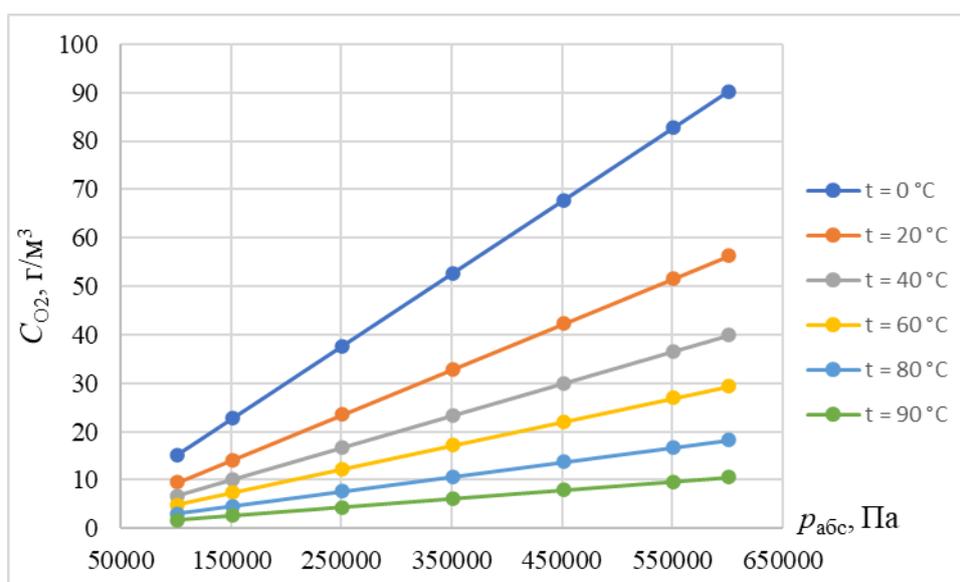


Рис. 3. – Растворимость кислорода в воде, при различной температуре и различном давлении

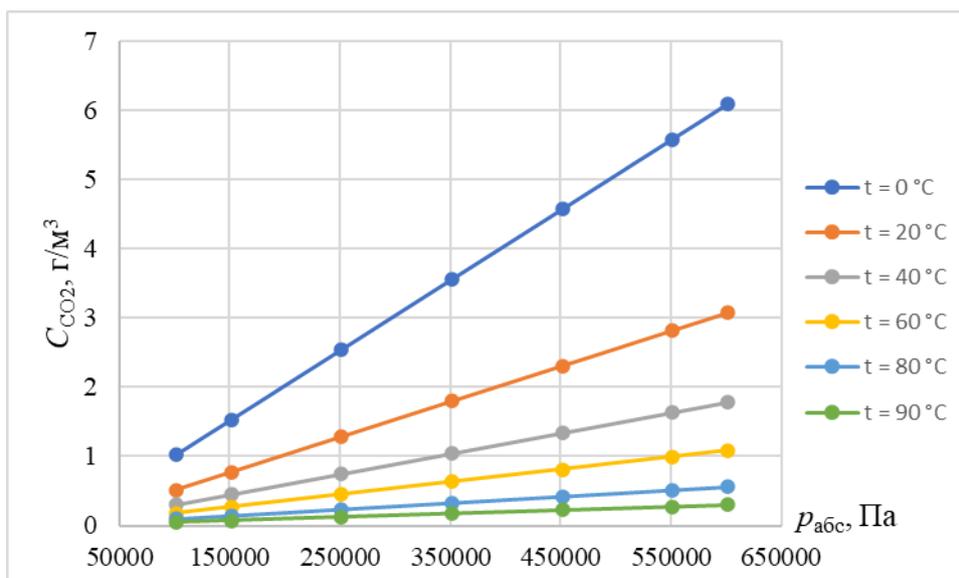


Рис. 4. – Растворимость диоксида углерода в воде, при различной температуре и различном давлении

Стоит отметить, что растворимость газов в нижней части системы значительно больше, а значит можно предположить, что именно там будет наблюдаться зона наибольшей абсорбции воздуха в теплоноситель, что особенно сильно будет наблюдаться при остановке работы системы отопления на летний период, когда температура теплоносителя будет близка к  $20^\circ\text{C}$ . Однако, при использовании закона Генри, а также коэффициента Оствальда были приняты некоторые допущения, для режимов с температурой свыше  $65^\circ\text{C}$ , что говорит о необходимости проведения натуральных экспериментов при характерных для систем водяного отопления значениях параметров давления и температуры.

### Выводы

По результатам исследования построены графики зависимости растворимости атмосферных газов в теплоносителе систем водяного отопления при эксплуатационных режимах. Данные результаты несколько отличаются от значений, представленных в нормативной документации по определению кислородопроницаемости полимерных труб, что говорит о

необходимости проведения дополнительных натуральных испытаний, в условиях (температура и давление) характерных для систем водяного отопления.

### Литература

1. Попов М. А. Особенности применения труб из термостойких полимерных материалов // Сантехника. 2016. № 2. С. 20–31.
  2. Козлов О. В. Проблемы маркировки напорных полимерных труб // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2020. № 7 (223). С. 14–17.
  3. Крикотин В.В., Попов М. А. Диффузия кислорода в полимерных трубах // Новости теплоснабжения. 2015. № 05(153). URL: [ntsn.ru/5\\_2013.html](https://ntsn.ru/5_2013.html)
  4. Гвоздев Д. В., Панин О. Г., Кириченко Ю.В., Амосов С.В. Определение кислородопроницаемости трубопроводов из пластмасс // Полимерные трубы. 2012. № 1(35). С. 54–56.
  5. Ямлеева Э. У. О надёжности и долговечности систем отопления зданий // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2018. № 1 (81). С. 53–57.
  6. 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.
  7. Иванов В., Карпухин О., Иванов А. Особенности диффузии кислорода в многослойной полимерной трубе // Полимерные трубы. 2015. № 1(47). С. 54–59.
  8. Vohien P., Chung S., Fong S., Oliphant K. Characterizing longterm performance of plastic piping materials in potable water applications // JANA Tech. Rep. 2009 Sept. 12. pp. 1–10.
  9. Улин Г.Г. Ревви Р.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. // Ленинград: Химия. 1985. 456 с.
  10. Намиот А.Ю. Растворимость газов в воде // М.: Недра, 1991. 117 с.
-



11. Wilhelm E., Battino R., Wilcock R.J. Low - Pressure solubility of gases in liquid water. — Chem. Rev., 1977, v. 77, 219 p.

### References

1. Popov M.A. Santehnika. 2016. № 2. pp. 20-31.
2. Kozlov O.V. Santehnika, Otoplenie, Kondicionirovanie. 2020. № 7 (223). pp. 14-17.
3. Krikotin V.V., Popov M.A. Novosti teplosnabzhenija. 2015. № 05(153).URL: [ntsn.ru/5\\_2013.html](https://ntsn.ru/5_2013.html)
4. Gvozdev D.V., Panin O.G., Kirichenko Ju.V., Amosov S.V. Polimernye truby. 2012. № 1(35). pp. 54-56.
5. Jamleeva Je.U. Vestnik Ul'janovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2018. № 1 (81). pp. 53-57.
6. Petrov-Denisov V.G., Sladkov A.V., Donnikov V.E. Plasticheskie massy. 2003. №2. pp. 29–37.
7. Ivanov V., Karpuhin O., Ivanov A. Polimernye truby. 2015. № 1(47). pp. 54-59.
8. Vohien P., Chung S., Fong S., Oliphant K. JANA Tech. Rep. 2009 Sept. 12 pp. 1–10.
9. Ulin G.G. Revi R.U. Korrozija i bor'ba s nej. Vvedenie v korrozionnuju nauku i tehniku [Corrosion and its control. Introduction to Corrosion Science and Technology]. Leningrad: Himija. 1985. 456 p.
10. Namiot A.Ju. Rastvorimost' gazov v vode [Solubility of gases in water]. Moscow. Nedra. 1991. 117 p.
11. Wilhelm E., Battino R., Wilcock R.J. Chem. Rev., 1977, v. 77, 219 p.

**Дата поступления: 9.11.2024**

**Дата публикации: 20.12.2024**