

Abstract. As a result of the scientific and experimental studies carried out, it has been shown that an important problem of efficient construction in permafrost regions and in the Arctic can be solved by creating and using a highly efficient structural and thermal-insulation material for strengthening and reliably protecting frozen soils on whose surface industrial and civil facilities and transport routes are constructed. The basis for creating an innovative structural and thermal-insulation material is the rational selection of a lightweight aggregate and the development of a new complex chemical admixture that should provide an effective concrete mixture with good workability on a complex soil surface; on this basis, lightweight concrete with an average density class of D 800–1000 should be formed. It has been experimentally established that the developed concrete has an effective combination of compressive strength of 20–30 MPa and a uniquely low thermal-conductivity coefficient of 0,16–0,22 W/(m·°C). The use of structural and thermal-insulation concrete should provide reliable protection of frozen soil from possible uneven summer thawing.

Keywords: innovative concrete, high strength, frozen soil, protection against thawing, lightweight aggregate, complex chemical admixture

УДК 628.147.2

Л. Д. Терехов, В. Д. Кузьмин

Расчет влияния опорной конструкции на внутритрубное оледенение водовода надземной прокладки

Терехов Лев Дмитриевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»

Кузьмин Виктор Дмитриевич — аспирант кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматривается внутритрубное оледенение водовода надземной прокладки в месте установки опорных конструкций. Приведен краткий обзор литературы по данной теме, представлены результаты моделирования процесса промерзания трубопровода в месте установки опоры с помощью программного комплекса Matlab 2025. Использован метод конечных разностей. В работе приведен расчет опоры для трубы 219 × 6 мм в изоляции ППУ, представлено наглядное сравнение изолированного участка трубы и места интенсификации теплопотерь. Показано, что промерзание сечения трубопровода в месте установки опорной конструкции происходит намного быстрее в сравнении с обычным участком трубы.

Ключевые слова: водоснабжение на Севере, опорные конструкции трубопроводов, внутритрубное оледенение, местные теплотери, Matlab 2025, метод конечных разностей

Введение

Для большей части регионов Российской Федерации в зимний период года характерны низкие температуры атмосферного воздуха. Часть регионов, расположенных на Севере (от Кольского полуострова до Чукотки), относят к Арктической зоне. Для развития этих регионов, строительства в этой зоне, развития предприятий необходимы системы водоснабжения. Специфика водоснабжения на Севере обуславливается низкими температурами наружного воздуха. В литературе описаны проблемы водоснабжения на Севере и методы их решения [1–4]. Для крепления надземного трубопровода в проектное положение на сети предусматриваются опоры различных типов. Так как опора в большинстве случаев нарушает целостность теплоизоляции, место установки опоры является местом интенсификации теплотерь наряду с повреждениями изоляции [7]. В научных работах [5, 6, 11] представлены исследования по интенсифицирующим воздействиям опорных конструкций трубопроводов, разработаны модели обледенения с учетом влияния опор. В исследованиях [8–10] описаны методики и расчеты работы водовода в условиях внутритрубного оледенения. Авторы работы [12] приводят исследования по времени критического промерзания трубопровода, однако они не учитывают местных теплотерь.

Цель данной работы — моделирование процесса оледенения трубопровода в месте интенсификации теплотерь (опоры) с помощью программы Matlab 2025.

Методы

Для реализации данного расчета в программном пакете Matlab 2025 использованы расчетные формулы и физические зависимости, представленные ниже. Расчет представляет собой численное решение системы дифференциальных уравнений методом конечных разностей.

Для расчета теплового потока через стенку трубопровода с изоляцией используется формула, приведенная в работе [2]:

$$Q = \frac{(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{\frac{1}{2\pi\lambda_{\text{тр}}} \cdot \ln \frac{d_{\text{н1}}}{d_{\text{в}}} + \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{из}}} \cdot \ln \frac{d_{\text{н2}}}{d_{\text{н1}}} + \frac{1}{a \cdot \pi d_{\text{н2}}}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{в}}$ — температура внутри изолируемого объекта (температура воды в трубопроводе), °C;

$t_{\text{н}}$ — температура наружного воздуха, °C;

$\lambda_{\text{тр}}$ — коэффициент теплопроводности трубы, Вт/(м·°C);

$\lambda_{\text{из}}$ — коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/(м·°C);

$d_{\text{в}}$ — внутренний диаметр трубы, м;

$d_{\text{н1}}$ — внешний диаметр трубы, м;

$d_{\text{н2}}$ — диаметр трубы с изоляцией, м;

a — коэффициент теплопередачи от внешней поверхности трубы к воздуху.

В программном коде формула расписывается через расчет термических сопротивлений стенки трубы и изоляции:

R_i^L — линейное термическое сопротивление i -го слоя, м·°C/Вт;

$R_{\text{н}}^L$ — линейное термическое сопротивление теплоотдачи наружной изоляции, м·°C/Вт.

Исходное уравнение теплопроводности (по закону Фурье) в данном случае приобретает следующий дискретный вид для области решения, разбитой на узлы с шагом Δx в пространстве и Δt по времени:

$$Q_{\text{по оси}} = \lambda_{\text{тр}} \cdot S_{\text{сеч}} \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{по оси}}$ — тепловой поток за счет продольной теплопроводности трубы, Вт;

x — шаг сетки (для данного расчета принимается равным 5 мм);

$S_{\text{сеч}}$ — площадь поперечного сечения воды в трубопроводе, м²;

T_{i+1} — температура в сечении, °C.

С точки зрения физических процессов расчет делится на расчет процесса охлаждения воды в трубе и процесс образования льда (кристаллизация). Условием проверки (какой именно процесс в данный момент происходит) в разработанном расчете служит проверка следующего: $T_i > 0,1$ °C. Охлаждение воды рассчитывается по формуле:

$$\Delta T = \frac{(Q_{\text{в атмосферу}} - Q_{\text{по оси}}) \cdot \Delta t}{c_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}}}, \quad (3)$$

где $c_{\text{в}}$ — теплоемкость воды, Дж/(кг·°C);

$m_{\text{в}}$ — масса воды, кг;

$Q_{\text{в атмосферу}}$ — тепловой поток в атмосферу, Вт;

Δt — шаг по времени (для данного расчета принимается 10 с).

Массу образовавшегося льда можно рассчитать по следующей формуле:

$$m_{\text{л}} = \frac{(Q_{\text{в атмосферу}} - Q_{\text{по оси}}) \cdot \Delta t}{\lambda}, \quad (4)$$

где λ — удельная теплота фазового перехода, Дж/кг.

Толщина льда, образующегося в трубопроводе, рассчитывается в программе по физической зависимости:

$$\Delta h = \frac{m_{\text{л}}}{\rho_{\text{л}} \cdot 2\pi r_{\text{ср}} \cdot L}, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{л}}$ — плотность льда, кг/м³;

$r_{\text{ср}}$ — средний радиус цилиндрического слоя льда, нарастающего в трубе:

$$r_{\text{ср}} = \frac{d_{\text{в}} - \Delta h}{2}. \quad (6)$$

Результаты

Для расчета были выбраны значения исходных данных для одного конкретного случая (см. таблицу), ввиду того что сделать всеобъемлющий расчет затруднительно из-за многообразия параметров, как видно по формуле (1).

ТАБЛИЦА. Исходные данные расчета

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Длина рассматриваемого участка	L	2	м
Труба	—	219×6	—
Начальная температура воды	$t_{\text{в}}$	5	°C
Температура окружающего воздуха	$t_{\text{н}}$	–25	°C
Коэффициент теплопроводности трубы	$\lambda_{\text{тр}}$	45	Вт/(м·°C)
Плотность воды	$\rho_{\text{в}}$	1000	кг/м ³
Плотность льда	$\rho_{\text{л}}$	916,8	кг/м ³
Теплота фазового перехода льда	λ	$3,34 \cdot 10^5$	Дж/кг
Толщина теплоизоляции	δ	30	мм
Коэффициент теплопроводности изоляции ППУ	$\lambda_{\text{из}}$	0,04	Вт/(м·°C)
Коэффициент теплопередачи от внешней поверхности трубы к воздуху	a	6,88	Вт/(м ² ·°C)
Теплоемкость воды	$c_{\text{в}}$	4200	Дж/(кг·°C)
Ширина хомута опоры	—	5	см

Моделируется труба с заданной геометрией и опорой-хомутом толщиной 50 мм, на рис 1. зона опоры выделена серым цветом. В результате расчета получены следующие графики (рис. 1, 2).

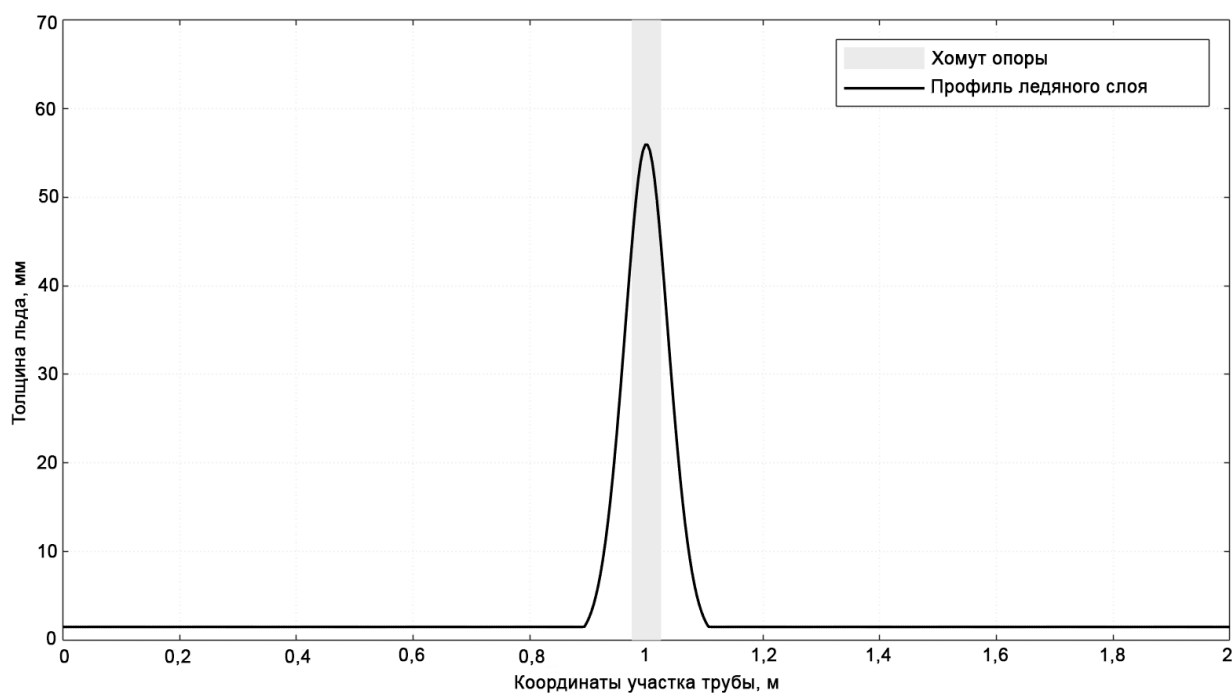


Рис. 1. График локального оледенения в зоне хомута опоры

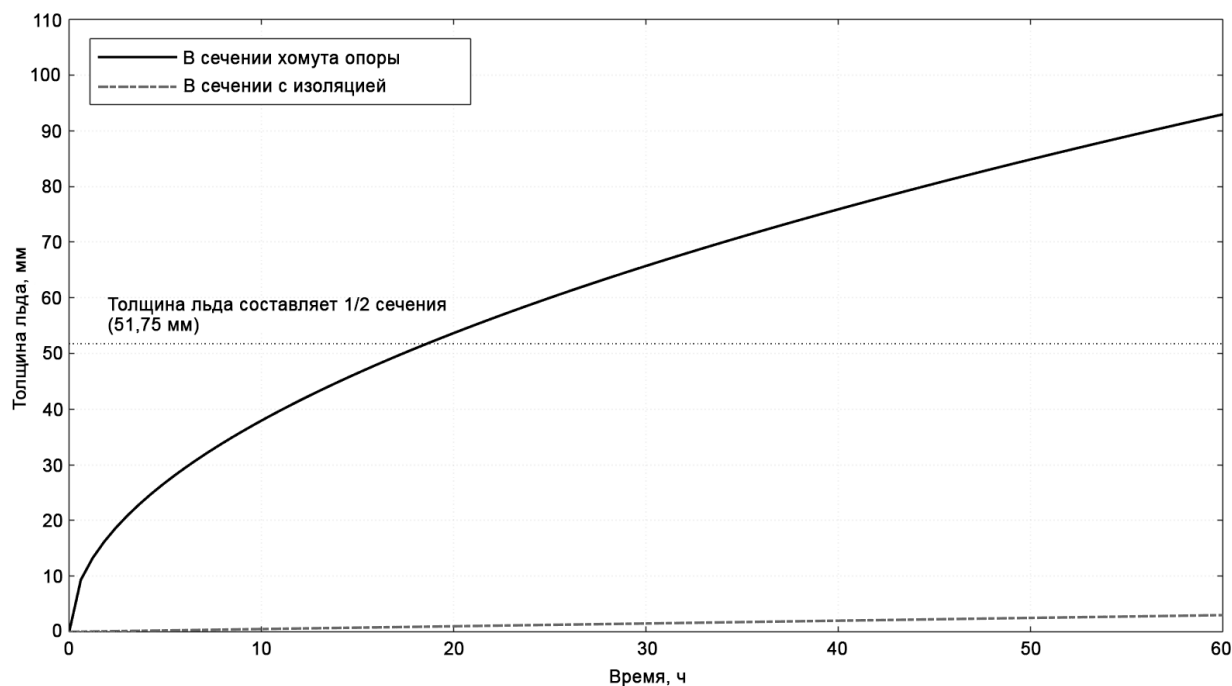


Рис. 2. График сравнительной динамики нарастания льда в трубопроводе

Выводы

Визуализация наглядно показывает, что в зоне опоры образование льда происходит в разы быстрее, чем на изолированной стенке водовода. Для данного диаметра наглядно показано, что в месте интенсификации теплопотерь сечение замерзает значительно быстрее, чем трубопровод в теплоизоляции.

Для расчета времени промерзания трубопровода при остановке движения воды необходимо учитывать места интенсификации теплопотерь как критические, так как оледенение защищенных теплоизоляцией участков происходит достаточно медленно.

Полученные результаты математического моделирования в программе Matlab 2025 наглядно демонстрируют разницу в динамике нарастания льда для участков трубопровода в изоляции и мест, где изоляция не работает ввиду особенностей крепления опорной конструкции.

Список источников

1. Терехов Л. Д., Акимов О. В., Акимова Ю. М. Водоснабжение и водоотведение в северных климатических условиях: учебное пособие. Хабаровск: изд-во ДВГУПС, 2008. 124 с.
2. Зенгер Н. Н. Особенности устройства водопроводов в условиях вечной мерзлоты. М.: Изд-во литературы по строительству, 1964.
3. Вдовин Ю. И. Водоснабжение на Севере. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1987. 168 с.
4. Федоров Н. Ф., Заборщиков О. В. Справочник по проектированию систем водоснабжения и канализации в районах вечномерзлых грунтов. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1979. 160 с.
5. Акимова Ю. М. Исследование интенсифицирующего воздействия опорных конструкций на оледенение водоводов надземной прокладки: автореф. дис. канд. техн. наук. Иркутск, 2009. 22 с.
6. Шмак Е. Д., Акимов О. В. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления ледяного выступа, образующегося в месте расположения опорной конструкции трубопровода надземной прокладки // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2011. Т. 2. С. 217–221.
7. Терехов Л. Д., Акимов О. В., Акимова Ю. М. Назначение оптимальной толщины теплоизоляции водовода // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2009. № 3 (39). С. 180–183.
8. Акимов О. В., Акимова Ю. М. Расчет водоводов надземной прокладки с внутритрубным обледенением // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 2 (85). С. 114–117.

9. Кривоногов И. П., Ганус А. Н. Определение термических и гидравлических параметров трубопровода системы водоснабжения в режиме внутритрубного оледенения на участках местных сопротивлений // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2022. Т. 1. С. 445–447.
10. Terekhov L. D., Tvardovskaya N. V. Dynamics of Internal Pipeline Icing in Winter Period When Bringing It to Freezing // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 402. Pp. 871–879.
11. Юдин М. Ю. Совершенствование метода расчета оледенения водовода надземной прокладки при перерывах в подаче воды: автореф. дис. канд. техн. наук. СПб., 1994. С. 26–27.
12. Дулькин А. Б., Дулькин Б. А., Голованчиков А. Б. Оценка времени замерзания воды в трубопроводе // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. № 1 (128). С. 19–22.

L. D. Terekhov, V. D. Kuz'min

Calculation of the Support Structure Influence on the Internal Icing of an Above-Ground Water Pipeline

Terekhov Lev Dmitrievich — Dr. Sci. in Engineering, Professor of the Department “Water Supply, Sanitation and Hydraulics”

Kuz'min Viktor Dmitrievich — Postgraduate Student, Assistant of the Department “Water Supply, Sanitation and Hydraulics”

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article considers the process of internal icing of above-ground water pipelines at the locations of support structures. A brief literature review on the research topic is presented. The results of modeling the pipeline freezing process at the support installation site using the Matlab 2025 software package are provided. The numerical simulation is implemented based on the finite difference method. The paper includes the support calculation for a 219 × 6 mm pipeline with polyurethane foam insulation. A visual comparative analysis between a standard insulated pipe section and a local zone of intensified heat losses is carried out. The simulation results demonstrate that the pipeline cross-section freezing at the support structure location occurs significantly faster compared to a standard insulated pipeline section.

Keywords: water supply in northern regions, pipeline supports, internal icing, local heat losses, Matlab 2025, finite difference method