

УДК 628.14

Расчет времени охлаждения надземного водовода с теплоизоляцией в условиях отрицательных температур

В. Ф. Лапшин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Лапшин В. Ф. Расчет времени охлаждения надземного водовода с теплоизоляцией в условиях отрицательных температур // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 103–112. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-103-112

Аннотация

Цель: объекты транспортной инфраструктуры включают в себя разнообразные системы водоснабжения. В случае аварийной ситуации, после прекращения движения воды в трубопроводе, сначала происходит ее охлаждение, а затем возникает опасность замерзания и разрушения водоводов. Настоящая работа посвящена расчету времени охлаждения воды в надземном водоводе с теплоизоляцией от заданного значения температуры в начальном состоянии до температуры замерзания. **Методы:** при построении математической модели процесса охлаждения воды используется подход, основанный на осреднении уравнений гидродинамики по объему воды в трубопроводе и осреднении уравнений теплопроводности в стенке трубопровода и в слое теплоизолятора по полярному углу. Для получения квазистационарной формы уравнений используется сравнительный анализ скоростей протекания тепловых процессов в различных слоях водовода. **Результаты:** сформулирована новая математическая модель остывания водовода — модель средних температур. Обоснована применимость квазистационарной формы уравнений модели, и найдено ее аналитическое решение. Получены явные формулы для времени остывания водовода как функции его параметров. Выполнены расчеты времени остывания в широком диапазоне параметров. Результаты модельных расчетов сравниваются с расчетами по традиционным полуэмпирическим формулам. **Практическая значимость:** полученные в работе формулы могут быть использованы для оценки времени охлаждения воды в надземном водоводе с теплоизоляцией до температуры замерзания в случае, когда температура внешней среды понижается до отрицательных значений.

Ключевые слова: надземный водовод, теплообмен, время охлаждения, математическое моделирование, квазистационарное приближение.

Введение

Важной частью объектов транспортной инфраструктуры являются системы водоснабжения. В северных широтах, в условиях вечной мерзлоты, надземная прокладка трубопроводов оказывается наиболее рациональной [1–2]. Вместе с тем эксплуатация водоводов при отрицательной температуре окружающей среды связана с опасностью их замерзания и разрушения. В связи с этим

процессам охлаждения воды и последующего внутритрубного обледенения посвящено большое число как экспериментальных [3–8], так и теоретических работ [8–12]. В настоящей работе рассматривается процесс охлаждения воды в надземном трубопроводе с теплоизоляцией в случае прекращения ее движения в условиях отрицательной температуры окружающей среды. Похожие задачи

рассматривались в [8–10]. Однако в работах [8, 9] на трубопроводе отсутствовала теплоизоляция, что существенно сказывалось на скорости процесса теплообмена воды с окружающей атмосферой. В работе [10] вода в процессе остывания считалась неподвижной, и, соответственно, предполагалось, что основным механизмом теплообмена является теплопроводность. В результате этого время остывания оказывалось существенно завышенным, поскольку при наличии градиента температуры в жидкости реализуется более эффективный конвективный механизм теплообмена.

В предлагаемой работе анализируются физические процессы, протекающие в процессе остывания водовода. Математическая модель процесса охлаждения строится методом осреднения уравнений гидродинамики и теплопроводности без каких-либо предположений о характере движения воды в трубопроводе. Обосновывается возможность использования квазистационарного приближения для получения явных соотношений для расчетов времени охлаждения. Определяется область значений параметров задачи, при которых это приближение применимо. Результаты модельных расчетов сравниваются со значениями, полученными по эмпирическим формулам, использующим теорию подобия.

Модель средних температур

В работе рассматривается процесс остывания неподвижной воды в аксиально-симметричном трубопроводе надземной прокладки с теплоизоляцией. Предполагается, что в исходном состоянии температура всех его элементов (воды, стенок трубы и теплоизолятора) известна и равна заданному значению T_0 . В начальный момент времени

$t = 0$ температура внешней среды мгновенно понижается до значения T_{ex} , меньшего, чем температура фазового перехода вода – лед T_{ph} , и далее, в процессе остывания водовода, считается постоянной.

Приступая к выводу уравнения для средней температуры, прежде всего отметим, что охлаждение воды происходит из-за понижения температуры поверхности трубопровода. Это означает, что температура воды T_w внутри трубопровода в точках, находящихся на одинаковом уровне, будет различной. В этом случае для жидкости, находящейся в поле силы тяжести, состояние механического равновесия невозможно [13]. Отсутствие механического равновесия приводит к возникновению свободной конвекции – внутренних течений, которые стремятся перемешать жидкость и выровнять температуру по ее объему. Такие течения воды происходят достаточно медленно, с гипозвуковыми скоростями. По этой причине нагрев воды за счет вязкости ничтожно мал по сравнению с потерями тепла при охлаждении водовода. Уравнение переноса энергии при конвективном теплообмене в трубопроводе имеет в таком случае вид [13]:

$$\rho_w c_1 \left(\frac{\partial T_w}{\partial t} + \vec{v} \text{grad} T_w \right) = \text{div}(\lambda_1 \text{grad} T_w). \quad (1)$$

Здесь ρ_w , c_1 и λ_1 — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности воды, t — время. Пространственная неравномерность охлаждения воды приводит к неравномерному распределению температур T_p в стенках трубопровода и T_i в слое теплоизолятора. Уравнения переноса энергии для них будут иметь вид:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_p}{\partial t} = \text{div}(\lambda_2 \text{grad} T_p), \quad (2)$$

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_i}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_3 \operatorname{grad} T_i). \quad (3)$$

Здесь ρ_2 , ρ_3 , c_2 , c_3 , λ_2 , λ_3 — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала стенки трубопровода и теплоизолятора. Значения этих величин, а также c_1 и λ_1 будем считать далее постоянными. Уравнение (1) содержит скорость движения воды \vec{v} и для его решения необходимо привлечь уравнения непрерывности и Навье — Стокса. В результате этого решение системы уравнений (1)–(3) становится крайне сложной и трудоемкой задачей. Вместе с тем при решении частной задачи по определению времени охлаждения воды в трубопроводе достаточно, очевидно, следить за изменением значения ее средней по объему температуры. Уравнения (1)–(3) являются при этом избыточно детализированными. Введем средние по объему значения температуры T_1 и плотности ρ_1 воды по формулам:

$$T_1(t) = \frac{1}{V_1} \iiint_{V_1} T_w dV, \quad \rho_1(t) = \frac{1}{V_1} \iiint_{V_1} \rho_w dV.$$

Здесь V_1 — объем воды, заключенный в участке трубопровода единичной длины. Средние по полярному углу значения температур стенки трубопровода T_2 и теплоизолятора T_3 определим по формулам:

$$\begin{aligned} T_2(r, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_p(r, \varphi, t) d\varphi, \\ T_3(r, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_i(r, \varphi, t) d\varphi. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения для средних величин T_2 и T_3 получаются усреднением (2) и (3) по полярному углу в цилиндрической системе координат (r, φ, z) , ось Z которой совпадает с осью трубопровода:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad (5)$$

$R_1 < r < R_2$, для стенки трубы,

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_3}{\partial r}, \quad (6)$$

$R_2 < r < R_3$, для теплоизолятора.

Здесь r — радиальная переменная, R_1 и R_2 — внутренний и наружный радиусы стенки трубопровода, R_3 — внешний радиус теплоизоляции (рис. 1).

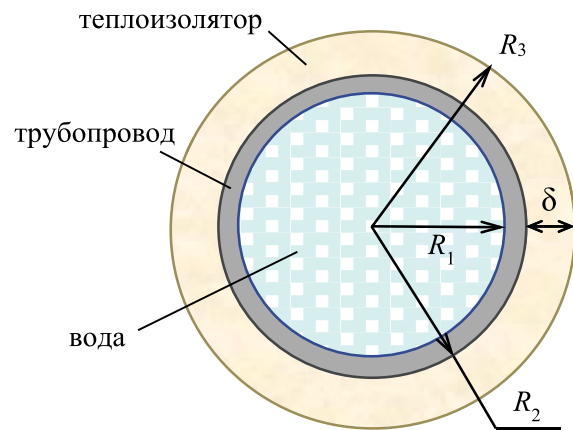


Рис. 1. Поперечное сечение водовода:

δ — толщина слоя теплоизоляции;
 R_1 и R_2 — внутренний и наружный радиусы трубы; R_3 — внешний радиус водовода с теплоизоляцией

Чтобы получить уравнение для средней температуры воды, выполним следующие преобразования. Производную по времени от произведения ρ_w и T_w представим в виде:

$$c_1 \frac{\partial(\rho_w T_w)}{\partial t} = c_1 T_w \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + c_1 \rho_w \frac{\partial T_w}{\partial t}.$$

В правой части заменим производную по времени в первом слагаемом с помощью

уравнения непрерывности, а во втором — с помощью уравнения (1). В результате получим:

$$c_1 \frac{\partial(\rho_w T_w)}{\partial t} = -c_1 \operatorname{div}(\rho_w T_w \vec{v}) + \operatorname{div}(\lambda_1 \operatorname{grad} T_w).$$

Проинтегрируем последнее соотношение по объему V_1 и преобразуем с помощью теоремы Гаусса — Остроградского объемные интегралы в правой части в интегралы по поверхности этого объема. Учтем, что первый интеграл в правой части обратится в нуль, поскольку скорость жидкости на боковой поверхности V_1 равна нулю, а поток через основания цилиндра V_1 отсутствует. В результате получаем:

$$c_1 \frac{d(\rho_1 T_1)}{dt} = \frac{1}{V_1} \iint_{S_1} \lambda_1 \operatorname{grad} T_w d\vec{S}.$$

Здесь S_1 — боковая поверхность цилиндра V_1 . Далее воспользуемся условием непрерывности потока тепла через поверхность S_1 и определением (4):

$$\iint_{S_1} \lambda_1 \operatorname{grad} T_w d\vec{S} = \iint_{S_1} \lambda_2 \operatorname{grad} T_p d\vec{S} = S_1 \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_1}.$$

Теперь с учетом того, что $S_1/V_1 = 2/R_1$, получаем окончательное уравнение для средней температуры воды в трубопроводе:

$$c_1 \rho_1 (1 - \beta T_1) \frac{dT_1}{dt} = \frac{2}{R_1} \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_1}. \quad (7)$$

Здесь $\beta = -(\partial \rho_1 / \partial T_1)_p / \rho_1$ — температурный коэффициент расширения воды. К уравнениям (5)–(7) добавим начальные условия

$$T_1(0) = T_2(r, 0) = T_3(r, 0) = T_0 \quad (8)$$

и традиционные граничные условия, выражающие равенство температур и потоков тепла на границах слоев водовода:

$$\begin{aligned} T_1(t) &= T_2(R_1, t), \\ T_2(R_2, t) &= T_3(R_2, t), \\ T_3(R_3, t) &= T_{ex}(t), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_2} = \lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial r} \right|_{r=R_2}. \quad (10)$$

Уравнения (5)–(7) вместе с условиями (8)–(10) составляют модель средних температур для процесса остывания водовода. Отметим, что уравнение (7) получено без каких-либо предположений о характере движения воды в трубопроводе. Кроме того, отметим здесь, что на внешней поверхности водовода вместо традиционного условия в форме закона теплообмена Ньютона используется равенство температур $T_{ex} = T_3(R_3, t)$. Как показано в [12, 14], погрешность, вносимая такой заменой, при наличии теплоизоляции не превышает погрешности, обусловленной неопределенностью условий теплообмена на поверхности водовода (например, скорости и направления ветра).

Квазистационарное приближение

Оценим характерное время t_c^* остывания цилиндрического столба воды единичной длины радиусом R_1 от начальной температуры T_0 до температуры замерзания T_{ph} . С этой целью приравняем количество теплоты, которое необходимо для этого отвести от воды, к теплу, отводимому от поверхности столба воды за счет теплопроводности:

$$\pi R_1^2 c_1 \rho_1 (T_0 - T_{ph}) = -2\pi R_1 \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{R_1} t_c^*.$$

Учтем, что

$$-\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_1} \approx -\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_2} = -\lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial r} \right|_{r=R_2} \approx \lambda_3 \frac{T_1 - T_{ex}}{\delta}.$$

Тогда получаем:

$$t_c^* = \frac{c_1 \rho_1 R_1 (T_0 - T_{ph}) \delta}{2 \lambda_3 (T_1 - T_{ex})}.$$

Сравним теперь характерное время выравнивания температуры в слое теплоизолятора вследствие теплопроводности $t_3^* = \delta^2 \rho_3 c_3 / \pi^2 \lambda_3$ [15] с величиной t_c^* . Для отношений характерных времен получаем соотношение:

$$\varepsilon = \frac{t_3^*}{t_c^*} = \frac{2 \rho_3 c_3 \delta}{\pi^2 \rho c_1 R_1} \frac{T_1 - T_{ex}}{T_0 - T_{ph}}.$$

Используем здесь значения $\rho_1 = 1000$ кг/м³, $c_1 = 4180$ Дж/(кг·К), $\rho_3 = 100$ кг/м³ и $c_3 = 840$ Дж/(кг·К) из [16]. Тогда, для характерных значений $\delta = 0,1$ м, $R_1 = 0,2$ м, $T_0 - T_{ph} = 5$ К, $T_0 - T_{ex} = 25$ К, с учетом того, что $T_1 < T_0$, получаем $\varepsilon < 0,025$. Как видим, время выравнивания температуры в слое теплоизолятора намного меньше времени остывания воды. Время выравнивания температуры в тонкой стенке трубопровода, очевидно, еще меньше. Таким образом, в каждый момент времени благодаря теплопроводности в стенке трубопровода и в слое теплоизолятора успевает установиться радиальное распределение температуры, которое соответствует стационарному распределению с заданным значением температуры воды. Это позволяет использовать для определения времени остывания водовода квазистационарную форму модели средних температур:

$$c_1 \rho_1 \frac{dT_1}{dt} = \frac{2}{R_1} \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_1}, \quad (11) \quad \text{где}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0, \quad R_1 < r < R_2, \quad (12)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_3}{\partial r} = 0, \quad R_2 < r < R_3. \quad (13)$$

В уравнении (11) пренебрегается величиной βT_1 , поскольку в диапазоне температур от 0 °С до 10 °С она не превышает по модулю 0,017 [17]. Начальным условием для (11) и граничными условиями для (12)–(13) остаются соотношения (8)–(10). Общее решение уравнений (12)–(13) имеет вид:

$$T_i(r) = c_{i1} \ln(r) + c_{i2}, \quad i = 2, 3. \quad (14)$$

После подстановки (14) в граничные условия (9)–(10) получаем систему из четырех линейных относительно коэффициентов c_{i1} и c_{i2} уравнений:

$$\begin{aligned} c_{21} \ln R_1 + c_{22} &= T_1 \\ c_{21} \ln R_2 + c_{22} &= c_{31} \ln R_2 + c_{32} \\ \lambda_2 c_{21} &= \lambda_3 c_{31} \\ c_{31} \ln R_3 + c_{32} &= T_{ex} \end{aligned}$$

Решение линейной системы имеет громоздкий вид. Приведем здесь выражение для коэффициента c_{21} , который необходим для решения уравнения (11):

$$c_{21} = - \frac{\lambda_3 (T_1 - T_{ex})}{\lambda_2 \ln \frac{R_3}{R_2} + \lambda_3 \ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (15)$$

После подстановки (15) в (11) получаем дифференциальное уравнение для T_1 :

$$\frac{dT_1}{dt} = -A(T_1 - T_{ex}),$$

$$A = \frac{2 \lambda_3}{\rho_1 c_1 R_1^2 \left(\ln \frac{R_3}{R_2} + \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \ln \frac{R_2}{R_1} \right)}. \quad (16)$$

Решение этого уравнения, с учетом начального условия $T_1(0) = T_0$, имеет вид:

$$T_1(t) = T_{ex} + (T_0 - T_{ex}) \exp(-At). \quad (17)$$

Время охлаждения воды t_c находится из условия $T_1(t_c) = T_{ph}$. Используя (17), получаем, что время охлаждения воды в трубопроводе от начальной температуры T_0 до температуры замерзания T_{ph} при температуре окружающей среды T_{ex} задается формулой:

$$t_c = \frac{\rho_1 c_1 R_1^2}{2\lambda_3} \left[\ln\left(1 + \frac{\delta}{R_2}\right) + \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \ln\left(1 + \frac{\Delta R}{R_1}\right) \right] \ln\left(\frac{T_0 - T_{ex}}{T_{ph} - T_{ex}}\right). \quad (18).$$

Здесь $\Delta R = R_2 - R_1$ — толщина стенки трубопровода. Отметим здесь также, что температура наружной поверхности водовода в реальных условиях всегда несколько выше, чем температура окружающей среды. Это приводит к тому, что значения времени охлаждения (18), полученные при использовании условия (9), всегда будут несколько меньше, чем в действительности.

Результаты вычислений и обсуждение

Основные особенности процесса охлаждения водовода отражены в соотношении (18). Прежде всего отметим, что при малых толщинах теплоизоляции, когда $\delta/R_2 \ll 1$, время охлаждения прямо пропорционально произведению радиуса трубопровода R_1 и δ : $t_c \sim \delta R_1$. После того как толщина теплоизоляции δ сравнивается по величине с R_1 , зависимость от δ становится логарифмической. Аналогичная зависимость имеет место и для температуры. При низкой наружной температуре T_{ex} , когда $\varepsilon_T = (T_0 - T_{ph}) / (T_{ph} - T_{ex}) \ll 1$, время охлаждения $t_c \sim \varepsilon_T$. При значениях отношения ε_T порядка или более единицы зависимость от температуры становится логарифмической: $t_c \sim \ln(1 + \varepsilon_T)$. Отметим здесь также, что для металлического трубопровода отношение коэффициентов теплопроводности

$\lambda_3 / \lambda_2 \ll 1$ и вторым слагаемым в квадратных скобках в (18) можно пренебречь.

Результаты вычислений времени охлаждения воды t_c по формуле (18) в зависимости от радиуса трубопровода при различных толщинах теплоизоляции приведены на рис. 2. В расчетах использовались значения $\lambda_2 = 0,84$ Вт/(м·К) [17], $\lambda_3 = 0,04$ Вт/(м·К) [16], $T_0 = 10$ °С, $T_{ex} = -30$ °С, $\Delta R = 10$ мм. На рис. 2 приведены, кроме того, результаты расчетов [18], выполненных по эмпирическим формулам. Хорошо видно, что результаты, полученные в рамках квазистационарной модели средних температур, практически совпадают с [18].

Заключение

В настоящей работе выполнен анализ процесса охлаждения надземного водовода с теплоизоляцией после прекращения движения в нем воды. На основе уравнений гидродинамики и теплопроводности сформулирована модель средних температур для описания процесса охлаждения воды. Получена квазистационарная форма уравнений модели и найдено ее решение. Получены простые формулы для времени охлаждения и установлены критерии их применимости. Для широкого диапазона параметров выполнены расчеты времени охлаждения воды от заданной начальной температуры до температуры замерзания. Выполнено сравнение найденного решения уравнений с результатами, полученными по эмпирическим формулам.

Результаты, полученные в работе, могут быть использованы для оценки времени, в течение которого должны быть выполнены ремонтные работы и восстановлено движение воды в трубопроводе прежде, чем начнется его промерзание.

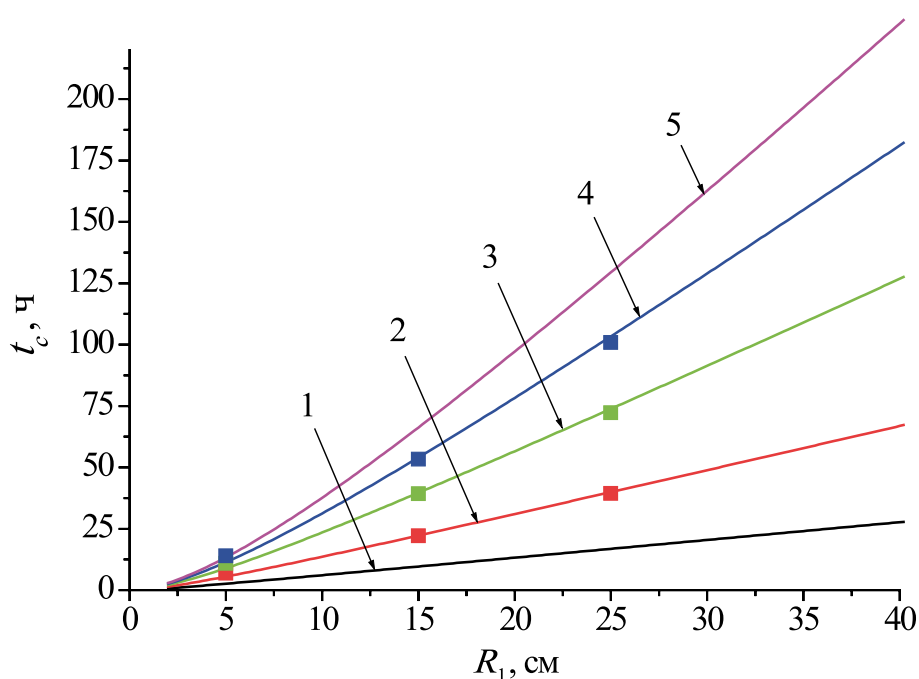


Рис. 2. Зависимость времени охлаждения воды в трубопроводе t_c от его радиуса R_1 при различных значениях толщины слоя теплоизоляции δ : 1 — 2 см, 2 — 5 см, 3 — 10 см, 4 — 15 см, 5 — 20 см. Начальная температура воды $T_0 = 10$ °С, температура наружного воздуха $T_{ex} = -30$ °С, ■, ■, ■ — данные [18]

Библиографический список

1. Terekhov L. D. Experimental study of soil thawing around shallow sewage pipelines in winter / L. D. Terekhov, S. B. Mayny, N. A. Chernikov // *Water and Ecology*. 2019. Iss. 4 (80). P. 71–78. DOI: 10.23968/2305–3488.2019.24.4.71–78.
2. Капинос О. Г. Гидравлические удары в напорных трубопроводах при надземной прокладке / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2023. Т. 20, вып. 1. С. 79–90.
3. Жидких В. М. Ледовый режим трубопроводов / В. М. Жидких, Ю. А. Попов. Л.: Энергия, 1979. 132 с.
4. Cheng K. C. Freezing and melting heat transfer in engineering: Selected topics on ice-water systems and welding and casting processes / K. C. Cheng, N. Seki. New York: Hemisphere, 1991. 815 p.
5. Akyurt M. Freezing phenomena in ice-water systems / M. Akyurt, G. Zaki, B. Habeebullah // *Energy Conversion and Management*. 2002. Vol. 43. P. 1773–1789.
6. Терехов Л. Д. Внутреннее обледенение водоводов в зимний период / Л. Д. Терехов, Н. В. Твардовская, Е. А. Твардовская // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов, Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2021 года. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. Т. 2. С. 161–164.
7. Sologubenko O. Wall damage of cylindrical heat pipes caused by water freezing / O. Sologubenko, D. Torresin, A. W. Petrov, et al. // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 232. P. 120986. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120986>.
8. Gilpin R. R. Cooling of a horizontal cylinder of water through its maximum density point at 4°C / R. R. Gilpin // *International Journal of Heat and Mass*

Transfer. 1975. Vol. 18, iss. 11. P. 1307–1315. DOI: 10.1016/0017–9310(75)90241–0.

9. Alawadhi E. M. Cooling process of water in a horizontal circular enclosure subjected to non-uniform boundary conditions // *Energy*. 2011. Vol. 36, iss. 1. P. 586–594. DOI: 10.1016/j.energy.2010.10.001.

10. McDonald A. Mathematical simulation of the freezing time of water in small diameter pipes / A. McDonald, B. Bscheiden, E. Sullivan, et al. // *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 73 (1). P. 142–153.

11. Hongfei Xu. Modelling ice and wax formation in a pipeline in the Arctic environment / Hongfei Xu., Dali Huang, Yue Sun, et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 66. P. 104197.

12. Лапшин В. Ф. Расчет времени промерзания надземного водовода в условиях отрицательных температур // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2023. Т. 20, № 3. С. 740–750.

13. Ландау Л. Д. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука, 1986. 736 с.

14. Лапшин В. Ф. Анализ процессов теплообмена на поверхности надземного трубопровода с теплоизоляцией // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2023. Вып. 3. С. 147–156. DOI: 10.20295/2223–9987–2023–3–147–156.

15. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

16. ГОСТ 21880–2011. Маты из минеральной ваты прошивные теплоизоляционные; ред. В. Н. Копысов. М.: Стандартинформ, 2012. 10 с.

17. Физические величины: Справочник; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

18. Терехов Л. Д. Технологические основы энергосбережения при подаче воды по водоводам на Севере: специальность 05.23.04: «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов»: дис. ... д-ра техн. наук. Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 1999. 275 с.

Дата поступления: 27.01.2024

Решение о публикации: 29.02.2024

Контактная информация:

ЛАПШИН Владимир Федорович — докт. физ.-мат. наук, профессор; lapshinvf@mail.ru

Calculation of cooling time of above-ground water pipeline with heat insulation under conditions of negative temperatures

V. F. Lapshin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Lapshin V. F.* Calculation of cooling time of above-ground water pipeline with heat insulation under conditions of negative temperatures // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 103–112. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-103-112

Abstract

Objective: transport infrastructure facilities include a variety of water supply systems. In the event of an emergency, after stopping the movement of water in the pipeline, it is cooled first, and then there is a risk of freezing and destruction of water pipelines. This work is devoted to the calculation of the cooling time of water in the above-ground water conduit with thermal insulation from the specified temperature value in the initial state to the freezing temperature. **Methods:** when building a mathematical model of the water

cooling process, an approach is used based on averaging the equations of hydrodynamics by the volume of water in the pipeline and averaging the equations of thermal conductivity in the wall of the pipeline and in the layer of the heat insulator by the polar angle. To obtain a quasi-stationary form of equations, a comparative analysis of the rates of thermal processes in different layers of the water conduit is used.

Results: a new mathematical model for cooling the water pipeline is formulated — a model of average temperatures. The applicability of the quasi-stationary form of the equations of the model is justified and its analytical solution is found. Explicit formulas are obtained for cooling time of water conduit as a function of its parameters. Cooling time was calculated in a wide range of parameters. The results of model calculations are compared with calculations according to traditional semi-empirical formulas.

Practical importance: the formulas obtained in the work can be used to estimate the cooling time of water in an above-ground water pipeline with heat insulation to the freezing temperature in the case when the ambient temperature drops to negative values.

Keywords: above-ground water pipeline, internal icing, freezing time, mathematical modeling, quasi-stationary approximation.

References

1. Terekhov L. D. Experimental study of soil thawing around shallow sewage pipelines in winter / L. D. Terekhov, S. B. Mayny, N. A. Chernikov // *Water and Ecology*. 2019. Iss. 4 (80). P. 71–78. DOI: 10.23968/2305–3488.2019.24.4.71–78.
2. Kapinos O. G. Gidravlicheskie udary v napornyh truboprovodah pri nadzemnoj prokladke/ O. G. Kapinos, N. V. Tvardovskaja // *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. 2023. T. 20, vyp. 1. S. 79–90. (In Russian)
3. Zhidkih V. M. Ledovyy rezhim truboprovodov / V. M. Zhidkih, Ju. A. Popov. L.: Jenergija, 1979. 132 s. (In Russian)
4. Cheng K. C. Freezing and melting heat transfer in engineering: Selected topics on ice-water systems and welding and casting processes / K. C. Cheng, N. Seki. New York: Hemisphere, 1991. 815 p.
5. Akyurt M. Freezing phenomena in ice-water systems / M. Akyurt, G. Zaki, B. Habeebullah // *Energy Conversion and Management*. 2002. Vol. 43. P. 1773–1789.
6. Terekhov L. D. Vnutrennee obledenenie vodovodov v zimnij period / L. D. Terekhov, N. V. Tvardovskaja, E. A. Tvardovskaja // III Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: sbornik trudov, Sankt-Peterburg, 2–3 dekabrja 2021 goda. SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2021. T. 2. S. 161–164. (In Russian)
7. Sologubenko O. Wall damage of cylindrical heat pipes caused by water freezing / O. Sologubenko, D. Torresin, A. W. Petrov, et al. // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 232. P. 120986. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120986.
8. Gilpin R. R. Cooling of a horizontal cylinder of water through its maximum density point at 4°C / R. R. Gilpin // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1975. Vol. 18, iss. 11. P. 1307–1315. DOI: 10.1016/0017–9310(75)90241–0.
9. Alawadhi E. M. Cooling process of water in a horizontal circular enclosure subjected to non-uniform boundary conditions // *Energy*. 2011. Vol. 36, iss. 1. P. 586–594. DOI: 10.1016/j.energy.2010.10.001.
10. McDonald A. Mathematical simulation of the freezing time of water in small diameter pipes / A. McDonald, B. Bscheiden, E. Sullivan, et al. // *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 73 (1). P. 142–153.
11. Hongfei Xu. Modelling ice and wax formation in a pipeline in the Arctic environment / Hongfei Xu., Dali Huang, Yue Sun, et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 66. P. 104197.
12. Lapshin V. F. Raschet vremeni promerzaniya nadzemnogo vodovoda v uslovijah otricatel'nyh temperatur // *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. 2023. T. 20, № 3. S. 740–750. (In Russian)

13. Landau L. D. Teoreticheskaja fizika: Uchebnoe posobie. V 10 t. T. VI. Gidrodinamika / L. D. Landau, E. M. Lifshic. M.: Nauka, 1986. 736 s. (In Russian)
14. Lapshin V. F. Analiz processov teploobmena na poverhnosti nadzemnogo truboprovoda s teploizoljaciej // Bjulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. 2023. Vyp. 3. S. 147–156. DOI: 10.20295/2223–9987–2023–3–147–156. (In Russian)
15. Lykov A. V. Teorija teploprovodnosti. M.: Vysshaja shkola, 1967. 600 s. (In Russian)
16. GOST 21880–2011. Maty iz mineral'noj vaty proshivnye teploizoljacionnye; red. V. N. Kopysov. M.: Standartinform, 2012. 10 s. (In Russian)
17. Fizicheskie velichiny: Spravochnik; pod red. I. S. Grigor'eva, E. Z. Mejlihova. M.: Jenergoatomizdat, 1991. 1232 s. (In Russian)
18. Terehov L. D. Tehnologicheskie osnovy jenergosberezhenija pri podache vody po vodovodam na Severe: special'nost' 05.23.04: "Vodosnabzhenie, kanalizacija, stroitel'nye sistemy ohrany vodnyh resursov": dis. ... d-ra tehn. nauk. Habarovsk: Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, 1999. 275 s. (In Russian)

Received: 27.01.2024

Accepted: 29.02.2024

Author's information:

Vladimir F. LAPSHIN — Dr. Sci. in Physical and Mathematical Sciences, Professor; lapshinvf@mail.ru