

АНАЛИЗ УБЫТКОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ ЗАТОПЛЕНИЯ

О.Н. Кривицкая, магистрант
В.Ю. Половников, кандидат технических наук
Томский политехнический университет, Россия

Высокий уровень тепловых потерь при транспортировке теплоносителя и отсутствие точной методики их определения [1, 2, 3] привели к возникновению проблемы достоверной и качественной оценки масштабов теплопотерь. Особый интерес вызывает расчет теплопотерь в трубопроводах, работающих в условиях затопления. Предложенная в [1] методика их оценки представляется довольно сложной.

В данной статье рассматривается методика инженерной оценки масштабов тепловых потерь в магистральных трубопроводах, работающих в условиях затопления.

Для вычисления линейных теплопотерь q_L используем простое аналитическое выражение [4]:

$$q_L = \frac{\tau - t_0}{R_{\text{и}} - R_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где τ — средняя температура теплоносителя; t_0 — средняя температура среды, окружающей трубопровод; $R_{\text{и}}$ и $R_{\text{п}}$ — термические сопротивления слоя тепловой изоляции и поверхности теплотрубопровода.

Термические сопротивления определяются из известных соотношений:

$$R_{\text{и}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{и}}} \ln(d_2/d_1);$$
$$R_{\text{п}} = \frac{1}{\pi\alpha d_2},$$

где d_1 и d_2 — наружный и внутренний диаметры изоляции; α — коэффициент теплоотдачи; $\lambda_{\text{и}}$ — теплопроводность изоляции.

Как отмечалось в [2], главный фактор интенсификации потерь тепловой энергии при затоплении теплотрубопроводов — резкое повышение теплопроводности изоляции $\lambda_{\text{и}}$ при насыщении ее влагой до значения $\lambda_{\text{в}}$. Учтем этот фактор с помощью эффективного коэффициента теплопроводности [5]:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{и}}\varphi_{\text{и}} + \lambda_{\text{в}}\varphi_{\text{в}},$$

где φ — объемная доля компоненты.

Проведем оценку теплопотерь трубопровода диаметром условного прохода 600 мм с тепловой изоляцией из стеклянной ваты толщиной 70 мм, работающего в условиях затопления, которое может быть полным или частичным. Как показано в [6], при анализе условий частичного погружения трубопровода в воду не возникает дополнительных проблем с оценкой теплопотерь из-за перетекания теплоты по угловой координате. Несмотря на кратную интенсификацию потерь тепловой энергии с увлажненной поверхности, перепад температур по окружной координате относительно невелик (существенно ниже аналогичного перепада по радиальной координате). Поэтому расчет потерь при частичном затоплении может проводиться с использованием одномерных моделей [6] с учетом площади поверхности изоляции, покрытой водой.

Примем среднюю температуру окружающей среды в канале $t_0 = 296,3 \text{ K}$ (в соответствии с [4]), а температуру теплоносителя $\tau = 373 \text{ K}$. Теплопроводности изоляции и воды имеют следующие значения: $\lambda_{\text{и}} = 0,059 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_{\text{в}} = 0,605 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Максимально возможная объемная доля влаги, обусловленная пористостью стеклянной ваты [7], имеют значение $\varphi_{\text{в}} = 0,905$.

Следует отметить [3], что все теплоизоляционные материалы обладают определенной сопротивляемостью влагопоглощению даже в условиях высоких перепадов давления. В реальности перепады давления по толщине слоя изоляции не превышают 10-15 Па. Поэтому процесс распространения влаги даже по структуре стеклянной ваты толщиной 70 мм происходит в течение некоторого промежутка времени. Его продолжительность определяется в основном проницаемостью теплоизоляции (другие факторы менее значимы). В этом случае процесс влагопоглощения может продолжаться несколько часов или даже десятки часов (для различных типов изоляции). Но расчет процесса проникновения влаги в пористую структуру теплоизоляционного материала весьма сложен. Поэтому в данной статье анализируется вариант полного насыщения влагой изоляции трубопровода, т. е. не рассматривается переходный период проникновения воды в поры теплоизоляционного материала. Учитывая, что на практике продолжительность этого периода, как правило, много меньше времени пребывания трубопровода в затопленном состоянии, можно с достоверной для практики точностью пренебречь переходным процессом и считать, что влага мгновенно заполнила все поры теплоизоляционного материала.

В реальных условиях затопление каналов теплотрасс водой может быть вызвано различными причинами. Возможны варианты движения внешней среды (воды) в канале или отсутствия такого движения. Но в любом случае интенсивность отвода теплоты с внешнего контура трубопровода можно достаточно достоверно оценить с помощью соответствующих эмпирических зависимостей, связывающих безразмерный коэффициент теплоотдачи с критериями вынужденной или естественной конвекции для рассматриваемого режима течения.

Средние коэффициенты теплоотдачи α можно определить по критериальным уравнениям [8]:

в режимах естественной конвекции

$$10^4 < Gr \cdot Pr < 10^9, \quad Nu = 0,47(Gr \cdot Pr)^{1/4};$$

$$Gr \cdot Pr > 10^9, \quad Nu = 0,1(Gr \cdot Pr)^{1/3};$$

в режимах вынужденной конвекции

$$5 \cdot 10^3 < Re < 5 \cdot 10^4, \quad Nu = 0,148 \cdot Re^{0,633};$$

$$5 \cdot 10^4 < Re < 5 \cdot 10^5, \quad Nu = 0,43 + 0,0208 \cdot Re^{0,814} \cdot Pr^{0,31},$$

где Nu , Gr , Pr , Re — числа Нуссельта, Грасгофа, Прандтля и Рейнольдса.

Оценки показывают [3], что термическое сопротивление слоя изоляции значительно больше термического сопротивления поверхности теплотрубопровода ($R_{\text{и}} \gg R_{\text{п}}$) в условиях свободной конвекции и в условиях вынужденной конвекции при относительно малых скоростях движения (до 1 м/с) окружающей трубопровод среды. Поэтому термическим сопротивлением $R_{\text{п}}$ можно пренебречь, а это в свою очередь приводит к упрощению выражения (1), следовательно снимается необходимость определения коэффициента теплоотдачи α , входящего в состав выражения для расчета термического сопротивления поверхности теплотрубопровода $R_{\text{п}}$. Выражение (1) примет следующий вид:

$$q_L = \frac{\tau - t_0}{\frac{1}{2\pi\lambda_{и}} \ln(d_2/d_1)}.$$

В (табл. 1) приведены результаты расчетов [3] по рассмотренной методике, нормативные значения линейных тепловых потерь согласно СНиП 2.04.14-88 [9], а также данные численного анализа, полученные при использовании математической модели [2] с применением граничных условий третьего рода. Они свидетельствуют о достаточной для инженерных расчетов точности получаемых результатов (отклонение от численного расчета – менее 4%). Следовательно, можно сделать вывод [3] о применимости предлагаемой методики для оценки теплотерь в теплотрубопроводах, работающих в условиях затопления.

Таблица 1. Результаты расчетов [2]

Вариант расчета	q_L , Вт/м	Отклонение от СНиП, %	Отклонение от численного расчета, %
СНиП 2.04.14-88 [9]	122,0	–	90,5
Численный расчет	1280,0	90,5	–
Аналитический расчет	1328,4	90,8	3,3

Возвращаясь к анализу погрешности, вносимой в результаты расчетов q_L неучетом переходного режима заполнения влагой пористой структуры изоляции, в [3] отмечено, что осушение пор также не происходит мгновенно. Даже после откачивания воды из каналов теплотрасс изоляция осушится в течение некоторого времени. Поэтому погрешность второго переходного периода (из состояния насыщенной влагой изоляции в нормальное) скорее всего полностью или в значительной степени компенсирует погрешность периода увлажнения изоляции до предельно возможного насыщения.

Оценим материальный ущерб $У$, руб., вызванный затоплением канала теплосети для теплотрубопровода длиной $L = 200$ м на срок $T = 1$ сут. Расчет проводится с использованием следующего выражения:

$$У = Ц \cdot Q,$$

где $Ц = 1212,41$ руб/Гкал – типичный тариф на тепловую энергию для населения городов Российской Федерации в 2014 г.

Тепловые потери Q , Гкал, определяются из выражения:

где – нормативное значение линейных теплотерь [9] теплотрубопровода диаметром условного прохода 600 мм; 4,187 – коэффициент пропорциональности (1 кал = 4,187 Дж).

Отсюда

$$У = 1212,41 \cdot (1328,4 - 122) \cdot 86400 \cdot 200 \cdot 4,187 \cdot 10^{-9} = 105824,82 \text{ руб.}$$

Таким образом, материальный ущерб за 1 сут. затопления теплотрубопровода составит 106 тыс.руб., за 10 дней – 1060 тыс.руб., а за 1 мес. – более 3 млн.руб.

На основании вышеуказанного, можно утверждать, что защита каналов теплотрубопроводов от затопления водой является, возможно, одной из наиболее эффективных мер снижения потерь тепловой энергии при ее доставке потребителю.

Список литературы:

1. Шишкин А. В. Определение потерь тепла в сетях централизованного теплоснабжения // Теплоэнергетика. – 2003. – № 9. – С. 68 – 74.
2. Кузнецов Г. В., Половников В. Ю. Тепловые потери магистральных трубопроводов в условиях частичного затопления. – В кн.: Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2005 (Тр. конф.). М.: Изд-во ВИМ, 2005, т. 1
3. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Оценка масштабов тепловых потерь в магистральных теплотрубопроводах в условиях затопления // Промышленная энергетика. – 2006. – №8. – С. 32 – 34.
4. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Изд-во МЭИ, 1999.
6. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: Физматгиз, 1962.
7. Половников В.Ю. Моделирование тепловых потерь в системах магистрального теплоснабжения в условиях затопления трубопровода. – В кн.: Энергетика: экология, надежность, безопасность (Материалы 11 – й Всеросс. науч. – техн. конф) – Томск: Изд – во ТПУ, 2005.
8. Васильев Л.Л., Танаева С.А. Теплофизические свойства пористых материалов. – Минск: Наука и техника, 1971.
9. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. – М.: Атомиздат, 1979.
10. СНиП 2.04.14-88. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. – М.: ЦИТС Госстроя СССР, 1988.