

МОРОЗОУСТОЙЧИВОСТЬ ТРУБОПРОВОДОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ИЗОЛИРОВАННЫХ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОМ

Предложены физическая и математическая модели процессов остывания воды и образования льда в трубопроводе предварительно изолированном жестким пенополиуретаном. Получены достаточно простые и удобные для практического применения расчетные формулы. Приведенная методика позволяет оценить критическое время функционирования указанных трубопроводов и магистральных теплотрасс в аварийной ситуации. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, производстве монтажных и ремонтных работ.

Значительная часть теплотрасс и магистральных трубопроводов прокладывается в грунте. Однако по ряду причин, таких как перегруженность подземными коммуникациями промышленных предприятий в зоне трассы, рельефных и технических условий, а иногда стоимостными показателями возникает целесообразность в их наружной прокладке – над поверхностью земли. Поэтому остро стоит вопрос о надежности работы трубопроводов в зимних условиях – в условиях низких температур. Для этого необходимо обеспечить их достаточную теплоизоляцию.

Основным теплоизолирующим материалом до недавнего времени являлась минеральная вата. В соответствии со СНиП [1] она является неплохим теплоизолятором. Однако в настоящее время отсутствует технология создания оболочек, обеспечивающих герметичность и защиту слоя минеральной ваты от механических повреждений и воздействий атмосферных факторов.

Это в большей степени проявляется на изгибах труб. В данном случае происходит деформация минеральной ваты (уплотнение на меньших радиусах и разрыв на больших), что существенно снижает ее изолирующие свойства. В результате в процессе эксплуатации через 1,5 – 2 года такая оболочка требует полной замены.

Поэтому для устранения указанных недостатков необходимо применять теплоизоляционные материалы доступные украинской теплоэнергетике уже сегодня. Таковыми являются трубы предварительно изолированные жестким пенополиуретаном с защитной внешней оболочкой из оцинкованной стали. В [2] приведен положительный опыт их эксплуатации в наружных тепломагистралях.

В работе [3] выполнено численное моделирование потерь тепла при транспортировке теплоносителя (воды) на значительные расстояния по трубам изолированным жестким пенополиуретаном. Показано, что применение данной изоляции минимизирует потери тепла.

Однако при эксплуатации в наружных условиях теплотрасс и магистральных трубопроводов важным является вопрос оценки их морозоустойчивости. Такая проблема возникает при временной остановке движения теплоносителя в трубах либо при эксплуатации магистральных трубопроводов в зимнее время. Эта задача для труб предварительно изолированных жестким пенополиуретаном в настоящее время не решена.

В данной работе приводится расчет интервалов простоя одностороннего трубопровода в зимнее время, так как в случае прекращения подачи воды необходимо знать время его промерзания. Поэтому основная задача исследований состоит в определении времени охлаждения воды до температуры кристаллизации и уменьшения его проходного сечения на 25 % за счет образования льда в системе. Эти критерии определены в соответствии со СНиП [1].

¹ПГТУ, ст. преп.

²ОАО «Транспрогресс», канд. техн. наук, инж.

³ПГТУ, д-р физ.-мат. наук, проф.

Время охлаждения жидкости трубопровода до температуры кристаллизации

Для расчета потерь тепла в единицу времени единицей длины теплоизолированной трубы применяется известное соотношение, применяемое при проектировании тепловых сетей [4 – 6]

$$q = \frac{T_T - T_{\text{в}}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_k}{d_n} + \frac{1}{\alpha\pi d_k}} \left[\frac{Bm}{m} \right] \quad (1)$$

где T_T – температура теплоносителя, $T_{\text{в}}$ – температура воздуха, λ – коэффициент теплопроводности материала теплоизоляции (пенополиуретана), d_k – наружный диаметр изоляционной конструкции, d_n – наружный диаметр изолируемого объекта, (теплоносителя); α – коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции. Первый член в знаменателе характеризует термическое сопротивление теплоизолирующего слоя, второй – сопротивление теплопередачи на внешней поверхности теплоизолированного слоя.

Эта формула широко используется во всех руководящих документах и позволяет вычислять потери тепла при заданной длине трубопровода и всех известных величинах, входящих в данное уравнение.

Поток тепла q через изоляционный слой за время dt приводит к охлаждению стальной трубы и жидкости от температуры T_T до температуры $T_T - dT$. При этом жидкость и стальная труба теряют количество теплоты

$$dQ = \left(\pi \frac{d_{cm}^2}{4} \rho_{\text{ж}} c_{\text{ж}} + \pi \frac{(d_{\text{вн}}^2 - d_{cm}^2)}{4} \rho_{cm} c_{cm} \right) dT, \quad (2)$$

где d_{cm} – внутренний диаметр стальной трубы, а $d_{\text{вн}}$ – внешний ее диаметр, равный внутреннему диаметру теплоизолирующего слоя, $\rho_{\text{ж}}$ и ρ_{cm} – плотности теплоносителя и стальной трубы, $c_{\text{ж}}$ и c_{cm} – удельные теплоемкости теплоносителя и стальной трубы. Тогда из условия $dQ = qdt$ можно получить дифференциальное уравнение, описывающее изменение во времени температуры жидкости до начала кристаллизации.

$$\left(\pi \frac{d_{cm}^2}{4} \rho_{\text{ж}} c_{\text{ж}} + \pi \frac{d_{\text{вн}}^2 - d_{cm}^2}{4} \rho_{cm} c_{cm} \right) dT = \frac{T_T - T_{\text{в}}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_k}{d_n} - \frac{1}{\alpha\pi d_k}} dt. \quad (3)$$

Из решения уравнения (3) можно найти время, в течение которого начальная температура теплоносителя T_T уменьшается до температуры кристаллизации $T_{кр}$

$$t = \left(\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_k}{d_n} - \frac{1}{\alpha\pi d_k} \right) \left(\pi \frac{d_{cm}^2}{4} \rho_{\text{ж}} c_{\text{ж}} + \pi \frac{d_{\text{вн}}^2 - d_{cm}^2}{4} \rho_{cm} c_{cm} \right) \ln \frac{T_{кр} - T_{\text{в}}}{T_T - T_{\text{в}}}. \quad (4)$$

При этом считается, что температура воздуха $T_{\text{в}}$ ниже температуры кристаллизации теплоносителя $T_{кр}$.

Время уменьшения проходного сечения трубопровода за счет кристаллизации части жидкости

В случае кристаллизации части жидкости эксплуатация трубопроводов допускается при уменьшении проходного сечения на 25 %. Поэтому в данном разделе решается задача по определению времени уменьшения проходного сечения до указанной величины за счет образования льда.

Для расчета потерь тепла трубопроводом в единицу времени единицей длины можно также воспользоваться соотношением (1). Однако в него необходимо вместо температуры теплоносителя T_T подставить температуру кристаллизации жидкости – температуру замерзания $T_{кр}$.

Поток тепла через теплоизолирующий слой за время dt приводит к увеличению сечения промерзания на величину dS . Количество теплоты, выделенное единицей длины теплоносителя при увеличении сечения льда на величину dS равно

$$dQ = dS \rho H, \quad (5)$$

где ρ – плотность льда, H – его удельная теплота плавления.

Поскольку $dQ = qdt$, можно получить дифференциальное уравнение, описывающее зависимость величины сечения образовавшегося льда от времени, которое будет иметь вид:

$$dS = \frac{T_{кр} - T_в}{\rho H \left(\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_k}{d_n} + \frac{1}{\alpha\pi d_k} \right)} dt. \quad (6)$$

Тогда время, за которое проходное сечение уменьшается на 25 % будет равно

$$t = \frac{\rho H \left(\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_k}{d_n} + \frac{1}{\alpha\pi d_k} \right)}{T_{кр} - T_в} 0,25S, \quad (7)$$

где S – сечение трубопровода.

Результаты расчетов

Соотношения (3) и (7) позволяют рассчитать время охлаждения теплоносителя до температуры кристаллизации и время, при котором сечение образовавшегося льда достигает 25 % сечения трубопровода. Сумма этих времен является критическим времени охлаждения трубопровода.

Ниже приводятся результаты расчетов в графическом виде.

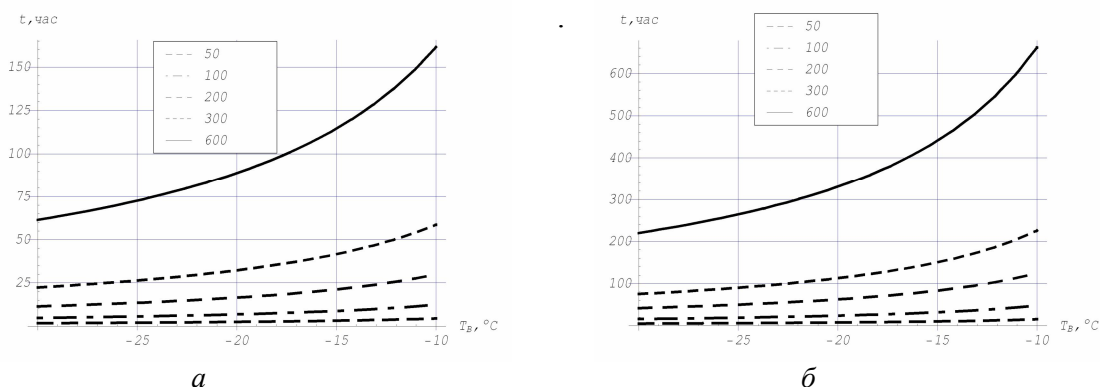


Рис. 1 – **а)** время охлаждения воды в трубопроводе при начальной температуре $T_T = 5^\circ\text{C}$ до температуры кристаллизации в зависимости от температуры воздуха для труб с внутренним диаметром 50, 100, 200, 300 и 600 мм.
б) время образования льда, перекрывающего 25 % проходного сечения в зависимости от температуры воздуха для труб с внутренним диаметром 50, 100, 200, 300 и 600 мм

На рис. 1а показаны зависимости времени охлаждения воды в трубопроводе до температуры кристаллизации от температуры воздуха $T_{\text{в}}$ для различных диаметров: 50, 100, 200, 300, 600 мм. Начальная температура воды при этом составляла $T_{\text{т}} = 5^{\circ}\text{C}$. Из представленных графиков следует, что с увеличением диаметра трубопровода для всех значений температуры воздуха время охлаждения воды до температуры кристаллизации растет. Например, для трубы диаметром 600 мм при температуре воздуха -10°C время кристаллизации превышает 150 часов, а для трубы диаметром 200 мм это время становится равным 30 часов.

На графиках рис. 1б представлены зависимости времени образования льда, перекрывающего 25 % проходного сечения от температуры воздуха для труб диаметром 50, 100, 200, 300 и 600 мм. Из данных графиков также следует, что с ростом диаметра трубы и температуры воздуха время, в течение которого сечение трубы уменьшится на 25 % за счет образования льда - растет. Так для трубы диаметром 600 мм это время превышает 600 часов, а для трубы диаметром 200 мм составляет 120 часов.

Выводы

1. На основании проведенных исследований построены физическая и математическая модели процессов остывания воды и образования льда в трубопроводе предварительно изолированном жестким пенополиуретаном и получены достаточно простые и удобные для практического применения расчетные формулы. Ошибка при использовании которых не превышает нескольких процентов.
2. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, производстве монтажных и ремонтных работ магистральных трубопроводов и теплотрасс наружного исполнения. Это позволит оценить критическое время функционирования указанных трубопроводов и магистральных теплотрасс в аварийной ситуации.
3. Предложенная модель расчета предполагает отсутствие течения жидкости по трубопроводу, что значительно сокращает время охлаждения теплоносителя. При учете течения жидкости указанные времена окажутся значительно большими.

Перечень ссылок

1. СНиП 2.04.М-88. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов / Госстрой России. – М. ЦИТП Госстроя СССР, 1998. – 28 с
2. Борисов Н.Г. Опыт применения труб, изолированных жестким пенополиуретаном, в г. Счастье Луганской области. / Н.Г. Борисов // Энергосбережение. – 2002. – № 6. – С. 6 – 8.
3. Коляда Г.Е. Эффективность передачи тепла на большие расстояния по магистральным теплотрассам. / Г.Е. Коляда, Ю.Е. Коляда, В.И. Федун // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2006. – Вип. № 16. – С. 197 – 200.
4. Кузнецов Г.Ф. Тепловая изоляция: Справочник строителя. 4-е издание переработанное и дополненное / Г.Ф. Кузнецов, В.П. Горбачов, В.И. Бельский. – М.: Стройиздат, 1985. – 421 с.
5. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеев. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
6. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей. – М.: Стройиздат, 1965. – 360 с.

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 15.03.2009