

Тепловая изоляция

Задание №10

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Провести расчет теплоизоляционной конструкции для головного участка тепловой сети.

Основные виды теплоизоляционных материалов и изделий, применяемых для изоляции теплопроводов (Приложение 6).

Согласно указаниям СНиПа 2.04.07-86 толщины основного слоя теплоизоляционных конструкций теплопроводов должны определяться на основе технико-экономических расчетов или по действующим нормам плотности теплового потока. Нормы плотности теплового потока трубопроводами тепловых сетей, прокладываемых в непроходных каналах и бесканально, при среднегодовых значениях температур теплоносителя и окружающей среды для первого территориального района (Приложение 7).

Значения плотностей теплового потока при других заданных температурах теплоносителя и окружающей среды, а также для других территориальных районов определяются по формуле

$$q_n^p = q_n \cdot \frac{\tau_{ср.год}^p - t_{окр.ср}^p}{\tau_{ср.год} - t_{окр.ср}}, \text{Вт/м}$$

где q_n - нормы плотности теплового потока, по приложение 7 и 8, Вт/м;

$\tau_{ср.год}^p$ - расчетная среднегодовая температура теплоносителя, °С;

$t_{окр.ср}^p$ - расчетная среднегодовая температура окружающей среды, °С;

$\tau_{ср.год}$ - среднегодовая температура теплоносителя, принятая при расчете норм тепловых потерь, °С;

$t_{окр.ср}$ - среднегодовая температура окружающей среды, принятая при расчете норм тепловых потерь, °С.

При расчете теплоизоляционной конструкции необходимо выбрать толщину теплоизоляционного слоя $\delta_{из}$ и определить плотность теплового потока:

$$q = \frac{\tau - t_o}{R_e}$$

где τ - температура теплоносителя, °C;

t_o – температура окружающей среды, °C;

Полное термическое сопротивление R_e зависит от способа прокладки трубопроводов тепловой сети.

Расчет тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей при двухтрубной прокладке в непроходном канале

В качестве теплоизоляционного слоя в соответствии со СНиП 2.04.14-88 следует применять материалы со средней плотностью не более 400 кг/м³ и теплопроводностью не более $0,07 \frac{Вт}{(м \cdot ^\circ C)}$.

Полное термическое сопротивление подающего и обратного теплопроводов определяется по формулам:

$$R_e^n = R_{из}^n + R_n^n + R_{\kappa}^n + R_{\theta} + R_{\kappa} + R_{zp}$$

$$R_e^o = R_{из}^o + R_n^o + R_{\kappa}^o + R_{\theta} + R_{\kappa} + R_{zp}$$

Каждое из слагаемых определяется из выражения

$$R_{из} = \frac{1}{2\pi\lambda_{из}} \ln \frac{d_{из}}{d_n}$$

где $\lambda_{из}$ - коэффициент теплопроводности основного теплоизоляционного материала, принимается по прил. 1, $\frac{Вт}{(м \cdot ^\circ C)}$;

$d_{из}$ - диаметр изоляционного слоя изоляционной конструкции, м;

d_n - наружный диаметр трубопровода, м;

$$R_n = \frac{1}{2\pi\lambda_n} \ln \frac{d_n}{d_{из}}$$

где λ_n - коэффициент теплопроводности материала покровного слоя конструкции, $\frac{Вт}{(м, ^\circ C)}$;

d_n - диаметр покровного слоя изоляционной конструкции, м;

$$R_n = \frac{1}{\alpha_n \pi d_n}$$

где α_n - коэффициент теплоотдачи;

$$R_\epsilon = \frac{1}{\alpha_\epsilon \pi d_{кан}^\epsilon}$$

где $d_{кан}^\epsilon$ - диаметр, эквивалентный внутреннему периметру канала, м;

$$R_\kappa = \frac{1}{2\pi\lambda_\kappa} \ln \frac{d_{кан}^\kappa}{d_{кан}^\epsilon}$$

где λ_κ - коэффициент теплопроводности материала канала, $\frac{Вт}{(м, ^\circ C)}$;

$d_{кан}^\kappa$ - диаметр, эквивалентный наружному периметру канала, м.

При значениях $2h/d_{кан}^\kappa < 2$ термическое сопротивление грунта определяется по формуле:

$$R_{\epsilon p} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\epsilon p}} \ln \left[\frac{2h_\gamma}{d_{кан}^\kappa} + \sqrt{\left(\frac{2h_\gamma}{d_{кан}^\kappa} \right)^2 - 1} \right]$$

где $\lambda_{\epsilon p}$ - коэффициент теплопроводности грунта, принимается равным $1,2 + 2,2 \frac{Вт}{(м, ^\circ C)}$;

h_γ - эквивалентная глубина заложения.

$$h_\gamma = h + \frac{\lambda_{\epsilon p}}{\alpha}$$

где h – глубина заложения теплопровода до его оси, м.

При значениях $2h/d_{кан}^\kappa \geq 2$ применяется приближенная формула:

$$R_{\epsilon p} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\epsilon p}} \ln \frac{4h}{d_{кан}^\kappa},$$

$$d_{кан} = \frac{4F}{P},$$

где F – площадь поперечного сечения канала, m^2 ;

P – периметр этого сечения, m .

При проведении расчетов следует предварительно задаться значениями δ_n и δ_o и определить значения термических сопротивлений.

В расчетах значения коэффициентов теплоотдачи от поверхности изоляционной конструкции к воздуху в канале α_n и теплоотдачи от воздуха в канале к его внутренней поверхности α_o принимаются

$$\alpha_n = \alpha_o = 8 - 12, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{C)}$$

Для определения теплового потока необходимо найти температуру воздуха в канале по выражению

$$t_o = \frac{\frac{\tau_n}{R_{уз}^n + R_n^n + R_n^n} + \frac{\tau_o}{R_{уз}^o + R_n^o + R_n^o} + \frac{t_{zp}}{R_o + R_k + R_{zp}}}{\frac{1}{R_{уз}^n + R_n^n + R_n^n} + \frac{1}{R_{уз}^o + R_n^o + R_n^o} + \frac{1}{R_o + R_k + R_{zp}}}.$$

Тогда плотность теплового потока для подающего или обратного теплопроводов можно определить из выражения

$$q = \frac{\tau - t_o}{R_{уз} + R_n + R_n}.$$

После этого производится сравнение полученной плотности теплового потока q с нормативной q_k^p , и если соблюдается соотношение то расчет считается законченным.

$$\left(\frac{q_k^p - q}{q_k^p} \right) \cdot 100\% \leq 5 - 10\%,$$

Если же расхождения значительны, то необходимо задаться новыми значениями δ_n и δ_o , и расчет повторить.

Температура на поверхности теплоизоляционной конструкции после окончательного подбора толщины тепловой изоляции может быть найдена из выражения

$$t_{из} = \tau - q(R_{из} + R_n).$$

При транспорте теплоносителя от источника тепла к потребителю из-за потерь тепла температура теплоносителя уменьшается. Падение температуры на участке тепловой сети определяется по формуле

$$\Delta \tau = \frac{q l K}{G \cdot c},$$

где l - длина участка, м;

G - расход теплоносителя на участке, кг/ч;

c - теплоемкость теплоносителя, кДж/ (кг·°C);

K - коэффициент, учитывающий потери тепла опорами труб, компенсаторами, арматурой и т.д.

Расчет тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей при двухтрубной бесканальной прокладке

Для теплоизоляционного слоя при бесканальной прокладке следует применять, как правило, материалы со средней плотностью не более 600 кг/м³ и теплопроводностью не более 0,13 Вт/(м·°C).

Полное термическое сопротивление подающего и обратного теплопроводов можно найти из выражений:

$$R_e^n = R_{из}^n + R_n^n + R_{zp} + R_o;$$

$$R_e^o = R_{из}^o + R_n^o + R_{zp} + R_o,$$

где R_o - термическое сопротивление, учитывающее взаимодействие тепловых потоков теплопроводов, Вт/(м·°C).

При одинаковой глубине заложения теплопроводов R_o определяется из выражения

$$R_o = \frac{1}{2\pi\lambda_{zp}} \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{b}\right)^2};$$

где b - расстояние между осями трубопроводов по горизонтали, м.

При различных глубинах заложения теплопроводов h_n и h_o термическое сопротивление R_o определяется по формуле

$$R_o = \frac{1}{2\pi\lambda_{cp}} \ln \sqrt{\frac{b^2(h_n + h_o)^2}{b^2 + (h_n + h_o)^2}}.$$

Расчет тепловой изоляции ведется аналогично канальной прокладке, т.е. предварительно необходимо задаться толщиной изоляции δ_n и δ_o , рассчитать термическое сопротивление R_e . Тогда плотность теплового потока можно определить из выражения

$$q = \frac{\tau - t_{cp}}{R_e}.$$

Полученные плотности теплового потока сравнивают с нормированными и при необходимости производят пересчет.

Пример

Расчёт производится на главном участке (от ТЭЦ до первого ответвления)

Определить толщину тепловой изоляции для двухтрубной прокладки тепловой сети диаметром $d_n = 0,529 \text{ м}$ в железобетонном непроходном канале с размерами $2,41 \times 1,105 \text{ м}$ (внутренний) и $2,62 \times 1,355 \text{ м}$ (наружный).

Место строительства – Европейская часть. Средняя температура теплоносителя в подающем теплопроводе $\tau_{cp}^n = 88^\circ \text{C}$, в обратном $\tau_{cp}^o = 46^\circ \text{C}$. Глубина заложения оси трубопроводов $h = 2,4 \text{ м}$. Грунт суглинистый $\gamma_{cp} = 1400 \text{ кг/м}^3$, влагосодержание 20%. Среднегодовая температура грунта $t_{cp} = 5,9^\circ \text{C}$. В качестве тепловой изоляции принимаем маты минераловатные, прошивные, ГОСТ 2/880-88 марки 100. Покровный слой из стеклоткани $\lambda_n = 0,17 \text{ Вт/(м}^\circ \text{C)}$.

Для трубопроводов с $d_n = 0,529 \text{ м}$ ($d_y = 500 \text{ мм}$) по нормам плотность теплового потока $q_n^n = 98 \text{ Вт/м}$ и $q_n^o = 38 \text{ Вт/м}$, тогда

$$q_{n-n}^p = 98 \cdot \frac{88 - 5,9}{90 - 5} \cdot 1,0 = 94,7 \text{ Вт/м};$$

$$q_{n-n}^p = 38 \cdot \frac{46 - 5,9}{50 - 5} \cdot 1,0 = 33,9 \text{ Вт} / \text{м}.$$

Принимаем толщину слоя тепловой изоляции и покровного слоя $\delta_{уз-н} = 0,06 \text{ м}$, $\delta_{уз-о} = 0,04 \text{ м}$, $\delta_n = 0,03 \text{ м}$.

Для определения коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала температуру по наружной поверхности слоя тепловой изоляции принимаем $t_{уз} = 20^\circ \text{C}$, тогда

$$t_{cp-n} = \frac{88 + 20}{2} = 54^\circ \text{C};$$

$$t_{cp-o} = \frac{46 + 20}{2} = 33^\circ \text{C};$$

$$\lambda_{уз-н} = 0,045 + 0,00021 \cdot 54 = 0,056 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ \text{C}),$$

$$\lambda_{уз-о} = 0,045 + 0,00021 \cdot 33 = 0,052 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ \text{C}),$$

$$\lambda_\kappa = 1,5 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ \text{C}), \quad \lambda_{cp} = 1,62 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ \text{C}),$$

$$d_{уз-н} = 0,529 + 0,12 = 0,649 \text{ м},$$

$$d_{уз-о} = 0,529 + 0,08 = 0,609 \text{ м},$$

$$d_{n-n} = 0,649 + 0,006 = 0,655 \text{ м},$$

$$d_{n-o} = 0,609 + 0,006 = 0,615 \text{ м},$$

Определяем термическое сопротивление:

$$R_{уз-н} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,056} \ln \frac{0,649}{0,529} = 0,581 (\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}) / \text{Вт};$$

$$R_{n-n} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,17} \ln \frac{0,655}{0,649} = 0,009 (\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}) / \text{Вт};$$

$$R_{n-o} = \frac{1}{3,14 \cdot 8,7 \cdot 0,655} = 0,056 (\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}) / \text{Вт};$$

$$\sum R_n = 0,581 + 0,009 + 0,056 = 0,646 (\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}) / \text{Вт};$$

$$R_{уз-о} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,052} \ln \frac{0,609}{0,529} = 0,431 (\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}) / \text{Вт};$$

$$R_{n.o} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,17} \ln \frac{0,615}{0,609} = 0,009 (M^2 \cdot ^\circ C) / Bm ;$$

$$R_{h.o} = \frac{1}{3,14 \cdot 8,7 \cdot 0,615} = 0,06 (M^2 \cdot ^\circ C) / Bm ;$$

$$\sum R_o = 0,431 + 0,009 + 0,06 = 0,5 (M^2 \cdot ^\circ C) / Bm ;$$

$$d_{\text{экв}}^{\text{с}} = \frac{4 \cdot 2,41 \cdot 1,105}{2(2,41 + 1,105)} = 1,38 M ;$$

$$d_{\text{экв}}^{\text{н}} = \frac{4 \cdot 2,62 \cdot 1,355}{2(2,62 + 1,355)} = 1,79 M ;$$

$$R_{\kappa} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,5} \ln \frac{1,79}{1,38} = 0,028 (M^2 \cdot ^\circ C) / Bm ;$$

$$R_{\text{с}} = \frac{1}{3,14 \cdot 8,7 \cdot 1,38} = 0,027 (M^2 \cdot ^\circ C) / Bm ;$$

Определяем соотношение

$$\frac{2h}{d_{\text{экв}}^{\text{н}}} = \frac{2 \cdot 1,9}{1,79} = 2,12 > 2 ,$$

тогда

$$R_{\text{ср}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,62} \ln \frac{4 \cdot 1,9}{1,79} = 0,142 (M^2 \cdot ^\circ C) / Bm ;$$

$$\sum R_{\kappa} = 0,027 + 0,028 + 0,142 = 0,197 (M^2 \cdot ^\circ C) / Bm .$$

Определяем температуру внутри канала:

$$t_{\text{с}} = \frac{\frac{88}{0,646} + \frac{46}{0,5} + \frac{5,9}{0,197}}{\frac{1}{0,646} + \frac{1}{0,5} + \frac{1}{0,197}} = 29,94 ^\circ C .$$

Определяем тепловые потери:

$$q_n = \frac{88 - 29,94}{0,646} = 89,88 Bm / M .$$

Сравниваем с нормами:

$$\frac{94,7 - 89,88}{94,7} \cdot 100 \% = 5,1 \% ;$$

$$q_o = \frac{46 - 29,94}{0,5} = 32,12 \text{ Вт / м} ;$$

$$\text{невязка} = \frac{33,9 - 32,12}{33,9} \cdot 100\% = 5,3\% .$$

Подбор теплофикационного оборудования ТЭЦ

Основные расчетные зависимости

Тепловая мощность пикового водогрейного котла

$$Q_{пвк} = (1 - \alpha_{тец}) \sum Q^p .$$

Тепловая мощность основного подогревателя:

$$\text{для закрытой системы } Q_{ом} = \alpha_{тец} \cdot \sum Q^p ;$$

$$\text{для открытой системы } Q_{ом} = \alpha_{тец} \cdot \sum Q^p - Q_{зв}^{cp} ;$$

Число параллельно установленных типоразмеров ОП

$$n_1 = \frac{Q_{ом}}{Q_{мин}} \quad n_1 = \frac{\sum G_{т\text{ ув}}^p}{G_{мин}} .$$

Температура сетевой воды на выходе из ОП

$$\tau_{ув} = \tau_1^p - \frac{Q_{пвк}}{\sum G_{т\text{ ув}}^p \cdot c} ,$$

где $\sum G_{т\text{ ув}}^p$ - суммарный расход сетевой воды при $t_{ув}^p$.

Температура пара в теплофикационном отборе турбины

$$t_n = \tau_{ув} + 10 ,$$

Температура сетевой воды на входе в ОП

$$\tau_z = \tau_{up} - \frac{Q_{ом}}{\sum G_{т\text{ ув}}^p \cdot c} ,$$

Средняя температура сетевой воды в ОП

$$\tau_{cp} = \frac{\tau_{up} + \tau_z}{2} .$$

Температура стенки $t_{cm} = \frac{t_n + \tau_{cp}}{2} .$

Средняя температура воды при теплопередаче

$$t_{cp}^6 = \frac{t_{cm} + t_{cp}}{2}.$$

Средняя температура пара при теплопередаче

$$t_{cp}^n = \frac{t_n + t_{cm}}{2}.$$

Средний логарифмический напор в ОП

$$\Delta t_{cp}^{\lambda} = \frac{(t_n - t_2) - (t_n - t_{np})}{\ln \frac{t_n - t_2}{t_n - t_{np}}}.$$

Скорость воды в трубах ОП

$$V_{mp} = \frac{4 \sum G_{t_{us}}^p}{m \cdot n_1 \cdot \bar{n} \cdot d_{en} \cdot \rho \cdot 3600}.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к сетевой воде

$$\alpha_6 = \left[1630 + 21 \cdot t_{cp}^6 - 0,041 (t_{cp}^6)^2 \right] \cdot \frac{V_{mp}^{0,8}}{d_{en}^{0,2}}.$$

Коэффициент теплоотдачи от пара к стенке:

для типов ПСВ

$$\alpha_n = \frac{7400 + 75,5 t_{cp}^n - 0,23 (t_{cp}^n)^2}{[H(t_n - t_{cm})]^{0,22}};$$

для типов ПВГ

$$\alpha_n = \frac{4920 + 58 t_{cp}^n - 0,175 (t_{cp}^n)^2}{[2\sqrt{m} \cdot d_n (t_n - t_{cm})]^{0,25}}.$$

Коэффициент теплопередачи в ОП

$$K = \frac{0,75}{\frac{1}{\alpha_6} + \frac{1}{\alpha_n}}.$$

Требуемая поверхность ОП

$$F = \frac{Q_{om}}{n_1 \cdot K \cdot \Delta t_{cp}^{\lambda}}.$$

Число последовательно включенных ОП

$$n_2 = \frac{F}{F_{min}}.$$

Пример

$\sum Q^p = 2500 \cdot 10^6 \text{ кДж} / \text{ч}$; система теплоснабжения - закрытая; $\alpha_{тец} = 0,5$;

$$\sum G_{т\text{ув}}^p = 6,63 \cdot 10^6 \text{ кг} / \text{ч};$$

$$\tau_1^6 = 150^\circ \text{C}.$$

$$Q_{нек} = (1 - 0,5) \cdot 2500 \cdot 10^6 \text{ кДж} / \text{ч}.$$

$$Q_{от} = 0,5 \cdot 2500 \cdot 10^6 = 1250 \cdot 10^6 \text{ кДж} / \text{ч}.$$

Из таблицы выбираем тип ОП: ПВТ-2300, который устанавливается с турбиной Т-170-130 с характеристиками: $G_{мин}^{ном} = 3500 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{ч}$;

$$m = 1081 \text{ мм}; d_{вн} / d_{н} = 23 / 25 \text{ мм};$$

$$n_1 = \frac{6630 \cdot 10^3}{3500 \cdot 10^3} = 2 \text{ (так как } n_1 > 1,5 \text{)} F_{мин} = 2300 \text{ м}^2.$$

$$\tau_{np} = 150 - \frac{1250 \cdot 10^6}{6630 \cdot 10^6 \cdot 4,19} = 105^\circ \text{C};$$

$$t_n = 105 + 10 = 115^\circ \text{C};$$

$$\tau_e = 105 - \frac{1250 \cdot 10^6}{6630 \cdot 10^3 \cdot 4,19} = 60^\circ \text{C};$$

$$\tau_{cp} = \frac{105 + 60}{2} = 82,5^\circ \text{C};$$

$$t_{cm} = \frac{115 + 82,5}{2} = 98,75^\circ \text{C};$$

$$t_{cp}^n = \frac{115 + 98,75}{2} = 106,88^\circ \text{C};$$

$$\Delta t_{cp}^n = \frac{(115 - 60) - (115 - 105)}{\ln \frac{115 - 60}{115 - 105}} = 26,39^\circ \text{C};$$

$$V_{mp} = \frac{4 \cdot 6,63 \cdot 10^6}{1081 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,023^2 \cdot 975 \cdot 3600} = 2,1 \text{ м} / \text{с};$$

$$\alpha_{\varepsilon} = \left[1630 + 21 \cdot 90,63 - 0,041 \cdot 90,63^2 \right] \cdot \frac{2,1^{0,8}}{0,023^{0,2}} = 12241 \text{ Bm} / (\text{M}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ \text{C}) ;$$

$$\alpha_n = \frac{4920 + 58 \cdot 106,88 - 0,175 \cdot 106,88^2}{\left[2\sqrt{1081} \cdot 0,025(115 - 98,75) \right]^{0,25}} = 4017,56 \text{ Bm} / (\text{M}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ \text{C}) ;$$

$$K = \frac{0,75}{\frac{1}{12241} + \frac{1}{4017,56}} = 2272,7 \text{ Bm} / (\text{M}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ \text{C}) ;$$

$$P = \frac{1250 \cdot 10^6}{2 \cdot 2272,7 \cdot 26,39 \cdot 3,6} = 2890 \text{ M}^2 ;$$

$$n_2 = \frac{2890}{2300} = 1,26 \text{ ум.} = 1 \text{ ум. (так как } n_2 \leq 1,5)$$