

К ИЗМЕРЕНИЮ ЛИНЕЙНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГИБКИХ ПРЕДИЗОЛИРОВАННЫХ ТРУБ

Евгений Девяткин, Игорь Гвоздев, Дмитрий Гвоздев

Необходимость представления данных, характеризующих теплоизолирующие свойства гибких предизолированных труб, предписана стандартом EN 15632-1:2009 (E) [1] и ТУ 2248-001-48532278-2013 [2]. Согласно стандарту EN ISO 8497:1996 [3], измерения линейного термического сопротивления проводят в стационарном тепловом режиме обычно на относительно небольших образцах труб, что требует минимизации или учета теплового потока в осевом направлении. Для достаточно длинных образцов вкладом теплового потока через их торцы в полные тепловые потери можно пренебречь. Более простой метод расчета полных тепловых потерь основан на измерении средней скорости (расхода) теплоносителя в длинной трубе и его температур на входе и на выходе из нее. Ниже приведен выполненный на основе результатов таких измерений расчет полных линейных термических сопротивлений теплопередачи и теплопроводности, а также коэффициента теплопроводности теплоизоляции из пенополиуретана (ППУ) для находящейся в закрытом помещении свернутой в бухту с

Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки



разнесенными витками трубы ИЗОПРОФЛЕКС. В [4, 5] описан метод измерения температурной зависимости коэффициента теплопроводности с использованием бухты диаметром 1,8 м предизолированной трубы длиной 18 м, которая кондиционировалась в водяном термостате при температуре около 17°C. Измерения проводились в нестационарном тепловом режиме, и одно измерение занимало около 10 часов.

Общий вид используемой нами экспериментальной установки представлен на рис. 1. Установка включает в себя замкнутый контур с циркулирующей в нем водой, состоящий из находящегося в термокамере участка трубы без теплоизоляции (нагревателя) и участка теплоизолированной трубы, расположенной на открытом воздухе в помещении. Искусственная циркуляция воды осуществлялась насосом Grundfos UP 20-30, ее объемный расход измерялся ротаметром KROHNE VA 40, а температура – погруженными в воду на концах теплоизолированной трубы термомпарами типа К (хромель-алюмель) М8. В опытах использовалась предизолированная труба ИЗОПРОФЛЕКС 25/63 длиной 20 м, свернутая в виде спирали диаметром 1,6 м; расстояние между поверхностями защитных оболочек соседних витков равнялось 0,1 м. Температура окружающего воздуха измерялась двумя термометрами, расположенными на уровне нижнего и верхнего витков спирали.

Из рассмотрения баланса энергии в находящемся на воздухе трубопроводе может быть получено следующее уравнение для расчета температуры теплоносителя на выходе из него t_1 (см., например, [6]):

$$t_1 = t_{air} + (t_0 - t_{air}) \cdot \exp\left(-\frac{l}{g\rho CR}\right) \quad (1)$$

где t_0 – температура теплоносителя на входе в трубопровод, t_{air} – температура окружающего воздуха, R – полное линейное термическое сопротивление теплопередачи (величина, обратная коэффициенту теплопередачи), g – объемный расход теплоносителя, ρ и C – соответственно, его плотность и теплоемкость. При выводе этого уравнения предполагалось, что величины R , ρ , C не зависят от температуры.

В представляющем практический интерес случае $l/(g\rho CR) \ll 1$ распределение температуры теплоноси-

теля вдоль трубопровода можно считать линейным и падение температуры в нем Δt малым:

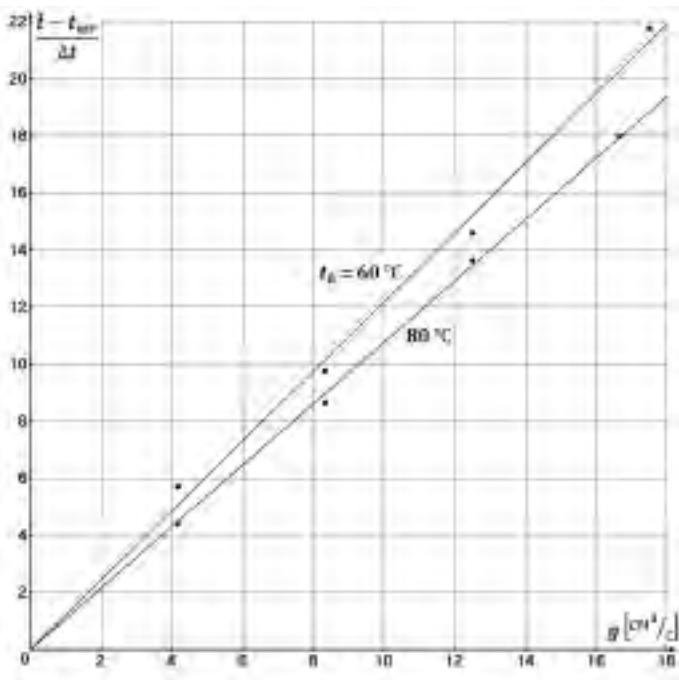
$$\Delta t = t_0 - t_l \approx (t_0 - t_{air}) \frac{l}{g\rho CR} \ll t_{air}$$

В этом случае из уравнения (1) следует приближенное уравнение

$$\frac{\bar{t} - t_{air}}{\Delta t} = \frac{\rho CR}{l} g \quad \left(\bar{t} = \frac{t_0 + t_l}{2} \right) \quad (2)$$

Таким образом, экспериментальные данные, представленные в координатах g и $(\bar{t} - t_{air})/\Delta t$, вне малой окрестности начала координат должны описываться линейной зависимостью (2). Эта зависимость может быть также получена из приравнивания следующих двух выражений для величины тепловой энергии, теряемой в трубопроводе за одну секунду (полные тепловые потери) – $g\rho C\Delta t$ и $(\bar{t} - t_{air})l/R$, причем последнее выражение справедливо при линейном распределении температуры теплоносителя вдоль трубопровода.

Рис. 2. Результаты измерений для двух температурных режимов термокамеры $t_n = 60^\circ\text{C}$ и 80°C



Результаты измерений и расчетов, выполненных для двух температурных режимов работы термокамеры $t_n = 60^\circ\text{C}$ и 80°C при четырех значениях расхода теплоносителя, представлены на рис. 2. Коэффициент корреляции для полученных прямых (их тангенс угла наклона a вычислялся методом наименьших квадратов), равен 0,9993 для серии измерений при $t_n = 80^\circ\text{C}$ и 0,996 для $t_n = 60^\circ\text{C}$. Полное линейное термическое сопротивление теплопередачи рассчитывается по формуле

$$R = \frac{al}{\rho C} \quad (3)$$

Сделанное выше предположение о независимости величин ρ и C от температуры для описанных здесь опытов обосновано, так как при максимальном наблюдавшемся в них падении температуры воды (теплоносителя) $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ соответствующее уменьшение ее объемной теплоемкости ρC составляет всего 0,4% (данные по температурным зависимостям плотности и теплоемкости воды см., например, в [7]). Результаты расчетов R при $l = 20$ м и $\rho C = 4,1 \cdot 10^6$ Дж/(м³ · °C) представлены в таблице.

Рассчитаем теперь полное линейное термическое сопротивление теплопроводности предизолированной трубы R_{pipe} и среднее значение коэффициента теплопроводности теплоизоляции в ней, полагая, что величина R известна. При проведении тепловых расчетов трубопроводов обычно пренебрегают термическим сопротивлением теплоотдаче от теплоносителя к внутренней поверхности напорной трубы [8, 9]. Тогда, с учетом термического сопротивления теплоизоляции R_i , напорной трубы R_r , защитной оболочки R_c и сопротивления теплоотдаче с внешней поверхности оболочки R_e , имеем

$$R = R_{pipe} + R_e, \quad R_{pipe} = R_i + R_r + R_c \quad (4)$$

Указанные термические сопротивления равны [8, 9]

$$\begin{aligned} R_i &= \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{D_{PUR}}{d_0}, & R_r &= \frac{1}{2\pi\lambda_r} \ln \frac{d_2}{d_1} \\ R_c &= \frac{1}{2\pi\lambda_c} \ln \frac{D_c}{D_{PUR}}, & R_e &= \frac{1}{2\pi r_c \alpha_c} \end{aligned} \quad (5)$$

где D_c, D_{PUR}, d_0 – наружные диаметры, соответственно, защитной оболочки, теплоизолирующего слоя и напорной трубы, e – толщина стенки напорной трубы, $\lambda_i, \lambda_r, \lambda_c$ – коэффициенты теплопроводности материалов теплоизоляции, напорной трубы и оболочки, α_c – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности оболочки. В отличие от небольших продольных градиентов и изменений температуры в трубопроводах в стационарном режиме, радиальные градиенты и изменения велики, что, вообще говоря, требует учета зависимости величины коэффициента теплопроводности от температуры при расчете термических сопротивлений слоев предизолированных труб. Подавляющий вклад в полное термическое сопротивление труб с теплоизоляцией из пенистых полимеров вносит теплоизолирующий слой ($R_i \gg R_{r,c}$, для трубы ИЗОПРОФЛЕКС 25/63 он составляет около 98%), и в первом приближении можно считать, что практически все падение температуры в трубе происходит в этом слое. Поэтому под λ_i здесь и ниже следует подразумевать усредненную в соответствующем температурном диапазоне величину.

Из уравнений (4) и первого из уравнений (5) следует

$$\lambda_i = \frac{\ln \frac{D_{PUR}}{d_0}}{2\pi(R_{pipe} - R_f - R_c)} \quad (R_{pipe} = R - R_c) \quad (6)$$

Размеры трубы ИЗОПРОФЛЕКС используемого типа 25/63 равны $d_0 = 25$ мм, $e = 2,3$ мм, средние значения внешних диаметров теплоизоляции и защитной оболочки – $D_{PUR} = 59$ мм, $D_c = 63$ мм [10, 11]. Для численных расчетов возьмем следующие значения коэффициентов: $\lambda_f = 0,38$ Вт/(м · °С) для напорной трубы из сшитого полиэтилена, $\lambda_c = 0,43$ Вт/(м · °С) для защитной оболочки из полиэтилена низкой плотности [11], $\alpha_e = 10$ Вт/(м² · °С) для горизонтального трубопровода в закрытом помещении с высоким коэффициентом излучения оболочки [9]. Величины термических сопротивлений, рассчитанные по формулам (5), равны $R_f + R_c = 0,11$ м · °С/Вт, $R_e = 0,51$ м · °С/Вт, а соответствующие значения R_{pipe} и λ_i , вычисленные из уравнений (6), даны в таблице.

Представленные в таблице значения λ_i близки к соответствующим средним значениям коэффициента теплопроводности, определенным ранее из результатов измерений температурных зависимостей теплопроводности ППУ с помощью прибора IZOMET 2114 с измерительным зондом IPN 1100; при средней температуре теплоизолирующего слоя $\tilde{t}_i = 40$ °С отличие от среднего для исследованных образцов ППУ значения составляет около 7%, а при $\tilde{t}_i = 46$ °С практически совпадает с ним. В таблице также даны оценки абсолютных погрешностей косвенных измерений коэффициента теплопроводности ППУ $\Delta\lambda_i$ при доверительной вероятности 0,95.

Таким образом, близость определенных здесь значений коэффициента теплопроводности ППУ к полученным ранее при помощи прибора IZOMET 2114 показывает возможность измерения термического сопротивления гибких предизолированных труб в ста-

ционарном тепловом режиме на расположенных в закрытом помещении длинных свернутых в бухту образцах.

Литература

1. EN 15632-1:2009 (E) District heating pipes – Pre-insulated flexible pipe systems – Part 1: Classification, general requirements and test methods.
2. ТУ 2248-001-48532278-2013 Трубы «ИЗОПРОФЛЕКС-115А» с теплоизоляцией из пенополиуретана в гофрированной полиэтиленовой оболочке.
3. EN ISO 8497:1996 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal transmission properties of thermal insulation for circular pipes.
4. Reidhav C., Claesson J. A transient method to determine temperature-dependent thermal conductivity of polyurethane foam in district heating pipes. The 8th Nordic symp. on building physics, Copenhagen, Denmark, 2008.
5. Reidhav C., Claesson J. Transient thermal conductivity of flexible district heating twin pipes. The 12th Int. symp. on district heating and cooling, Tallinn, Estonia, 2010.
6. Копко В.М. Теплоизоляция трубопроводов теплосетей. Минск: Технопринт, 2002.
7. Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. Минск: Современная школа, 2005.
8. Ионин А.А., Хлыбов Б.М., Братенков В.Н., Терleckая Е.Н. Теплоснабжение, М.: Стройиздат, 1982.
9. СП 61.13330.2012 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов.
10. ТУ 2248-021-40270293-2005 Трубы ИЗОПРОФЛЕКС и ИЗОПРОФЛЕКС-А из сшитого полиэтилена с теплоизоляцией из пенополиуретана в гофрированной полиэтиленовой оболочке.
11. ИЗОПРОФЛЕКС. Техническое описание. Гибкие предизолированные трубы для ГВС и сетей отопления. Группа ПОЛИМЕРТЕПЛО, 2007.

Результаты расчетов величин линейных термических сопротивлений R , R_{pipe} и коэффициента теплопроводности теплоизоляции из ППУ λ_i для трубы ИЗОПРОФЛЕКС 25/63

$t_h, ^\circ\text{C}$	$\tilde{t}, ^\circ\text{C}$	$\tilde{t}_i, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^{-6},$ с/м ³	$R,$ м · °С/Вт	$R_{pipe},$ м · °С/Вт	$\lambda_i,$ Вт/(м · °С)	$\Delta\lambda_i,$ Вт/(м · °С)
60	53	40	1,22	5,95	5,44	0,026	0,002
80	67	46	1,08	5,27	4,76	0,029	0,001