

К РАСЧЕТУ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ДВУХТРУБНЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ ПРИ БЕСКАНАЛЬНОЙ ПРОКЛАДКЕ

Евгений Девяткин, Игорь Гвоздев, Андрей Илларионов

Расчет тепловых потерь в трубопроводах ГВС и отопления является необходимым элементом при проектировании тепловых сетей. В связи с этим представляет интерес выяснить, насколько сильно отличаются результаты расчетов по российской нормативной документации (НД) [1] и европейским стандартам [2] на проектирование трубопроводов из предизолированных труб. Ниже производится анализ уравнений, используемых в [1] и [2] для двухтрубных тепловых сетей, состоящих из двух одинаковых теплоизолированных труб, расположенных на одном и том же расстоянии от поверхности земли, а также в качестве примера даются сравнительные таблицы величин термических сопротивлений и тепловых потерь для некоторых типов труб ИЗОПРОФЛЕКС при среднегодовой температуре теплоносителя 65°C в подающем трубопроводе и 50°C – в обратном.

Рассмотрим вначале уравнения для расчета транспортных потерь тепла, используемые в EN 13941:2009. Линейные плотности теплового потока от подающего Φ_f и обратного Φ_r трубопроводов равны

$$\Phi_f = \frac{(R_s + R_i)(T_f - T_s) - R_h(T_f - T_s)}{(R_s + R_i)^2 - R_h^2} \quad (1)$$

$$\Phi_r = \frac{(R_s + R_i)(T_r - T_s) - R_h(T_r - T_s)}{(R_s + R_i)^2 - R_h^2} \quad (2)$$

где T_f , T_r – температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, T_s – температура грунта вдали от трубопроводов на глубине заложения Z (за глубину заложения принимается расстояние от поверхности грунта до оси трубопровода). Линейное термическое сопротивление (термическое сопротивление в расчете на единицу длины, м·град/Вт) теплоизоляции R_i , грунта R_s и сопротивление R_h , обусловленное тепловым взаимодействием трубопроводов, определяются следующими уравнениями

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{D_{PUR}}{d_0} \quad (3)$$

$$R_s = \frac{1}{2\pi\lambda_s} \ln \frac{4Z_c}{D_c} \quad (4)$$

$$R_h = \frac{1}{4\pi\lambda_s} \ln \left[1 + \left(\frac{2Z_c}{C} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Здесь D_c , D_{PUR} , d_0 – наружные диаметры, соответственно, защитной оболочки, теплоизолирующего слоя и напорной трубы, λ_s , λ_i – коэффициенты теплопроводности грунта и материала теплоизоляции, C – расстояние между осями труб. Скорректированная (в отечественной литературе ее называют эквивалентной [4] или приведенной [5]) величина глубины заложения равна

$$Z_c = Z + R_0\lambda_s \quad (6)$$

где R_0 – термическое сопротивление теплоотдаче от поверхности грунта в окружающий воздух. Второй член в правой части уравнения (6) равен толщине фиктивного плоского слоя грунта (т.н. дополнительной стенки [6]), сопротивлением которого равно R_0 . Термическим сопротивлением теплоотдаче от теплоносителя к внутренней поверхности напорной трубы, как правило, пренебрегают [1, 4]. Если напорная труба изготовлена из металла, то можно также пренебречь и ее термическим сопротивлением; теплопроводность металлов на 3–4 порядка превышает теплопроводность пенополиуретана (ППУ) и пенополиэтилена (ППЭ), обычно используемых для теплоизоляции труб.

Для суммарных тепловых потерь имеем

$$\Phi_{tot} = \Phi_f + \Phi_r = \frac{T_f + T_r - 2T_s}{R_s + R_i + R_h} \quad (7)$$

В предельном случае бесконечно удаленных труб $C \rightarrow \infty$ имеем $R_h \rightarrow 0$ (тепловое взаимодействие отсутствует), и уравнения (1) и (2) приобретают вид уравнения, определяющего линейную плотность теплового потока от однетрубного трубопровода

$$\Phi_k^0 = \frac{T_k - T_r}{R_s + R_r}, \quad (k = f, r) \quad (8)$$

Суммарные тепловые потери от двух невзаимодействующих трубопроводов равны

$$\Phi_{tot}^0 = \Phi_f^0 + \Phi_r^0 = \frac{T_f + T_r - 2T_s}{R_s + R_l}$$

Эти потери больше, чем потери в трубопроводах двухтрубных тепловых сетей с тепловым взаимодействием (см. уравнение (7))

$$\frac{\Phi_{tot}^0 - \Phi_{tot}}{\Phi_{tot}} = \frac{R_h}{R_s + R_l} > 0 \quad (R_h, R_s, R_l > 0)$$

Рассмотрим теперь уравнения, используемые для расчета тепловых потерь в СП 41-103-2000. В принятых выше обозначениях, для двухтрубных тепловых сетей, состоящих из двух одинаковых теплоизолированных труб, приведенные в [1] выражения для расчета линейного термического сопротивления грунта R_s^L и сопротивления R_h^L , обусловленного тепловым взаимодействием труб, имеют вид

$$R_s^L = \frac{1}{2\pi\lambda_s} \ln \left[\frac{2Z}{D_c} + \sqrt{\left(\frac{2Z}{D_c}\right)^2 - 1} \right], \quad (9)$$

$$R_h^L = \frac{1}{2\pi\lambda_s} \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2Z}{C}\right)^2} \quad (10)$$

Для расчета термического сопротивления теплоизоляции имеем то же самое уравнение (3).

Уравнение (9) следует из точного решения плоской стационарной задачи теплопроводности для полуплоскости с круговым отверстием, на границе которого поддерживается постоянная температура, при этом температура на границе полуплоскости поддерживается равной однородной температуре на бесконечности. Это уравнение (в отечественной литературе его обычно называют формулой Форхгеймера) используют также для описания линейного термического сопротивления грунта в случае бесканальной прокладки однетрубного теплоизолированного трубопровода [1, 3–5, 7].

Для выражения в квадратных скобках уравнения (9) с учетом двух первых членов разложения в ряд имеем

$$\frac{2Z}{D_c} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{D_c}{2Z}\right)^2} \right] \approx \frac{4Z}{D_c} \cdot \left[1 - \left(\frac{D_c}{4Z}\right)^2 \right] \quad \left(\frac{D_c}{2Z} < 1\right)$$

Обычно $(D_c/4Z)^2 \ll 1$, и для расчета R_s^L можно использовать следующее уравнение:

$$R_s^L = \frac{1}{2\pi\lambda_s} \ln \frac{4Z}{D_c} \quad (11)$$

Отметим, что точность расчета тепловых потерь однетрубного трубопровода, связанная с использованием уравнения (9), составляет менее 1%, в то время как при использовании уравнения (11) – менее 0,5% [3].

Видно, что уравнения для расчета R_s и R_h , приведенные в EN 13941:2009 (уравнения (4), (5)), отличаются от аналогичных, приведенных в СП 41-103-2000 (уравнения (9), (10)). В частности, в последних используется глубина заложения Z , а в первых – ее скорректированная величина Z_c .

Важным отличием СП 41-103-2000 от EN 13941:2009 является то, что в нем тепловые потери от подающего q_f^L и обратного q_r^L трубопроводов рассчитываются с учетом коэффициента дополнительных потерь K , связанного с использованием неподвижных опор:

$$\begin{aligned} q_f^L &= K \cdot \Phi_f^L, \quad q_r^L = K \cdot \Phi_r^L \\ q_{tot}^L &= K \cdot \Phi_{tot}^L = K \cdot (\Phi_f^L + \Phi_r^L) \end{aligned} \quad (12)$$

Для бесканальной прокладки этот коэффициент принимают равным $K = 1,15$ (см. таблицу 1 в СП 41-103-2000; для трубопроводов из полимерных труб, не требующих установки неподвижных опор, введение такого коэффициента не обосновано). Для двух одинаковых трубопроводов величины Φ_f^L , Φ_r^L , Φ_{tot}^L (тепловые потери без учета дополнительных факторов) описываются уравнениями (1), (2), (7), в которых лишь нужно заменить R_s и R_h соответственно на R_s^L и R_h^L .

Еще одно различие рассматриваемых методик состоит в выборе расчетного значения T_s при сравнительно небольших глубинах заложения. В СП 41-103-2000 величина T_s определена как температура наружной (окружающей) среды, и при заглублении верха теплоизоляционной конструкции трубопровода более 0,7 м эту температуру принимают равной среднегодовой температуре грунта на глубине заложения, в противном случае – средней за время работы теплосети в течение года температуре наружного воздуха [1, 10]. В EN 13941:2009, как уже отмечалось выше, T_s представляет собой температуру грунта вдали от трубопроводов на глубине заложения. Согласно [1, 10], за температуру транспортируемой среды принимают среднегодовую температуру теплоносителя.

В общем случае при расчете тепловых потерь многослойных труб необходимо учитывать термические сопротивления всех слоев. Линейные термические

сопротивления напорной трубы R_f и защитной оболочки R_c равны

$$R_f = \frac{1}{2\pi\lambda_f} \ln \frac{d_0}{d_0 - 2e} \quad (13)$$

$$R_c = \frac{1}{2\pi\lambda_c} \ln \frac{D_c}{D_{f\text{вн}}} \quad (14)$$

где λ_f, λ_c – соответственно коэффициенты теплопроводности материалов напорной трубы и оболочки, e – толщина стенки напорной трубы. С учетом этого, расчет тепловых потерь производится из уравнений (1), (2), (7), в которых нужно заменить R_i на $R = R_i + R_f + R_c$ (полное линейное термическое сопротивление теплоизолированной трубы). Очевидно, что имеет смысл учитывать термические сопротивления только тех слоев, вклад которых в термическое сопротивление всей системы (трубопроводов и грунта) превышает ошибку, связанную с использованием для расчетов рассмотренных выше приближенных решений из СП 41-103-2000 и EN 13941:2009. О величинах термических сопротивлений слоев некоторых типов труб ИЗОПРОФЛЕКС можно судить из приведенных ниже в таблице 1 данных. Согласно [3], точность расчета тепловых потерь двухтрубного трубопровода, связанная с использованием уравнений (3), (9), (10), составляет менее 5%, а при использовании уравнения (11) вместо уравнения (9) – менее 3%; более сложные уравнения, приведенные в [3], позволяют производить расчеты с погрешностью менее 0,5%.

Для численных расчетов возьмем следующие значения параметров [1, 2, 8–10]: $T_f = 65^\circ\text{C}$, $T_r = 50^\circ\text{C}$, $T_s = 10^\circ\text{C}$, $\lambda_{PUR} = 0,032$ Вт/(м·град) (для теплоизоляции из ППУ), $\lambda_{PEX} = 0,38$ Вт/(м·град) (для напорной трубы из сшитого ПЭ), $\lambda_{PE} = 0,43$ Вт/(м·град) (для защитной оболочки из ПЭ низкой плотности), $\lambda_s = 1,2$ Вт/(м·град), $C - D_c = 0,1$ м (расстояние между оболочками труб), $R_0 = 0,0685$ м²·град/Вт, $Z = 0,85$ м.

Расчеты, выполненные, в качестве примера, для некоторых типов труб ИЗОПРОФЛЕКС, показывают, что при указанных выше параметрах суммарный вклад напорной полиэтиленовой трубы и оболочки в полное термическое сопротивление трубы составляет 2,5% и 5,6%, соответственно, для типов 25/63 и 160/225 (таблица 1), а превышения величин термических сопротивлений R_s, R_n над величинами R_s^L, R_n^L для типа 160/225 достигают 2,7% и 4,4%.

Для сравнения в таблице 2 для тех же самых типов труб представлены величины тепловых потерь, рассчитанные по формулам, приведенным в [1] и [2] с учетом термических сопротивлений напорной трубы и оболочки (расчет выполнен с точностью до 0,1 Вт/м; в [10] нормы плотности теплового потока даны с точностью до 1 Вт/м).

Из этой таблицы видно, что отличия значений $\Phi_f, \Phi_r, \Phi_{tot}$ от соответствующих им значений $\Phi_f^L, \Phi_r^L, \Phi_{tot}^L$ об-

условленные различием формул, используемых для расчета термических сопротивлений в СП 41-103-2000 и EN 13941:2009, незначительны. Увеличение же примерно на 16% суммарных тепловых потерь при расчете по НД [1] (столбец “ q_{tot}^L ”) по сравнению с [2] (столбец “ Φ_{tot} ”), практически полностью обусловлено введением коэффициента дополнительных потерь K в [1]. Тепловые потери, рассчитанные по [1], будут еще больше из-за того, что в соответствии с этим НД для расчетов необходимо брать значительно больший, чем используемый здесь, коэффициент теплопроводности для теплоизоляционных изделий из ППУ (см. таблицу из Приложения А в [1]).

Термическое сопротивление грунта уменьшается при увеличении его теплопроводности и уменьшении глубины заложения трубопровода. Например, при $Z = 0,6$ м и $\lambda_s = 2,56$ Вт/(м·град) (влажный суглинок плотностью $2 \cdot 10^3$ кг/м³ и с весовым влагосодержанием 10%) [1] имеем $R_s, R_s^L \approx 0,2$ м·град/Вт, а величины R_n, R_n^L не очень сильно отличаются от величины суммарного термического сопротивления напорной трубы и защитной оболочки, рассмотренных выше типов труб ИЗОПРОФЛЕКС ($R_f + R_c \approx 0,1$ м·град/Вт).

В [8] и [9] отмечено, что величина коэффициента теплопроводности ППУ теплоизоляции труб ИЗОПРОФЛЕКС не превышает 0,032 Вт/(м·град) при средней температуре 50°C . Проведенные в НТЦ «Пластик» исследования зависимости коэффициента теплопроводности от температуры показали, что при температуре около 50°C его величина не превышает 0,031 Вт/(м·град). Коэффициент теплопроводности образцов ППУ измерялся портативным анализатором ISOMET 2114 компании Applied Precision Ltd., предназначенным для исследования теплофизических свойств пористых теплоизоляционных материалов в диапазоне температур от -20°C до 70°C ; диапазон измерений теплопроводности с используемым зондом IPN 1100 составляет 0,015–0,05 Вт/(м·град). Измерения начались после продолжительного прогрева образцов (не менее 2 ч.) при фиксированных температурах, когда внутри них устанавливалась температурная стабильность не хуже 0,000399 град/с; время проведения четырех последовательных измерений составляет около 2,5 ч.

Мы благодарны Питеру Вэллентену из Лундского университета (Швеция), любезно предоставившему нам электронную версию своего отчета о тепловых потерях в трубопроводах при их бесканальной прокладке.

Литература

- СП 41-103-2000 «Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов».
- EN 13941:2009 (E) “Design and installation of preinsulated bonded pipe systems for district heating”.

3. Wallentén P. Steady-State Heat Loss from Insulated Pipes, Report TVBH-3017, Dept. of Building Phys., Lund Inst. of Technol., Sweden, 1991.

4. Ионин А.А., Хлыбов Б.М., Братенков В.Н., Терлецкая Е.Н. Теплоснабжение, М.: Стройиздат, 1982.

5. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Изд. МЭИ, 2001.

6. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979.

7. Козин В.Е., Левина Т.А., Марков А.П. и др. Теплоснаб-

жение. М.: Высшая школа, 1980.

8. «ИЗОПРОФЛЕКС» Техническое описание. Гибкие предизолированные трубы для ГВС и сетей отопления. Группа ПОЛИМЕРТЕПЛО, 2007.

9. ТУ 2248-021-40270293-2005 «Трубы ИЗОПРОФЛЕКС и ИЗОПРОФЛЕКС-А из сшитого полиэтилена с теплоизоляцией из пенополиуретана в гофрированной полиэтиленовой оболочке».

10. СНиП 41-03-2003 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов».

Таблица 1. Линейные термические сопротивления слоев некоторых типов труб ИЗОПРОФЛЕКС и грунта

| Тип трубы ИЗОПРОФЛЕКС, однотрубная | Линейное термическое сопротивление, $\left[\frac{\text{м}\cdot\text{град}}{\text{Вт}} \right]$ | | | | | | | |
|--|---|-------|-------|------|-------|-------|---------|---------|
| | R_f | R_i | R_c | R | R_s | R_h | R_s^L | R_h^L |
| 25/63 | 4,27 | 0,09 | 0,02 | 4,38 | 0,54 | 0,32 | 0,53 | 0,31 |
| 32/63 | 3,04 | 0,08 | 0,02 | 3,15 | 0,54 | 0,32 | 0,53 | 0,31 |
| 40/75 | 3,06 | 0,09 | 0,02 | 3,16 | 0,51 | 0,31 | 0,50 | 0,30 |
| 50/90 | 2,87 | 0,09 | 0,02 | 2,97 | 0,49 | 0,30 | 0,48 | 0,29 |
| 63/110 | 2,73 | 0,09 | 0,02 | 2,83 | 0,46 | 0,29 | 0,45 | 0,28 |
| 75/125 | 2,48 | 0,08 | 0,02 | 2,58 | 0,45 | 0,28 | 0,43 | 0,27 |
| 90/145 | 2,34 | 0,08 | 0,01 | 2,44 | 0,43 | 0,27 | 0,41 | 0,26 |
| 110/160 | 1,79 | 0,08 | 0,01 | 1,88 | 0,41 | 0,26 | 0,40 | 0,25 |
| 140/200 | 1,58 | 0,08 | 0,01 | 1,68 | 0,39 | 0,24 | 0,38 | 0,23 |
| 160/225 | 1,53 | 0,08 | 0,01 | 1,62 | 0,37 | 0,23 | 0,36 | 0,22 |

Таблица 2. Тепловые потери двухтрубных сетей при бесканальной прокладке

| Тип трубы ИЗОПРОФЛЕКС, однотрубная | Тепловые потери, $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}} \right]$ | | | | | | |
|--|--|----------|--------|------------|------------|----------------|-------------|
| | Φ_f | Φ_r | Φ | Φ_f^L | Φ_r^L | Φ_{tot}^L | q_{tot}^L |
| 25/63 | 10,7 | 7,4 | 18,1 | 10,7 | 7,5 | 18,2 | 20,9 |
| 32/63 | 14,1 | 9,6 | 23,7 | 14,1 | 9,7 | 23,8 | 27,4 |
| 40/75 | 14,1 | 9,7 | 23,8 | 14,2 | 9,8 | 24,0 | 27,6 |
| 50/90 | 15,0 | 10,3 | 25,3 | 15,1 | 10,3 | 25,4 | 29,2 |
| 63/110 | 15,8 | 10,8 | 26,6 | 15,9 | 10,9 | 26,7 | 30,7 |
| 75/125 | 17,1 | 11,6 | 28,7 | 17,2 | 11,7 | 29,0 | 33,3 |
| 90/145 | 18,1 | 12,3 | 30,4 | 18,2 | 12,4 | 30,6 | 35,2 |
| 110/160 | 22,3 | 14,9 | 37,1 | 22,4 | 15,1 | 37,5 | 43,1 |
| 140/200 | 24,7 | 16,4 | 41,1 | 24,9 | 16,7 | 41,5 | 47,8 |
| 160/225 | 25,6 | 17,1 | 42,6 | 25,8 | 17,3 | 43,1 | 49,6 |