

# Занятие 1

(2 часа)

## Расчет оптимальной толщины изоляции тепловой сети

Цель теплового расчета сети - определение толщины тепловой изоляции и падения температуры на данном участке трассы.

Толщину теплоизоляционного слоя определяют по нормам удельных потерь теплоты или на основании технико-экономических расчетов. При этом толщина изоляции трубопровода данного диаметра не должна превышать предельного значения, указанного в таблице 1.

Таблица 1. Нормы потерь теплоты (Вт/м) для водяных тепловых сетях

Наружный Диаметр Трубы	Подземная прокладка				Надземная прокладка			
	Среднегодовая температура теплоносителя							
	50	65	90	100	50	70	100	150
32	23	29	37	44	17	28	36	54
57	29	36	46	55	24	32	46	67
76	34	40	52	62	29	38	52	77
89	36	44	57	66	33	42	58	82
108	40	49	63	72	36	48	64	90
159	49	60	76	87	44	56	76	109
219	59	72	92	106	53	66	91	128
273	70	84	105	120	62	77	101	145
325	79	94	116	134	70	88	116	163

### Задача 1

При максимальной температуре горячей воды 130°C и минимальной её температуре 40°C допустимо принимать среднегодовую температуру теплоносителя 85°C.

Проведем тепловой расчет участка теплопровода. Исходные данные:

- 1) Теплоизоляционный материал - полуцилиндры из минеральной ваты на синтетическом связующем плотностью 100 кг/м<sup>3</sup>. Расчетная теплопроводность  $\lambda_{и} = 0,049 + 0,00021t_{ср}$ , толщина  $\delta = 40 \div 80$  мм.
- 2) Наружный диаметр обеих труб  $d_{н}=0,273$  м, длина  $l=120$  м.
- 3) Расход теплоносителя  $G=51,74$  кг/с.

4) Среднегодовая температура в подающем трубопроводе  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в обратном –  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Среднегодовая температура воздуха -  $t_0=2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

5) Трубы проложены в непроходном бетонном канале. Глубина заложения осей труб  $h = 1\text{ м}$ .

6) Грунт песчаный ( $\rho = 2000\text{ кг/м}^3$ ), влажный (теплопроводность  $\lambda_{\text{гр}} = 2\text{ Вт/(м }^{\circ}\text{C)}$ ) температура на глубине прокладки труб  $t_{\text{гр}}=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

7) Теплопроводность бетона во влажной среде  $\lambda_{\text{ст}} = 1,86\text{ Вт/(м }^{\circ}\text{C)}$ .

### Решение

Расчет начнем с определения эквивалентных наружного и внутреннего диаметра канала, который определяют по формуле:

$$d_{\text{э}} = \frac{4A}{P}, \quad (1)$$

где  $A$  – площадь (наружная или внутренняя) поперечного сечения канала при соответственно наружным или внутренним его периметре  $P$ .

Размеры канала  $960 \times 510\text{ мм}$  по наружному обмеру.

$$d_{\text{эН}} = 4 \cdot 0,93 \cdot 0,51 / (2 \cdot (0,93 + 0,51)) = 0,659\text{ м},$$

$$d_{\text{эВ}} = 4 \cdot 0,87 \cdot 0,45 / (2 \cdot (0,87 + 0,45)) = 0,593\text{ м}.$$

Общее сопротивление при подземной прокладке сети в непроходных каналах:

$$R = R_{\text{и}} + R_{\text{к}}, \quad (2)$$

где  $R_{\text{к}}$  - тепловое сопротивление канала;  $R_{\text{и}}$  - сопротивление теплопроводности тепловой изоляции.

$$R_{\text{к}} = R_{\text{вп}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{гр}}, \quad (3)$$

где  $R_{\text{вп}}$  - сопротивление теплопередаче от воздуха канала к его внутренней поверхности,  $(\text{м}^2\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$ ;  $R_{\text{ст}}$  - тепловое сопротивление стенок канала,  $(\text{м}^2\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$ ;  $R_{\text{гр}}$  - тепловое сопротивление грунта, окружающего канал,  $(\text{м}^2\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$

$$R_{\text{ВП}} = \frac{1}{\pi d_3 \alpha}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/ (м<sup>2</sup> °С), определяется по формулу:

$$\alpha = 11,6 + 7\sqrt{v}, \quad (5)$$

где  $v$  - скорость движения воздуха у поверхности изоляции ( $v = 0$ ,  $\alpha = 11,6$ ).

$$R_{\text{ВП}} = 1/(3,14 \cdot 0,593 \cdot 11,6) = 0,046 (\text{м}^2 \text{°С})/\text{Вт}.$$

$$R_{\text{СТ}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{СТ}}} \ln \frac{d_{\text{ЭН}}}{d_{\text{ЭВ}}}, \quad (6)$$

$$R_{\text{СТ}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,86} \ln \frac{0,659}{0,593} = 0,0089 (\text{м}^2 \text{°С})/\text{Вт}.$$

$$R_{\text{ГР}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{ГР}}} \ln \left[ \frac{2h}{d_{\text{ЭН}}} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d_{\text{ЭН}}}\right)^2 - 1} \right], \quad (7)$$

$$R_{\text{ГР}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,0} \ln \left[ \frac{2 \cdot 1}{0,659} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 1}{0,659}\right)^2 - 1} \right] = 0,129 (\text{м}^2 \text{°С})/\text{Вт}.$$

Тепловое сопротивление канала определим подставляя в формулу (3) рассчитанные сопротивления теплопередачи от воздуха канала к его внутренней стенке, тепловое сопротивление стенок канала и тепловое сопротивление грунта получим:

$$R_{\text{К}} = 0,046 + 0,0089 + 0,129 = 0,185 (\text{м}^2 \text{°С})/\text{Вт}.$$

Сопротивление теплопроводности тепловой изоляции находится по формуле:

$$R_{\text{И}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{И}}} \ln \frac{d_{\text{НИ}}}{d_{\text{ВИ}}}, \quad (8)$$

где  $\lambda_{и}$  – теплопроводность материала изоляции, Вт/(м °С),  $d_{ни}, d_{ви}$  – наружный и внутренний диаметр изоляции, м.

Минимальная толщина теплоизоляции 100 мм. Наружный диаметр изоляции составит:

$$d_{ни} = 0,273 + 2 \cdot 0,04 = 0,353 \text{ м.}$$

$$\lambda_{и} = 0,049 + 0,00021 t_{ср}, \quad (9)$$

где  $t_{ср}$  - средняя температура изоляции, °С.

$$t_{ср} = \frac{t_{ст} + t_{н}}{2}, \quad (10)$$

где  $t_{ст}$  - температура изолируемой поверхности, принимается равной расчетной температуре теплоносителя 85°С.  $t_{н}$  - температура наружной поверхности изоляции 40°С.

Для подающего теплопровода теплопроводность  $\lambda_{и}$  составит:

$$\lambda_{и.п} = 0,049 + 0,00021 \left( \frac{85 + 40}{2} \right) = 0,0621 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}.$$

Для обратного трубопровода теплопроводность  $\lambda_{и}$  составит:

$$\lambda_{и.о} = 0,049 + 0,00021 \left( \frac{50 + 40}{2} \right) = 0,059 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}.$$

Сопротивление изоляции теплопроводности для подающего и обратного теплопровода соответственно равны:

$$R_{и.п} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0621} \cdot \ln \frac{0,353}{0,273} = 0,659 \text{ (м}^2 \text{ °С)/Вт};$$

$$R_{и.о} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0621} \cdot \ln \frac{0,353}{0,273} = 0,700 \text{ (м}^2 \text{ °С)/Вт}.$$

Общее сопротивление теплопередаче найдем по формуле:

$$R_{п} = 0,659 + 0,185 = 0,843 \text{ (м}^2 \text{ °С)/Вт},$$

$$R_{о} = 0,700 + 0,185 = 0,885 \text{ (м}^2 \text{ °С)/Вт}.$$

Взаимное влияние одной трубы на другую учитывается условным дополнительным сопротивлением, определяется по формуле:

$$R_{\text{доп}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{гр}}} \ln \left[ \sqrt{\left(\frac{2h}{b}\right)^2 + 1} \right], \quad (11)$$

где  $b$  - расстояние между осями труб, м.

$$R_{\text{доп}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,0} \ln \left[ \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 1}{0,4}\right)^2 + 1} \right] = 0,143 (\text{м}^2 \text{°C})/\text{Вт}.$$

Средняя температура воздуха в канале определится по формуле:

$$t_{\text{к}} = \frac{\frac{t_1}{R_1} + \frac{t_2}{R_2} + \frac{t_{\text{гр}}}{R_{\text{к}}}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{\text{к}}}}. \quad (12)$$

$$t_{\text{к}} = \frac{\frac{85}{0,843} + \frac{50}{0,885} + \frac{5}{0,185}}{\frac{1}{0,843} + \frac{1}{0,885} + \frac{1}{0,185}} = 23,84 \text{°C}.$$

Удельные потери теплоты двухтрубным теплопроводом определяют по уравнениям:

- для подающего трубопровода:

$$q_1 = \frac{(t_1 - t_{\text{к}})R_2 - (t_2 - t_{\text{к}})R_{\text{доп}}}{R_1R_2 - R_{\text{доп}}^2}; \quad (13)$$

- для обратного трубопровода:

$$q_2 = \frac{(t_2 - t_{\text{к}})R_1 - (t_1 - t_{\text{к}})R_{\text{доп}}}{R_1R_2 - R_{\text{доп}}^2}, \quad (14)$$

$$q_1 = \frac{(85 - 23,84) \cdot 0,843 - (50 - 23,84) \cdot 0,143}{0,843 \cdot 0,885 - 0,143^2} = 69,42 \text{ Вт/м},$$

$$q_2 = \frac{(50 - 23,84) \cdot 0,843 - (85 - 23,84) \cdot 0,143}{0,843 \cdot 0,885 - 0,143^2} = 18,36 \text{ Вт/м}.$$

Полученные значения теплотерь ниже норм для данного диаметра труб. Толщина изоляции значительно меньше предельной толщины для данного диаметра труб. Следовательно толщина изоляции выбрана правильно.

Падение температуры теплоносителя - воды на участке трубопровода длиной  $l$  находится из уравнения:

$$\Delta t = \frac{ql\beta}{4,19 \cdot 10^3 G_T}, \quad (15)$$

где  $\beta$  - коэффициент длины трубопровода, учитывает потери теплоты неизолрированными компенсаторами, фланцевыми соединениями, арматурой. При канальной прокладке  $\beta = 1,2$ ;  $G_T$  - расход теплоносителя, кг/с.

$$\Delta t_{\text{п}} = \frac{69,42 \cdot 120 \cdot 1,2}{4,19 \cdot 10^3 \cdot 51,74} = 0,046 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\Delta t_{\text{о}} = \frac{18,36 \cdot 120 \cdot 1,2}{4,19 \cdot 10^3 \cdot 51,74} = 0,012 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таблица 2. Результаты теплового расчета

N уч.	$R_{\text{п}},$ ( $\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ )/Вт	$R_{\text{о}},$ ( $\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ )/Вт	$t_{\text{к}},$ $^\circ\text{C}$	$q_1,$ Вт/м	$q_2,$ Вт/м	$\Delta t_{\text{п}},$ $^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{о}},$ $^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{и}},$ мм
I	0,843	0,885	23,84	69,42	18,38	0,046	0,012	40

## Задача 2

Определить изменения удельных тепловых потерь трубопроводами для участка надземной водяной тепловой сети.

При максимальной температуре горячей воды  $130^\circ\text{C}$  и минимальной её температуре  $40^\circ\text{C}$  допустимо принимать среднегодовую температуру теплоносителя  $85^\circ\text{C}$ .

Проведем тепловой расчет участка теплопровода. Исходные данные:

1) Теплоизоляционный материал - полуцилиндры из минеральной ваты на синтетическом связующем плотностью  $100 \text{ кг/м}^3$ . Расчетная теплопроводность  $\lambda_{\text{и}} = 0,049 + 0,00021t_{\text{ср}}$ , толщина  $\delta = 40 \div 80 \text{ мм}$ .

2) Наружный диаметр обеих труб  $d_{\text{н}}=0,273 \text{ м}$ , длина  $l=120 \text{ м}$ .

3) Расход теплоносителя  $G=51,74 \text{ кг/с}$ .

4) Среднегодовая температура в подающем трубопроводе  $t_{\text{п}}=85 \text{ }^\circ\text{C}$ , в обратном –  $t_{\text{п}}=50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Среднегодовая температура воздуха -  $t_{\text{о}}=2,7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

5) Трубы проложены над землей. Расстояние между свободными опорами 13м.

Общее сопротивление при надземной прокладке сети:

$$R = R_{\text{и}} + R_{\text{н}}, \quad (1)$$

где  $R_{\text{н}}$  - тепловое сопротивление наружной поверхности изоляции;  $R_{\text{и}}$  - сопротивление теплопроводности тепловой изоляции.

Сопротивление теплопроводности тепловой изоляции находится по формуле:

$$R_{\text{и}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{и}}} \ln \frac{d_{\text{ни}}}{d_{\text{ви}}}, \quad (2)$$

где  $\lambda_{\text{и}}$  – теплопроводность материала изоляции,  $\text{Вт}/(\text{м } ^\circ\text{C})$ ,  $d_{\text{ни}}, d_{\text{ви}}$  – наружный и внутренний диаметр изоляции, м.

Минимальная толщина теплоизоляции 100 мм. Наружный диаметр изоляции составит:

$$d_{\text{ни}} = 0,273 + 2 \cdot 0,04 = 0,353 \text{ м}.$$

$$\lambda_{\text{и}} = 0,049 + 0,00021t_{\text{ср}}, \quad (3)$$

где  $t_{\text{ср}}$  - средняя температура изоляции,  $^\circ\text{C}$ .

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{ст}} + t_{\text{н}}}{2}, \quad (4)$$

где  $t_{ст}$  - температура изолируемой поверхности, принимается равной расчетной температуре теплоносителя  $85^{\circ}\text{C}$ .  $t_{н}$  - температура наружной поверхности изоляции  $40^{\circ}\text{C}$ .

Для подающего теплопровода теплопроводность  $\lambda_{и}$  составит:

$$\lambda_{и.п} = 0,049 + 0,00021 \left( \frac{85 + 40}{2} \right) = 0,0621 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}).$$

Для обратного трубопровода теплопроводность  $\lambda_{и}$  составит:

$$\lambda_{и.о} = 0,049 + 0,00021 \left( \frac{50 + 40}{2} \right) = 0,059 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}).$$

Сопротивление изоляции теплопроводности для подающего и обратного теплопровода соответственно равны:

$$R_{и.п} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0621} \cdot \ln \frac{0,353}{0,273} = 0,659 (\text{м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C})/\text{Вт};$$

$$R_{и.о} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0621} \cdot \ln \frac{0,353}{0,273} = 0,700 (\text{м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C})/\text{Вт}.$$

Тепловое сопротивление наружной поверхности изоляции находится по формуле:

$$R_{н} = 1 / \pi d_{ни} \alpha_{н}, \quad (5)$$

где  $\alpha_{н}$  – коэффициент теплоотдачи поверхности изоляции  $\alpha_{н} = 28,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C})$ .

$$R_{н} = 1 / (3,14(0,273 + 2 \cdot 0,04)28,3) = 0,032$$

Общее сопротивление теплопередаче найдем по формуле (1):

$$R_{п} = 0,659 + 0,032 = 0,691 (\text{м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C})/\text{Вт},$$

$$R_{о} = 0,700 + 0,032 = 0,732 (\text{м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C})/\text{Вт}.$$

Удельные потери теплоты двухтрубным теплопроводом определяют по уравнениям:

$$q_1 = \frac{(t_{п} - t_0)}{R}, \quad (6)$$

где  $t_0$  – температура окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$

$$q_1 = \frac{(85 - 2,7)}{0,691} = 119,2 \text{ Вт}/\text{м},$$

$$q_1 = \frac{(50 - 2,7)}{0,732} = 64,62 \text{ Вт/м.}$$

Падение температуры теплоносителя - воды на участке трубопровода длиной  $l$  находится из уравнения:

$$\Delta t = \frac{ql\beta}{4,19 \cdot 10^3 G_T}, \quad (7)$$

где  $\beta$  - коэффициент длины трубопровода, учитывает потери теплоты неизолрованными компенсаторами, фланцевыми соединениями, арматурой. При канальной прокладке  $\beta = 1,2$ ;  $G_T$  - расход теплоносителя, кг/с.

$$\Delta t_{\text{п}} = \frac{119,2 \cdot 120 \cdot 1,2}{4,19 \cdot 10^3 \cdot 51,74} = 0,079 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$\Delta t_{\text{о}} = \frac{64,62 \cdot 120 \cdot 1,2}{4,19 \cdot 10^3 \cdot 51,74} = 0,043 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Таблица 3. Результаты теплового расчета

N уч.	$R_{\text{п}},$ ( $\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})/\text{Вт}$	$R_{\text{о}},$ ( $\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})/\text{Вт}$	$q_1,$ Вт/м	$q_2,$ Вт/м	$\Delta t_{\text{п}},$ $^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{о}},$ $^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{и}},$ мм
I	0,691	0,732	119,2	64,62	0,079	0,043	40

Полученные значения удельных потерь теплоты двухтрубными теплопроводами превышают предельно допустимые нормы. Необходимо пересчитать толщину тепловой изоляции.

### Домашнее задание

Произвести расчет подземной прокладки трубопровода с ППУ изоляцией

Теплопроводность ППУ изоляции  $0,033 \text{ Вт/м }^\circ\text{C}$

# Размеры труб в ППУ изоляции\*

В миллиметрах

Наружный диаметр и минимальная толщина стенки стальных труб*	Тип 1			Тип 2		
	Средний наружный диаметр изолированных труб с полиэтиленовой оболочкой		Расчетная толщина слоя пенополиуретана	Средний наружный диаметр изолированных труб с полиэтиленовой оболочкой		Расчетная толщина слоя пенополиуретана
	Номинальный	Предельное отклонение (+)		Номинальный	Предельное отклонение (+)	
32 × 3,0	90; 110; 125	2,7; 3,5; 3,7	26,0; 36,5; 43,5	—	—	—
38 × 3,0	110; 125	3,2; 3,7	33,0; 40,5	—	—	—
45 × 3,0	125	3,7	37,0	—	—	—
57 × 3,0	125	3,7	31,5	140	4,1	38,5
76 × 3,0	140	4,1	29,0	160	4,7	39,0

\*ГОСТ 30732-2006