

Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2025. № 4. С. 65–72.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 697.433.4

DOI: 10.22227/2311-1518.2025.4.65-72

ВЫСВОБОЖДЕНИЕ ГАЗОВ ИЗ РАСТВОРЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ТРУБАХ СИСТЕМ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ

Алексей Юрьевич Кашуркин¹, Сергей Михайлович Усиков²,
Инна Вячеславовна Мельникова¹, Владислав Михайлович Флоренский¹

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры
и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Российская Федерация;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Российская Федерация

В настоящей работе описывается процесс высвобождения растворенных газов в системах водяного отопления. Проанализированы условия и стадии перехода газа из растворенного состояния в свободное. Ключевым результатом работы является вывод аналитической формулы для определения диаметра отрыва пузырька, учитывающей шероховатость трубы, температуру теплоносителя и среднюю скорость потока. Предложенные формулы распределения скоростей в сечении потока учитывают наличие ламинарного подслоя. На примере расчетов для вертикального стояка девятиэтажного здания показано, что статическое давление теплоносителя незначительно влияет на размер отрывающегося пузырька, в то время как снижение скорости потока существенно его увеличивает. Расчеты демонстрируют, что процесс дегазации в стандартных условиях является крайне медленным, что приводит к длительному пребыванию теплоносителя в состоянии перенасыщения кислородом. Это способствует интенсификации коррозионных процессов. Сделан вывод о недостаточности стандартных автоматических воздухоотводчиков для эффективного удаления растворенных газов при подпитке воды недеаэрированной водой. Обоснована необходимость применения сепараторов воздуха для быстрой стабилизации газового режима системы и защиты оборудования от коррозии. Практическая значимость работы заключается в предоставлении методики для оценки интенсивности выделения газов в свободное состояние при движении теплоносителя по трубам.

Ключевые слова: система водяного отопления, теплоноситель, растворимость газов, воздухоудаление, воздухоотводчики

Для цитирования: Кашуркин А.Ю., Усиков С.М., Мельникова И.В., Флоренский В.М. Высвобождение газов из растворенного состояния в трубах систем водяного отопления // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2025. № 4. С. 65–72. DOI: 10.22227/2311-1518.2025.4.65-72

GAS LIBERATION FROM THE DISSOLVED STATE IN PIPES OF WATER HEATING SYSTEMS

Alexey Yu. Kashurkin¹, Sergey M. Usikov², Inna V. Melnikova¹, Vladislav M. Florensky¹

¹ Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences
(NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

This paper describes the process of dissolved gas liberation in water heating systems. The conditions and stages of gas transition from the dissolved to the free state are analyzed. A key result of the work is the derivation of an analytical formula for determining the bubble detachment diameter, which accounts for pipe wall roughness, heat transfer fluid temperature, and average flow velocity. The proposed formulas for velocity distribution in the flow cross-section consider the presence of a laminar sublayer. Calculations for a vertical riser of a nine-story building show that the static pressure of the heat transfer fluid has an insignificant effect on the size of a detaching bubble, while a decrease in flow velocity substantially increases it. The calculations demonstrate that the degassing process under standard conditions is extremely slow, leading to a prolonged state of oxygen supersaturation in the heat transfer fluid. This intensifies corrosion processes. It is concluded that standard automatic air vents are insufficient for the effective removal of dissolved gases when the system is replenished with non-deaerated water. The necessity of using air separators for rapid stabilization of the system's gas regime and for equipment corrosion protection is substantiated. The practical significance of the work lies in providing a methodology for assessing the intensity of gas liberation into the free state during the movement of the heat transfer fluid through pipes.

Keywords: water heating system, heat transfer fluid, gas solubility, air removal, air vents

For citation: Kashurkin A.Yu., Usikov S.M., Melnikova I.V., Florensky V.M. Gas liberation from the dissolved state in pipes of water heating systems. Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology. 2025; 4:65-72. DOI: 10.22227/2311-1518.2025.4.65-72 (rus.).

Введение

В системах водяного отопления важным фактором, влияющим на долговечность системы, является скорость протекания процесса электрохимической и химической коррозии. Основным агентом процесса электрохимической коррозии является кислород, концентрация которого в значительной мере влияет на скорость протекания процесса [1–3]. Теплоноситель систем отопления обладает определенным регламентируемым диапазоном показателя pH (около 8,5, что относится к слабощелочным средам [4]), что характерно для нейтральных вод [5, 6]. Также на скорость коррозии сильно влияет материал, из которого изготавливаются элементы системы отопления [7], однако для черных не легированных сталей значительным фактором будет являться именно концентрация кислорода.

Растворимость газов в теплоносителе систем водяного отопления зависит от температуры и, в большей мере, от давления [8]. При превышении порога растворимости наличие избыточного количества газа приводит к процессу перехода его из растворенного в свободное состояние, что, в свою очередь, приводит к образованию воздушных пробок. Тем не менее для высвобождения газа в свободное состояние необходим целый ряд условий. Образование пузырьков высвобождающегося газа, как и в случае кипения, не может происходить в объеме жидкости, для этого необходимо наличие так называемого очага, или нуклеационного центра. Очагом может выступать либо шероховатость стенок канала, либо взвешенные частицы в теплоносителе. Таким образом, для высвобождения газа из раствора необходимо одновременное наличие двух факторов: насыщения раствора газами и шероховатость поверхности канала.

Можно выделить следующие стадии процесса выхода пузырьков из растворенного состояния в свободное, с последующим появлением воздушных пробок:

1. Зарождение пузырьков газа (достижение минимального радиуса пузырька $r_{\text{мин}}$) на поверхности труб/теплообменных аппаратов.
2. Рост пузырьков и их отрыв при диаметре $d_{\text{отр}}$.
3. Движение пузырька [9] в верхнюю часть системы отопления с увеличением его объема V .
4. «Застревание» пузырьков воздуха в горизонтальных трубных участках или отопительных приборах.
5. Накопление объема воздушных «полостей».

Важными, с точки зрения количества высвобождающегося газа из системы, являются второй и третий этапы, так как они определяют объем высвободившегося газа и объем газовых пробок в верхней части системы.

Научная новизна проведенного исследования заключается в следующем:

1. Получение зависимости диаметра отрывающегося пузырька кислорода от гидродинамических характеристик потока теплоносителя, его температуры и шероховатости поверхности стенки.

2. Определена единая формула для расчета скорости потока в ламинарном подслое и турбулентном ядре потока.

Практической значимостью исследования является представленная методика, позволяющая определить способность отдельных элементов системы отопления (стенка трубы, арматуры или отопительного прибора) выводить растворенный в теплоносителе кислород в свободное состояние для последующего удаления воздухоотводящими устройствами. Указана недостаточная эффективность мероприятий по установке автоматических воздухоотводчиков в верхней части системы.

Модели и методы

В неподвижной жидкости нахождение пузырька газа на шероховатой поверхности канала может продолжаться при соблюдении условия гидростатического равновесия [10]:

$$H_z = H_0 + \frac{g\Delta\rho z}{2\sigma_t}, \quad (1)$$

где H_z и H_0 — средняя кривизна тела вращения на высоте z и на начальном участке, 1/м;

g — ускорение свободного падения, 9,81 м/с²;

$\Delta\rho$ — разность плотностей газа и жидкости, кг/м³;

σ_t — коэффициент поверхностного натяжения теплоносителя, Н/м;

При учете динамического давления, вызванного потоком жидкости, формула (1) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} H_z &= H_0 + \frac{g\Delta\rho z + P_{\text{дин}}}{2\sigma_t} = \\ &= H_0 + \frac{g(\rho_v - \rho_g)z + \rho_v v^2/2}{2\sigma_t}, \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ_v — плотность воды, кг/м³;

ρ_g — плотность газа в пузырьке, кг/м³;

v — средняя скорость движения потока, действующая на пузырек, м/с.

С учетом формулы (2) и преобразований, представленных в работе [10], предлагается следующая формула для определения диаметра отрыва газового пузырька, учитывающая динамическое давление, оказываемое потоком на пузырек, и условие равновесия:

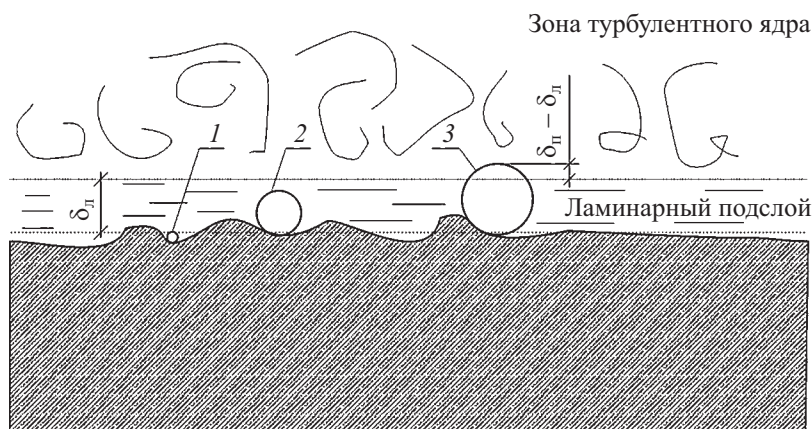


Рис. 1. Варианты размера пузырька на шероховатом слое трубы: 1 — зарождение пузырька при его диаметре $d_n < d_k$; 2 — развитие пузырька при $d_n < \delta_l$; 3 — развитие пузырька при $d_n > \delta_l$

$$d_{отр} = \sqrt[3]{\frac{6d_k\sigma_t}{g(\rho_B - \rho_r) + \frac{\rho_B v^2}{d_{отр}}}}, \text{ м}, \quad (3)$$

где d_k — характерный размер шероховатости стенки, м;

$d_{отр}$ — диаметр отрывающегося пузырька, м.

Поскольку пузырек начинает формироваться в углублении шероховатости стенки (рис. 1), где поток практически не обладает скоростью, то и динамическое давление практически не оказывает влияния на отрыв пузырька. Как только его размеры становятся больше углубления, то он попадает в ламинарный подслой турбулентного потока, скорость движения жидкости в котором увеличивается по мере отдаления от стенки трубы.

Согласно гипотезе Прандтля [4], толщина ламинарного подслоя может определяться формулой:

$$\delta_l \approx \frac{11,6\nu_B}{v^*}, \quad (4)$$

где δ_l — толщина ламинарного подслоя, мм;

ν_B — кинематическая вязкость теплоносителя, $\text{м}^2/\text{с}$;

v^* — скорость сдвига, м/с, определяющаяся для цилиндрической трубы по формуле [11]:

$$\frac{v^*}{v_{cp}} = \sqrt{\frac{\lambda}{8}}, \quad (5)$$

где v_{cp} — средняя скорость турбулентного потока, м/с;

λ — коэффициент гидродинамического трения (коэффициент Дарси), который для переходного и ламинарного режима может быть определен по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{k_\Sigma}{d_{BH}} \right)^{0,25}, \quad (6)$$

где k_Σ — коэффициент эквивалентной шероховатости, м;

d_{BH} — внутренний диаметр трубы, м;

Re — число Рейнольдса, определяемое по формуле:

$$\text{Re} = \frac{v_{cp} d_{BH}}{\nu_B}. \quad (7)$$

С учетом формул (5)–(7) толщина ламинарного подслоя, мм, может быть определена как:

$$\delta_l \approx \frac{11,6\nu_B}{v_{cp} \sqrt{\frac{\lambda}{8}}} = \frac{98,925\nu_B d_{BH}^{0,125}}{v_{cp}^{0,825} (68\nu_B + v_{cp} k_\Sigma)^{0,125}}. \quad (8)$$

Предложенная формула (8) позволяет определить, находится ли формирующийся пузырек воздуха в ламинарном подслое, или уже верхней частью попадает в турбулентный поток.

Логарифмическое распределение в пристенном турбулентном сечении, полученное Прандтлем, позволяет определить скорость движения теплоносителя в ламинарном подслое, в зависимости от координаты по высоте:

$$v_y = v^* \left(5,75 \lg \frac{yv^*}{\nu_B} + 5,5 \right), \quad (9)$$

где y — координата по оси, перпендикулярной скорости потока, м.

С учетом формул (5)–(7) уравнение (9) примет следующий вид:

$$v_y = 0,674 v_{cp}^{0,875} \left(\frac{68\nu_B + v_{cp} k_\Sigma}{d_{BH}} \right)^{0,125} \times \lg \frac{1,061 y v_{cp}^{0,875} (68\nu_B + v_{cp} k_\Sigma)^{0,125}}{d_{BH}^{0,125} \nu_B}. \quad (10)$$

Предположим, что динамическое давление, оказываемое на пузырек в зоне ламинарного подслоя, может быть определено от средней скорости в верхней и нижней части пузырька. Поскольку в нижней части скорость равна нулю, то средняя скорость будет равна половине скорости на отметке верха пузырька, т.е. его диаметра $d_{\text{п}}$. Тогда скорость в формуле (3) определяется как скорость на отметке половины диаметра пузырька, $v = d_{\text{отр}}/2$.

Подставляя уравнение (10) в (3) методом последовательных приближений, можно получить диаметр отрывающегося пузырька, если его конечный размер не будет превышать ламинарный подслон (рис. 1). Если $\delta_{\text{л}} < d_{\text{отр}}$, то необходимо учитывать скорость потока, сформировавшуюся в турбулентном ядре потока. В турбулентном потоке зависимость осредненной скорости потока от координаты описывается следующим логарифмическим законом [12]:

$$\frac{v_y}{v_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{y v_*}{v_B} \right) + C, \quad (11)$$

где k — константа Кармана, 0,41;

C — эмпирическая константа, 5.

Подставив формулы (5)–(7) в (11) и проведя несколько преобразований, получим аналог уравнения (10), но уже для координат, попадающих в турбулентное ядро потока:

$$v_y^{\text{турб}} = 0,2855 v_{\text{ср}}^{0,875} \left(\frac{68 v_B + v_{\text{ср}} k_{\text{э}}}{d_{\text{вн}}} \right)^{0,125} \times \ln \frac{0,908 y v_{\text{ср}}^{0,875} (68 v_B + v_{\text{ср}} k_{\text{э}})^{0,125}}{d_{\text{вн}}^{0,125} v_B}. \quad (12)$$

В формуле (12) можно преобразовать натуральный логарифм в десятичный и привести к виду формулы (10):

$$v_y^{\text{турб}} = 0,658 v_{\text{ср}}^{0,875} \left(\frac{68 v_B + v_{\text{ср}} k_{\text{э}}}{d_{\text{вн}}} \right)^{0,125} \times \lg \frac{0,908 y v_{\text{ср}}^{0,875} (68 v_B + v_{\text{ср}} k_{\text{э}})^{0,125}}{d_{\text{вн}}^{0,125} v_B}. \quad (13)$$

Формулы (10) и (13) отличаются только численными коэффициентами, поэтому можно их привести к единому выражению:

$$v_y = A v_{\text{ср}}^{0,875} \left(\frac{68 v_B + v_{\text{ср}} k_{\text{э}}}{d_{\text{вн}}} \right)^{0,125} \times \lg \frac{B y v_{\text{ср}}^{0,875} (68 v_B + v_{\text{ср}} k_{\text{э}})^{0,125}}{d_{\text{вн}}^{0,125} v_B}, \quad (14)$$

где A и B — постоянные, зависящие от толщины ламинарного подслоя:

$$\begin{cases} A = 0,658; B = 0,908 & \text{при } \delta_{\text{л}} \leq y; \\ A = 0,674; B = 1,061 & \text{при } \delta_{\text{л}} > y. \end{cases} \quad (15)$$

Если часть растущего пузырька попадает в турбулентное ядро, то скорость в формуле (3) определяется как:

$$v = v_{\delta}^{\text{лам}} \frac{\delta_{\text{л}}}{d_{\text{п}}} + \frac{v_{\delta}^{\text{турб}} + v_d^{\text{турб}}}{2} \frac{d_{\text{п}} - \delta_{\text{л}}}{d_{\text{п}}} = \frac{v_{\delta}^{\text{лам}} 2\delta_{\text{л}} + (v_{\delta}^{\text{турб}} + v_d^{\text{турб}})(d_{\text{п}} - \delta_{\text{л}})}{2d_{\text{п}}}, \quad (16)$$

где $d_{\text{п}}$ — диаметр пузырька, м.

Поскольку скорость на границе между турбулентным и ламинарными слоями одинакова, т.е. $v_{\delta}^{\text{турб}} = v_{\delta}^{\text{лам}}$, и учитывая размеры отрывающегося пузырька $d_{\text{п}} = d_{\text{отр}}$, получим итоговую формулу для подстановки в уравнение (3):

$$v = \frac{\delta_{\text{л}} (v_{\delta} - v_d^{\text{турб}}) + d_{\text{отр}} (v_{\delta} + v_d^{\text{турб}})}{2d_{\text{отр}}}. \quad (17)$$

Поскольку газы являются сжимаемыми, то плотность газа в пузырьке будет значительно зависеть от статического давления. Значение плотности, в зависимости от давления, можно определить из уравнения Менделеева – Клапейрона. Тогда итоговая формула, полученная подстановкой уравнений (14) и (17) в (3), будет выглядеть следующим образом:

$$d_{\text{отр}} = \sqrt[3]{\frac{6d_{\text{к}}\sigma_t}{g(\rho_B - \frac{P_{\text{стат}}M}{RT}) + \frac{\rho_B v^2}{d_{\text{отр}}}}}, \quad (18)$$

где $P_{\text{стат}}$ — статическое давление теплоносителя в наблюдаемой точке, Па;

M — молярная масса газа, г/моль;

R — универсальная газовая постоянная 8,314 Дж/(К·моль);

T — температура газа, К.

Результаты исследования и их анализ

Рассмотрим следующий пример. Имеется вертикальный стояк системы отопления, выполненный из водогазопроводной трубы Ду 40, высотой 29 м (девятиэтажный дом). Давление в нижней части составляет 4,5 ат (3,5 избыточной атмосферы), средняя скорость потока 1,5 м/с. Необходимо определить диаметр отрывающихся пузырьков по высоте стояка. Температура теплоносителя 60 °С.

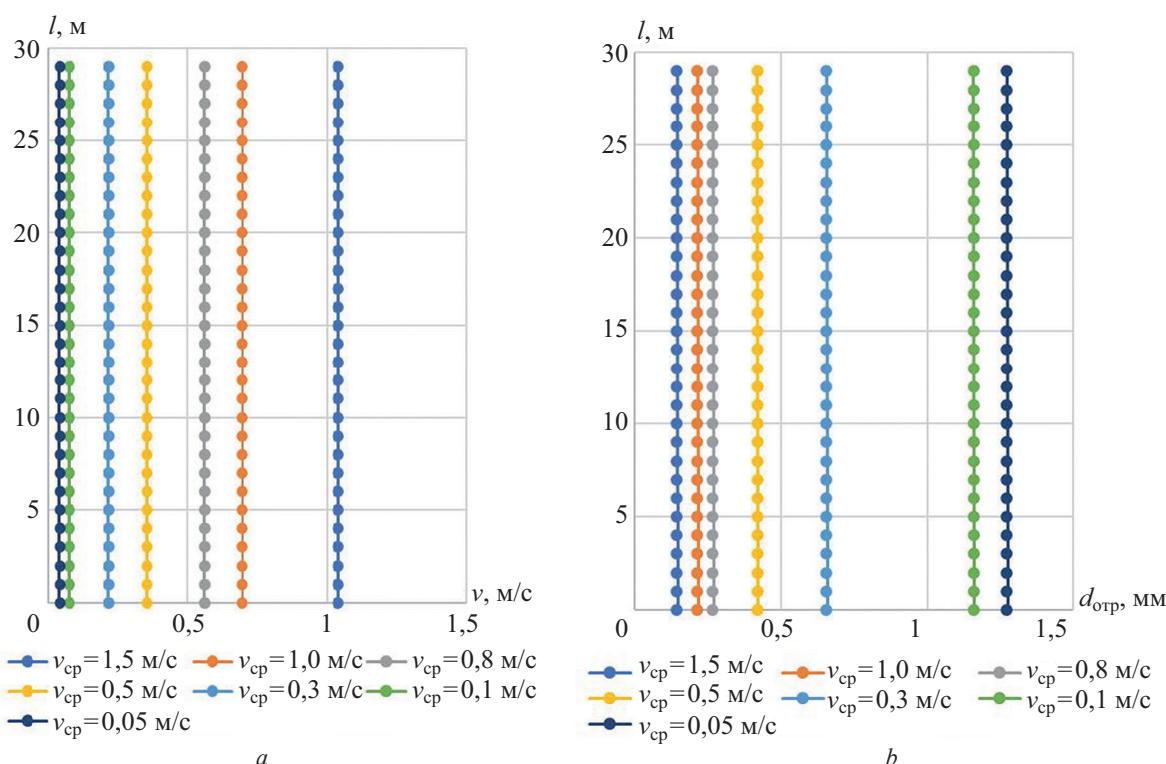


Рис. 2. Зависимость скорости, воздействующей на поток (а), и размера отрывающегося пузырька кислорода (b) от отметки вертикальной трубы

Без учета потери в местных сопротивлениях падение циркуляционного давления в стояке составит 23 759 Па. Падение статического давления между верхним и нижним сечением стояка составит 282 214 Па. Тогда общее падение давления между сечениями составит 305 973 Па или 10 551 Па/м. Толщина ламинарного подслоя, определенная по формуле (8), составит 0,085 мм.

Если предположить, что диаметр отрывающегося пузырька будет выступать из зоны ламинарного подслоя, то скорость на границе подслоя и турбулентного ядра, определенная по формуле (14), составит 1,01 м/с.

Определить среднюю скорость потока, действующую на пузырек напрямую, невозможно, потому что решение системы уравнений из (17) и (18) возможно только методом последовательных приближений.

Результаты расчета для пузырька кислорода при различной средней скорости потока представлены на рис. 2.

Из графиков видно, что изменение статического давления мало влияет на размер отрывающегося пузырька, а при уменьшении скорости потока в трубе с 1,5 до 0,05 м/с размер пузырька при отрыве увеличивается в 8,8 раза. Тогда, пренебрегая изменением статического давления, для пузырька кислорода можно получить зависимость диаметра отрывающегося пузырька от средней скорости потока (рис. 3), упростив формулу (18):

$$d_{\text{отр}} = \sqrt[3]{\frac{6d_k \sigma_t}{g\rho_v + \rho_v v^2/d_{\text{отр}}}}, \text{ м.} \quad (19)$$

Гидростатическое абсолютное давление в нижней части трубы составляет 455 963 Па, в верхней — 173 709 Па. Согласно работе [8], насыщение в нижней части при таких условиях воды кислородом происходит при концентрации кислорода c , равной 51 г/м³. По мере снижения давления и постоянной температуры растворимость газов снижается по закону Генри:

$$c_{\text{верх}} = c_{\text{низ}} \left(\frac{P_{\text{ст.верх}}}{P_{\text{ст.низ}}} \right) = 51 \frac{173\,700}{455\,963} = 19,43 \text{ г/м}^3, \quad (20)$$

где $c_{\text{верх}}$, $c_{\text{низ}}$ — концентрация кислорода в нижней и верхней части стояка, г/м³;

$P_{\text{ст.верх}}$, $P_{\text{ст.низ}}$ — статическое давление теплоносителя в верхней и нижней точке стояка, Па.

Объем воды в рассматриваемой трубе составляет 0,038 м³, следовательно, при движении жидкости из нижней в верхнюю точку должно выделиться 0,74 г кислорода. Объем свободного кислорода, скопившийся в верхней части трубы, при давлении в верхней части составит:

$$V = \frac{mRT}{MP_{\text{ст.верх}}} = \frac{0,74 \cdot 8,134 \cdot (273,15 + 40)}{32 \cdot 173\,700} = 0,00035 \text{ м}^3 = 0,35 \text{ л}, \quad (21)$$

где m — масса кислорода, г.

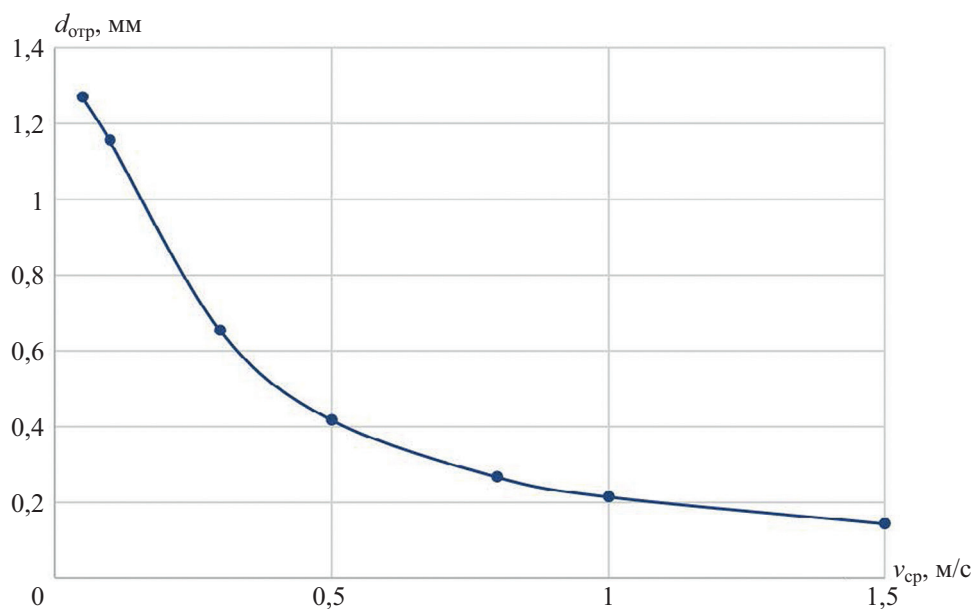


Рис. 3. Зависимость диаметра отрывающегося пузырька кислорода от средней скорости потока

Согласно закону Генри, для данного примера снижение концентрации кислорода на каждый метр высоты стояка составляет $1,09 \text{ г/м}^3$, или на каждый метр трубы должно выделиться из растворенного состояния $0,026 \text{ г}$ кислорода. С учетом формулы (19) на первом метре трубы должно образоваться и оторваться 2,95 миллиона пузырьков. С учетом площади основания пузырьков, при скорости $1,5 \text{ м/с}$ на 1 пог. м трубы максимально может образоваться (при условии плотного расположения) не более 7500 пузырьков одновременно. Таким образом, при прохождении всей длины трубы выделится примерно $1,332 \cdot 10^{-6} \text{ г}$ кислорода, а значит, необходимо 555 365 циклов, чтобы в верхней части системы стабилизировалась концентрация $19,43 \text{ г/м}^3$. При скорости $1,5 \text{ м/с}$ и длине циркуляционного кольца 100 м понадобится 428,5 сут непрерывной циркуляции.

Естественно, сам процесс образования пузырьков будет проходить не только в одном участке стояка, а во всех элементах системы, а также часть кислорода будет тратиться на коррозию. Но важным стоит отметить, что, несмотря на снижение давления в трубе по высоте и наличие большого количества растворенного кислорода, его высвобождение невозможно исключительно под влиянием изменения давления, необходима развитая площадь поверхности, на которой могут формироваться пузырьки. Применение обыкновенных автоматических воздухоотводчиков не решит вопрос скорости удаления газов из

перенасыщенного теплоносителя. Однако применение сепараторов воздуха [13, 14] может привести к более скорому выходу концентрации кислорода в теплоносителе системы отопления на требуемые значения [15].

Выводы

В результате исследования получена формула для определения диаметра отрывающегося пузырька в зависимости от шероховатости трубы, температуры теплоносителя и его средней скорости потока. Учитывая результаты расчета, на примере стояка трубы девятиэтажного здания можно сделать следующие выводы:

1. Статическое давление теплоносителя практически не оказывает влияние на диаметр отрывающегося пузырька.
2. Несмотря на снижение давления по высоте трубы, растворенный кислород не успевает высвободиться, а значит теплоноситель будет находиться в состоянии перенасыщения. Это может привести к интенсификации электрохимической коррозии.
3. Установка воздухоотводчика в верхней части системы может быть недостаточной, чтобы высвободить растворенный кислород из теплоносителя, при заполнении системы водой в состоянии полного насыщения. В таких случаях следует устанавливать сепараторы воздуха.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Shahzad K., Sliem M.H., Shakoор R.A., Radwan A.B. et al.* Electrochemical and thermodynamic study on the corrosion performance of API X120 steel in 3.5 % NaCl solution // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. No. 1. P. 4314.
2. *Katiyar P.K., Misra S., Mondal K.* Corrosion behavior of annealed steels with different carbon contents (0.002, 0.17, 0.43 and 0.7 % C) in freely aerated 3.5 % NaCl solution // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019. Vol. 28. Pp. 4041–4052.
3. *Василенко Г.В.* Влияние концентрации кислорода на коррозию тепловых сетей и теплообменных аппаратов // *Теплоэнергетика*. 2007. № 2. С. 66–68.
4. *Song G.D., Jeon S.H., Son Y.H., Kim J.G., Hur D.H.* Galvanic effect of magnetite on the corrosion behavior of carbon steel in deaerated alkaline solutions under flowing conditions // *Corrosion Science*. 2018. Vol. 131. Pp. 71–80.
5. *Родионова И.Г., Амежнов А.В., Зайцев А.И., Могутнов Б.М., Бакланова О.Н.* Коррозионная стойкость нелегированных и низколегированных сталей в нейтральных водных средах. М. : Metallurgizdat, 2021. 388 с.
6. *Satoh T., Shao Y., Cook W.G., Lister D.H., Uchida S.* Flow-assisted corrosion of carbon steel under neutral water conditions // *Corrosion*. 2007. Vol. 63. Pp. 770–780.
7. *Ракоч А.Г., Лобач А.А., Монахова Е.П. и др.* Коррозионное поведение стали 08Ю в растворе, имитирующем условия ее эксплуатации в системах отопления // *Черные металлы*. 2023. № 7. С. 72–78. DOI: 10.17580/chm.2023.07.09. EDN FETGFU.
8. *Кашуркин А.Ю., Усиков С.М., Мельникова И.В.* Определение растворимости газов в теплоносителе водяных систем отопления при характерных эксплуатационных режимах // *Инженерный вестник Дона*. 2024. № 12 (120). С. 561–571.
9. *Викулина В.Б., Инешина Л.В.* Теоретические исследования движения пузырьков воздуха в потоке воды при аэрации // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. 2019. № 10 (214). С. 22–24.
10. *Ягов В.В., Лабунцов Д.А.* Механика двухфазных систем. М. : Издательский дом «МЭИ», 2007. 384 с.
11. *Лурье М.В., Астрахан И.М., Кадет В.В.* Гидравлика и ее приложения в нефтегазовом производстве. М. : МАКС Пресс, 2010. 331 с.
12. *Игнатенко Е.В., Брянская Ю.В.* Распределение скоростей в каналах различной геометрии и шероховатости // *Гидротехническое строительство*. 2023. № 4. С. 50–55.
13. *Смирнова О.* Сепараторы Flamco — надежная защита системы отопления вашего дома // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. 2015. № 11 (167). С. 48–49.
14. *Топоркова А.А., Кобченко А.В.* Применение сепараторов воздуха и шлама для эффективной очистки теплоносителя // *Современные условия взаимодействия науки и техники : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Пермь, 11 ноября 2018 года. Часть 2*. С. 109–111.
15. *Правила технической эксплуатации объектов теплоснабжения и теплопотребляющих установок : утв. Приказом Минэнерго России от 14 мая 2025 г. № 511.*

Об авторах: **Алексей Юрьевич Кашуркин** — заведующий лабораторией; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, д. 21; SPIN-код: 7630-3139, РИНЦ ID: 804282, Scopus AuthorID: 57205226051, ORCID: 0000-0001-6582-4332; e-mail: leontiii@mail.ru;

Сергей Михайлович Усиков — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1432-2254, РИНЦ ID: 814697, Scopus AuthorID: 57201094063, ORCID: 0000-0003-0115-7491; e-mail: usikov-work@yandex.ru;

Инна Вячеславовна Мельникова — инженер; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, д. 21; SPIN-код: 8024-1181; e-mail: melnickova.d2014@ya.ru;

Владислав Михайлович Флоренский — инженер; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, д. 21; SPIN-код: 5800-2878, РИНЦ ID: 1311320, Scopus AuthorID: 58534954300, ORCID: 0009-0001-9255-3352; e-mail: florenskyvladislav@yandex.ru.

REFERENCES

1. Shahzad K., Sliem M.H., Shakoor R.A., Radwan A.B. et al. Electrochemical and thermodynamic study on the corrosion performance of API X120 steel in 3.5 % NaCl solution. *Scientific Reports*. 2020; 10(1):4314.
2. Katiyar P.K., Misra S., Mondal K. Corrosion behavior of annealed steels with different carbon contents (0.002, 0.17, 0.43 and 0.7 % C) in freely aerated 3.5 % NaCl solution. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019; 28:4041-4052.
3. Vasilenko G.V. Effect of oxygen concentration on the corrosion of district heating networks and heat exchangers. *Thermal Engineering*. 2007; 2:66-68. (rus.).
4. Song G.D., Jeon S.H., Son Y.H., Kim J.G., Hur D.H. Galvanic effect of magnetite on the corrosion behavior of carbon steel in deaerated alkaline solutions under flowing conditions. *Corrosion Science*. 2018; 131:71-80.
5. Rodionova I.G., Amezhnov A.V., Zaitsev A.I., Mogutnov B.M., Baklanova O.N. *Corrosion Resistance of Unalloyed and Low-Alloy Steels in Neutral Aqueous Media*. Moscow, Metallurgizdat, 2021; 388. (rus.).
6. Satoh T., Shao Y., Cook W.G., Lister D.H., Uchida S. Flow-assisted corrosion of carbon steel under neutral water conditions. *Corrosion*. 2007; 63:770-780.
7. Rakoch A.G., Lobach A.A., Monakhova E.P. et al. Corrosion Behavior of Steel 08Yu in a Solution Simulating its Operational Conditions in Heating Systems. *Ferrous Metals*. 2023; 7:72-78. DOI: 10.17580/chm.2023.07.09. EDN FETGFU. (rus.).
8. Kashurkin A.Yu., Usikov S.M., Melnikova I.V. Determination of gas solubility in heat transfer fluid of water heating systems under typical operating conditions. *Engineering Bulletin of the Don*. 2024; 12(120):561-571. (rus.).
9. Vikulina V.B., Ineshina L.V. Theoretical studies of air bubble motion in water flow during aeration. *Plumbing, Heating, Air Conditioning (SANTEHNIKA)*. 2019; 10(214):22-24. (rus.).
10. Yagov V.V., Labuntsov D.A. *Mechanics of Two-Phase Systems*. Moscow, MPEI Publishing House, 2007; 384. (rus.).
11. Lurie M.V., Astrakhan I.M., Kadet V.V. *Hydraulics and Its Applications in Oil and Gas Production*. Moscow, MAKS Press, 2010; 331. (rus.).
12. Ignatenko E.V., Bryanskaya Yu.V. Velocity distribution in channels of various geometries and roughness. *Hydro-technical Construction*. 2023; 4:50-55. (rus.).
13. Smirnova O. Flamco separators — reliable protection of your home's heating system. *Plumbing, Heating, Air Conditioning (SANTEHNIKA)*. 2015; 11(167):48-49. (rus.).
14. Toporkova A.A., Kobchenko A.V. Application of air and dirt separators for effective heat transfer fluid purification. *Modern Conditions of Interaction between Science and Technology : collection of Articles of the International Scientific-Practical Conference. Perm, November 11, 2018*. 2:109-111. (rus.).
15. Rules for the Technical Operation of Heat Supply Facilities and Heat-Consuming Installations : Approved by Order No. 511 of the Ministry of Energy of Russia dated May 14, 2025. (rus.).

About the authors: **Alexey Yu. Kashurkin** — Head of the laboratory; **Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Locomotivniy passage, Moscow, 127238, Russian Federation; SPIN-code: 7630-3139, ID RSCI: 804282, Scopus AuthorID: 57205226051, ORCID: 0000-0001-6582-4332; e-mail: leontiii@mail.ru;

Sergey M. Usikov — Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Heat, Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 1432-2254, ID RSCI: 814697, Scopus AuthorID: 57201094063, ORCID: 0000-0003-0115-7491; e-mail: usikov-work@yandex.ru;

Inna V. Melnikova — Engineer; **Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Locomotivniy passage, Moscow, 127238, Russian Federation; SPIN-code: 8024-1181; e-mail: melnickova.d2014@ya.ru;

Vladislav M. Florensky — Engineer; **Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Locomotivniy passage, Moscow, 127238, Russian Federation; SPIN-code: 5800-2878, ID RSCI: 1311320, Scopus AuthorID: 58534954300, ORCID: 0009-0001-9255-3352; e-mail: florenskyvladislav@yandex.ru.