

Методика расчёта толщины слоя монолитного пенобетона, применяемого для теплоизоляции трубопроводов

Аспирант И.А. Лундышев*,

ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Теплоизоляционные материалы и конструкции предназначены для уменьшения потерь тепла трубопроводами и оборудованием тепловых сетей, а уменьшение транспортных потерь тепла является важнейшим средством экономии топлива. Учитывая сравнительно небольшие затраты на теплоизоляцию трубопроводов (5-8% от капиталовложений в строительство тепловых сетей), очень важным в вопросах сохранения транспортируемого тепла по трубопроводам является их покрытие высококачественными и эффективными теплоизоляционными материалами и использование качественных теплоизоляционных конструкций.

Теплоизоляционные конструкции включают в себя защитное покрытие поверхности труб от коррозии, основной слой изоляции и защитное покрытие, предохраняющее основной слой теплоизоляции от механических повреждений, воздействия атмосферных осадков и агрессивных сред. К защитному покрытию относятся также средства и детали крепления покровного слоя и изоляции в целом [2].

В настоящее время активное внедрение проходит конструкция теплоизоляции трубопроводов монолитным пенобетоном. Согласно предлагаемой конструкции, на изолируемом трубопроводе устанавливаются центраторы, на которые монтируется съемная или несъемная опалубка, торцы уплотняются и через технологические отверстия в опалубке заливается монолитный пенобетон, создающий основной слой изоляции. При использовании несъемной опалубки заливочные технологические отверстия впоследствии заделываются любым гидроизолирующим, но паропроницаемым материалом, например, асбоцементным раствором с целью удаления избытка влаги из пенобетона.

Для применения данного вида теплоизоляции необходимо проведение теплового расчёта, в задачи которого входит определение по заданным теплотерям требуемой толщины основного слоя изоляционной конструкции. Тепловой расчет изоляции может вестись по нормированной плотности теплового потока через изолированную поверхность теплопровода, а исходными данными при тепловых расчетах являются температура теплоносителя, теплофизические характеристики слоев теплоизоляционной конструкции, грунта и канала при подземной прокладке, температура окружающей среды (грунта, воздуха). При тепловом расчёте используется математическое моделирование трубопровода согласно требованиям, выдвигаемым СНиП [1, 2]. Расчёты проведены для климатического района Санкт-Петербурга.

Расчёт толщины тепловой изоляции трубопроводов

Расчет толщины тепловой изоляции трубопроводов δ_k по нормированной плотности теплового потока выполняют по формуле [1]

$$\delta_k = \frac{d \cdot (B - 1)}{2}, \quad (1)$$

где d - наружный диаметр трубопровода, м;

B - отношение наружного диаметра изоляционного слоя d_1 к диаметру трубопровода d . ($B = \frac{d_1}{d}$);

Величину B определяют по формуле:

$$B = e^{2 \cdot \pi \cdot \lambda_k \cdot R_k}, \quad (2)$$

где e - основание натурального логарифма;

λ_k - коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя, Вт/(м · °С);

R_k - термическое сопротивление слоя изоляции, м · °С/Вт, величину которого определяют из следующего выражения

$$R_k = R_{tot} - \sum R_i, \quad (3)$$

где R_{tot} - суммарное термическое сопротивление слоя изоляции и других дополнительных термических сопротивлений на пути теплового потока определяемое по формуле:

$$R_{\text{tot}} = \frac{(t_w - t_e)}{q_e \cdot k_1} \quad (4)$$

где q_e - нормированная линейная плотность теплового потока, Вт/м;

t_w - средняя за период эксплуатации температура теплоносителя;

k_1 - коэффициент;

t_e - среднегодовая температура окружающей среды;

Определение фактических тепловых потоков для конструкций теплопроводов в пенобетонной изоляции при бесканальной прокладке

В расчётах приняты среднегодовые температуры теплоносителя при качественном графике регулирования отпуска тепла от теплоисточника 150-70⁰С (90-50⁰С – на обратном трубопроводе).

Фактические линейные плотности тепловых потоков q_1^L, q_2^L от подающего и обратного трубопроводов, Вт/м двухтрубных тепловых сетей, расположенных в грунте бесканально на одинаковом расстоянии от поверхности до оси труб H , м, определены по формулам [3](5,6):

$$q_1^L = \frac{(t_{B1} - t_H)(R_{uz} + R_{zp}) - (t_{B2} - t_H)R_0}{(R_{uz} + R_{zp})^2 - R_0^2} \quad (5)$$

$$q_2^L = \frac{(t_{B2} - t_H)(R_{uz} + R_{zp}) - (t_{B1} - t_H)R_0}{(R_{uz} + R_{zp})^2 - R_0^2} \quad (6)$$

Термическое сопротивление изоляции R_{uz} , м⁰С/Вт определено исходя из заданной толщины изоляции δ_{uz} , м по формуле (7):

$$R_{uz} = \frac{1}{2\pi\lambda_{uz}} \ln \frac{d + 2\delta_{uz}}{d} \quad (7)$$

Термическое сопротивление грунта R_{zp} , м⁰С/Вт определено по формуле (8):

$$R_{zp} = \frac{1}{2\pi\lambda_{zp}} \ln \left[\frac{2H}{d} + \sqrt{\left(\frac{2H}{d}\right)^2 - 1} \right] \quad (8)$$

Термическое сопротивление от взаимного влияния трубопроводов R_0 , м⁰С/Вт определено по формуле (9):

$$R_0 = \frac{1}{2\pi\lambda_{zp}} \ln \left[\sqrt{\left(\frac{2H}{K_{1,2}}\right)^2 + 1} \right] \quad (9)$$

В формулах (5-9) использованы обозначения:

t_{B1}, t_{B2} – среднегодовые температуры теплоносителя подающего (90⁰С) и обратного (50⁰С) теплопроводов;

t_H – (5⁰С) температура грунта[4];

d – наружный диаметр подающего и обратного трубопроводов, м;

$K_{1,2}$ – расстояние между осями труб по горизонтали, м;

$\lambda_{uz}, \lambda_{zp}$ – теплопроводность изоляции и грунта, Вт/м⁰С;

δ_{uz} – толщина изоляции, м.

Результаты расчётов приведены в таблицах 1 и 2:

Таблица 1. Глубина заложения $H = 1,5$ м

$q_1^L + q_2^L$	q_1^L	q_2^L	$R_{из}$	$R_{гр}$	R_0	$\lambda_{из}$	$d_y, м$	$d_n, м$	$H, м$	$K_{1,2, м}$	$\lambda_{зр}, Вт/мК$	$\delta_{из}, м$
43,8	29,7	14,1	2,34	0,42	0,21	0,05	0,05	0,057	1,5	0,3	1,78	0,031
39,1	26,4	12,7	2,70	0,42	0,21	0,05	0,05	0,057	1,5	0,3	1,78	0,038
54,1	37,1	17,0	1,81	0,39	0,21	0,05	0,07	0,076	1,5	0,3	1,78	0,029
45,7	31,1	14,6	2,25	0,39	0,21	0,05	0,07	0,076	1,5	0,3	1,78	0,039
55,8	38,3	17,5	1,75	0,38	0,21	0,05	0,08	0,089	1,5	0,3	1,78	0,033
47,8	32,5	15,2	2,14	0,38	0,21	0,05	0,08	0,089	1,5	0,3	1,78	0,043
63,4	43,4	20,0	1,52	0,36	0,17	0,05	0,1	0,108	1,5	0,45	1,78	0,033
54,4	37,0	17,4	1,86	0,36	0,17	0,05	0,1	0,108	1,5	0,45	1,78	0,043
62,3	42,6	19,7	1,57	0,34	0,17	0,05	0,125	0,133	1,5	0,45	1,78	0,043
70,8	48,8	22,0	1,34	0,32	0,17	0,05	0,15	0,159	1,5	0,45	1,78	0,042
86,7	59,9	26,8	1,06	0,30	0,15	0,05	0,2	0,219	1,5	0,6	1,78	0,043
84,6	58,4	26,2	1,11	0,28	0,15	0,05	0,25	0,273	1,5	0,6	1,78	0,057
97,8	67,7	30,1	0,94	0,26	0,13	0,05	0,3	0,325	1,5	0,7	1,78	0,056
117,3	80,8	36,5	0,77	0,24	0,10	0,05	0,4	0,426	1,5	1	1,78	0,058
113,0	77,6	35,3	0,83	0,22	0,10	0,05	0,5	0,529	1,5	1	1,78	0,079
139,4	95,1	44,3	0,66	0,20	0,07	0,05	0,6	0,63	1,5	1,5	1,78	0,073

Таблица 2. Глубина заложения $H = 0,7$ м.

$q_1^L + q_2^L$	q_1^L	q_2^L	$R_{из}$	$R_{гр}$	R_0	$\lambda_{из}$	$d_y, м$	$d_n, м$	$H, м$	$K_{1,2, м}$	$\lambda_{зр}, Вт/мК$	$\delta_{из}, м$
51,7	33,7	18,0	2,34	0,35	0,14	0,05	0,05	0,057	0,7	0,3	1,78	0,031
45,9	29,9	16,1	2,70	0,35	0,14	0,05	0,05	0,057	0,7	0,3	1,78	0,038
64,5	42,3	22,2	1,81	0,32	0,14	0,05	0,07	0,076	0,7	0,3	1,78	0,029
54,0	35,2	18,8	2,25	0,32	0,14	0,05	0,07	0,076	0,7	0,3	1,78	0,039
66,7	43,8	22,9	1,75	0,31	0,14	0,05	0,08	0,089	0,7	0,3	1,78	0,033
56,6	37,0	19,6	2,14	0,31	0,14	0,05	0,08	0,089	0,7	0,3	1,78	0,043
76,4	49,9	26,5	1,52	0,29	0,11	0,05	0,1	0,108	0,7	0,45	1,78	0,033
64,9	42,2	22,7	1,86	0,29	0,11	0,05	0,1	0,108	0,7	0,45	1,78	0,043
75,0	49,0	26,0	1,57	0,27	0,11	0,05	0,125	0,133	0,7	0,45	1,78	0,043
86,0	56,4	29,6	1,34	0,26	0,11	0,05	0,15	0,159	0,7	0,45	1,78	0,042
107,0	70,2	36,9	1,06	0,23	0,08	0,05	0,2	0,219	0,7	0,6	1,78	0,043
104,2	68,2	35,9	1,11	0,21	0,08	0,05	0,25	0,273	0,7	0,6	1,78	0,057
122,1	80,0	42,1	0,94	0,19	0,07	0,05	0,3	0,325	0,7	0,7	1,78	0,056
148,8	96,9	51,8	0,77	0,17	0,05	0,05	0,4	0,426	0,7	1	1,78	0,058
142,7	92,9	49,8	0,83	0,15	0,05	0,05	0,5	0,529	0,7	1	1,78	0,079
179,4	116,0	63,4	0,66	0,13	0,03	0,05	0,6	0,63	0,7	1,5	1,78	0,073

Определение фактических тепловых потоков для конструкций теплопроводов в пенобетонной изоляции при подземной прокладке в непроходных каналах

1. Фактические линейные плотности тепловых потоков q_1^L, q_2^L от подающего и обратного трубопроводов, Вт/м через изолированную поверхность двухтрубных тепловых сетей, прокладываемых в непроходном канале шириной b и высотой h на глубине H , м, от поверхности земли до оси канала определены по формуле [4]:

$$q_1^L + q_2^L = \frac{(t_{кан} - t_n)}{R_{кан} + R_{зр}} \quad (10)$$

2. Температура воздуха в канале $t_{кан}$:

$$t_{кан} = \frac{\frac{2t_n}{R_{из} + R_n} + \frac{t_n}{R_{кан} + R_{сп}}}{\frac{2}{R_{из} + R_n} + \frac{1}{R_{кан} + R_{сп}}} \quad (11)$$

$$R_n = \frac{1}{2\pi\alpha_k(d + 2\delta_{из})} \quad R_{кан} = \frac{1}{\pi\alpha_k \frac{2bh}{b+h}},$$

где $R_{кан}$ – термическое сопротивление теплоотдаче от воздуха к поверхности канала, м⁰С/Вт;

R_n – термическое сопротивление теплоотдаче от поверхности изоляции подающего и обратного трубопровода, м⁰С/Вт;

α_k – коэффициент теплоотдачи в канале, принимается равным 11 Вт/(м²·°С);

$R_{сп}$ – термическое сопротивление грунта, м⁰С/Вт, определяется по формуле

$$R_{сп} = \frac{\ln \left[3,5 \frac{H}{h} \left(\frac{h}{b} \right)^{0,25} \right]}{\left(5,7 + 0,5 \frac{b}{h} \right) \lambda_{сп}} \quad (12)$$

3. t_n – среднегодовая температура грунта, равная для Санкт-Петербурга – 3,20С.

Результаты расчётов приведены в таблице 3:

Таблица 3. Фактические линейные плотности тепловых потоков $q_1^L + q_2^L$ от подающего и обратного трубопроводов, Вт/м

$q_1^L + q_2^L$	$t_{кан}$	$(R_{из}+R_n)^{-1}$	$(R_{кан}+R_{гр})^{-1}$	$R_{н1}$	$R_{кан}$	$R_{гр}$	$b, м$	h	h/b	α_k	$d_y, м$
51,2	6,91	0,41	5,06	0,122	0,056	0,142	0,6	0,46	0,767	11	0,05
45,7	5,84	0,36	5,06	0,109	0,056	0,142	0,6	0,46	0,767	11	0,05
63,4	9,33	0,52	5,06	0,108	0,056	0,142	0,6	0,46	0,767	11	0,07
53,5	7,37	0,43	5,06	0,094	0,056	0,142	0,6	0,46	0,767	11	0,07
65,5	9,74	0,54	5,06	0,094	0,056	0,142	0,6	0,46	0,767	11	0,08
55,9	7,86	0,45	5,06	0,083	0,056	0,142	0,6	0,46	0,767	11	0,08
75,1	9,87	0,62	5,74	0,083	0,048	0,127	0,9	0,46	0,511	11	0,1
64,2	7,97	0,52	5,74	0,075	0,048	0,127	0,9	0,46	0,511	11	0,1
73,6	9,62	0,61	5,74	0,066	0,048	0,127	0,9	0,46	0,511	11	0,125
83,7	11,38	0,71	5,74	0,060	0,048	0,127	0,9	0,46	0,511	11	0,15
111,1	8,64	0,91	9,38	0,047	0,027	0,079	1,5	0,83	0,553	11	0,2
107,2	8,23	0,87	9,38	0,037	0,027	0,079	1,5	0,83	0,553	11	0,25
123,8	10,00	1,03	9,38	0,033	0,027	0,079	1,5	0,83	0,553	11	0,3
150,7	10,00	1,26	11,42	0,027	0,023	0,065	2,1	0,9	0,429	11	0,4
142,5	9,28	1,17	11,42	0,021	0,023	0,065	2,1	0,9	0,429	11	0,5
171,5	11,82	1,47	11,42	0,019	0,023	0,065	2,1	0,9	0,429	11	0,6

Определение фактических тепловых потоков для конструкций теплопроводов в пенобетонной изоляции при надземной прокладке

Тепловые потери через изолированную поверхность подающих и обратных трубопроводов тепловых сетей при надземной прокладке при известной толщине изоляции определяются по формулам [3]:

Лундышев И.А. Методика расчёта толщины слоя монолитного пенобетона, применяемого для теплоизоляции трубопроводов

$$q_{\text{пр}}^L = \frac{(t_{B1} - t_n)}{R_{\text{нар}} + R_{\text{из}}}, \quad q_{\text{обр}}^L = \frac{(t_{B2} - t_n)}{R_{\text{нар}} + R_{\text{из}}} \quad (13)$$

где $R_{\text{нар}}$ – термическое сопротивление теплоотдаче от поверхности наружной изоляции подающего и обратного трубопровода, м²С/Вт:

$$R_{\text{нар}} = \frac{1}{\pi \alpha_n (d + 2\delta_{\text{из}})}; \quad (14)$$

α_n – коэффициент теплоотдачи, принимается равным 20 Вт/(м²·°С);

$R_{\text{из}}$ – термическое сопротивление изоляции, м²С/Вт:

$$R_{\text{из}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d+2\delta_{\text{из}}}{d}. \quad (15)$$

Результаты расчётов приведены в таблице 4:

Таблица 4. Фактические линейные плотности тепловых потоков $q_1^L + q_2^L$ от подающего и обратного трубопроводов при надземной прокладке, Вт/м

$q_{\text{пр}} + q_{\text{обр}}$	$q_{\text{пр}}$	$q_{\text{обр}}$	$R_{\text{н1}}$	$R_{\text{из}}$	α_n	$d_y, \text{м}$
59,1	37,6	21,5	0,134	2,34	20	0,05
51,9	33,1	18,9	0,120	2,70	20	0,05
76,1	48,4	27,6	0,119	1,81	20	0,07
62,2	39,6	22,6	0,103	2,25	20	0,07
79,2	50,4	28,8	0,103	1,75	20	0,08
65,6	41,8	23,9	0,091	2,14	20	0,08
90,9	57,9	33,0	0,092	1,52	20	0,1
75,4	48,0	27,4	0,082	1,86	20	0,1
88,9	56,6	32,3	0,073	1,57	20	0,125
104,1	66,3	37,8	0,066	1,34	20	0,15
132,0	84,0	48,0	0,052	1,06	20	0,2
126,7	80,6	46,0	0,041	1,11	20	0,25
150,6	95,9	54,7	0,037	0,94	20	0,3
183,3	116,7	66,6	0,029	0,77	20	0,4
171,3	109,1	62,3	0,023	0,83	20	0,5
215,2	137,0	78,2	0,021	0,66	20	0,6

Вышеприведённые выкладки, формулы и расчёты подтверждают эффективность применения монолитного пенобетона в качестве опалубки трубопроводов, так как вышеприведённые толщины теплоизоляции невелики. Однако требуются дальнейшие разработки и расчеты предлагаемой технологии, что возможно принесёт уменьшение плотности применяемого монолитного пенобетона и соответственно улучшение его теплоизоляционных качеств с дальнейшим уменьшением толщины и цены предлагаемой теплоизоляции. В целом данная технология применения монолитного пенобетона имеет большие перспективы развития, особенно в условиях холодного климата.

Литература

1. СНиП 41-02-2003., «Тепловые сети», 2003.
2. Тепловая изоляция. Справочник строителя / Под ред. Г.Ф. Кузнецова. М., 1985.
3. Типовые решения прокладки трубопроводов тепловых сетей в изоляции из пенобетона «СОВБИ» диаметром Ду 50-600 мм. 313.ТС-0015.000, 2007.
4. Теплоизоляция трубопроводов и оборудования неавтоклавным монолитным пенобетоном «СОВБИ» СТО-005-50845180-2007, 2007.

**Игорь Андреевич Лундышев, Санкт-Петербург
Тел. раб.: +7(812)275-46-92, 275-46-77, 275-36-89
Эл. почта: finans@sovbi.spb.ru*