

# Энергетика

УДК 536.2.075

## РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ В ТРУБОПРОВОДАХ ПОДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКИ\*

*А.Н. Бранфилева, А.В. Еремин, Р.Ж. Габдушев, Е.М. Демкова*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: totig@yandex.ru

**Аннотация.** *Приведены результаты расчетов двух типов подземной прокладки трубопроводов тепловых сетей, укладываемых в бетонных и пенобетонных коробах: при наложении тепловой изоляции на поверхности трубы (бетонные короба) и при ее отсутствии (пенобетонные короба). Так как воздушная прослойка между трубой и корпусами коробов ввиду интенсивного конвективного теплообмена практически не влияет на потери теплоты в грунт, предлагается уменьшить габариты пенобетонных прямоугольных коробов до размеров диаметра трубы, что приводит к существенному (до 50 %) уменьшению потерь теплоты в грунт ввиду значительно меньшего коэффициента теплопроводности пенобетона по сравнению с бетоном, а также меньшей площади теплообмена с грунтом. Кроме того, уменьшаются вес конструкции, ее габариты и стоимость.*

**Ключевые слова:** *трубопроводы теплосетей, подземная прокладка, тепловая изоляция, бетонные и пенобетонные короба, потери теплоты в грунт.*

Снижение потерь теплоты при транспортировке теплоносителя по трубопроводам тепловых сетей является важной производственной проблемой. При подземной прокладке трубопроводы, покрытые тепловой изоляцией, укладываются в бетонные короба (рис. 1) [1]. Основными недостатками здесь являются большие потери теплоты, высокая стоимость, трудоемкость нанесения изоляционного покрытия, большой объем занимаемого пространства. Отметим, что нормативные потери теплоты в данном случае составляют 8–10 %. Однако в процессе многолетней эксплуатации происходит ухудшение качества тепловой изоляции,

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВО «СамГТУ» (проект № 1.5551.2017/8.9).

*Анастасия Николаевна Бранфилева (к.т.н.), ст. преподаватель кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика».*

*Антон Владимирович Еремин (к.т.н.), доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика».*

*Руслан Жамангаревич Габдушев (к.т.н.), доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика».*

*Елизавета Михайловна Демкова, студент.*

в связи с чем потери теплоты могут возрасти до 20 % и более. Поэтому весьма актуальной является проблема нахождения других способов подземной прокладки трубопроводов, отличающихся меньшими потерями теплоты, простотой конструкции и меньшей стоимостью. В настоящей работе выполнено исследование потерь теплоты в трубопроводах традиционной прокладки (см. рис. 1) и прокладки, в которой вместо бетонных коробов используются пенобетонные, но при отсутствии тепловой изоляции на поверхности трубы и при несколько увеличенной толщине пенобетона (рис. 2).

Такой способ прокладки по сравнению с традиционным отличается простотой конструкции, относительной дешевизной (ввиду отсутствия необходимости применения тепловой изоляции и замены бетона пенобетоном), сравнительно меньшим весом применяемых материалов, простотой установки и обслуживания, а также меньшим объемом занимаемого пространства. Кроме того, как показали результаты приведенных ниже исследований, потери теплоты по сравнению с традиционным способом уменьшаются на 4 %, а если в углах конструкции проложить теплоизоляционный материал, то потери тепла снизятся на 52 %.

Исходные данные для выполнения исследований были следующие:

$$d = 500 \text{ мм}; \quad A = B = 960 \text{ мм}; \quad A_1 = B_1 = 830 \text{ мм}; \quad \delta_{iz} = 50 \text{ мм}; \quad \lambda_{iz} = 0,04 \text{ Вт/(мК)};$$

$$\lambda_{bet} = 1,3 \text{ Вт/(мК)}; \quad \lambda_{pbet} = 0,1 \text{ Вт/(мК)}; \quad \lambda_{tr} = 36 \text{ Вт/(мК)}; \quad \lambda_{gr} = 1,5 \text{ Вт/(мК)}$$

$$\delta_{bet} = 80 \text{ мм}; \quad \delta_{pbet} = 160 \text{ мм}; \quad \delta_{tr} = 5 \text{ мм}; \quad t_w = 100 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_{gr} = 3 \text{ }^\circ\text{C},$$

где  $d$  – диаметр труб;  
 $A, B$  – наружные размеры стенок бетонного канала;  
 $A_1, B_1$  – наружные размеры стенок пенобетонного канала;  
 $\delta_{iz}$  – толщина слоя тепловой изоляции;  
 $\delta_{tr}$  – толщина металлической стенки трубы;  
 $\delta_{bet}$  – толщина бетонного канала;  
 $\delta_{pbet}$  – толщина пенобетонного канала;  
 $\lambda_{tr}$  – коэффициент теплопроводности стенки трубы;  
 $\lambda_{iz}$  – коэффициент теплопроводности тепловой изоляции;  
 $\lambda_{bet}$  – коэффициент теплопроводности стенки бетонного канала;  
 $\lambda_{pbet}$  – коэффициент теплопроводности стенки пенобетонного канала;  
 $\lambda_{gr}$  – коэффициент теплопроводности грунта;  
 $t_w$  – температура теплоносителя в трубе;  
 $t_{gr}$  – температура грунта.

Количество теплоты, проходящей через поверхность цилиндрической стенки в стационарном режиме, находится по формуле [2–6]

$$Q = \frac{2\lambda_{st}\pi l(t_1 - t_2)}{\ln(d_2 / d_1)}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{st}$  – коэффициент теплопроводности стенки трубы;

$l$  – длина трубы, м ;  
 $t_1, t_2$  – температуры внутренней и наружной поверхностей трубы, °С ;  
 $d_1, d_2$  – внутренний и наружный диаметры трубы, м ;  $\pi = 3,14$ .

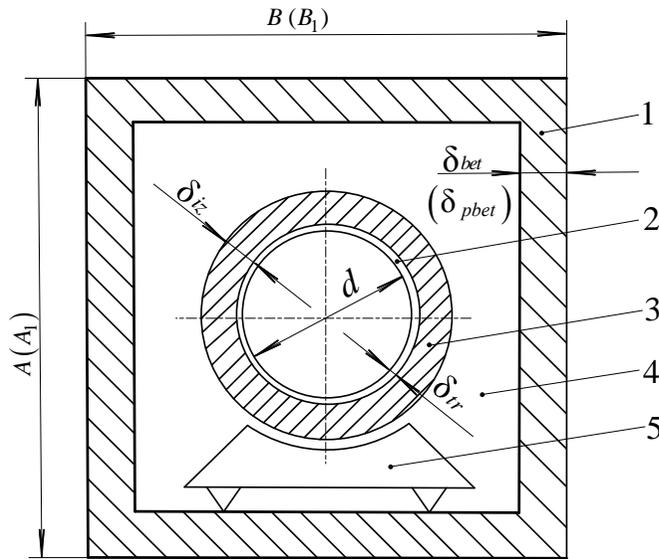


Рис. 1. Схема подземной прокладки трубы с наружной изоляцией в бетонном коробе (в скобках приведены обозначения для пенобетонного короба):

1 – прямоугольный короб; 2 – металлическая стенка трубы; 3 – слой тепловой изоляции на поверхности трубы; 4 – слой воздуха; 5 – кронштейн крепления трубы в коробе

Для удобства расчетов тепловой поток (1) относят либо к единице внутренней или наружной поверхности трубы, либо к единице ее длины. В частности, тепловой поток, отнесенный к единице длины трубы, будет

$$\frac{Q}{l} = q_l = \frac{(t_1 - t_2)}{\frac{1}{2\lambda_{st}\pi} \ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (2)$$

где  $q_l$  – линейная плотность теплового потока, Вт/м ;

$(1 / (2\pi\lambda_{st})) \ln(d_2 / d_1) = R$  – линейное термическое сопротивление цилиндрической стенки, (МК) / Вт .

Линейная плотность теплового потока для многослойной конструкции, учитывающая коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей, запишется в виде

$$q_l = \frac{(t_1 - t_{(n+1)})}{\sum_{i=1}^n R_i}, \quad (3)$$

где  $n$  – число слоев;

$R_i$ , ( $i = \overline{1, n}$ ) – термическое сопротивление  $i$ -го слоя,  $(мК) / Вт$ .  
 Формула (3) для приведенных выше исходных данных будет

$$q_l = \frac{(t_w - t_{gr})}{R}, \quad (4)$$

где  $\sum_{i=1}^n R_i = R$ ,  $(мК) / Вт$ .

При изолированном трубопроводе, находящемся в бетонном канале (см. рис. 1), потери теплоты происходят на следующих последовательно соединенных сопротивлениях:

$$R = R_w + R_{tr} + R_{iz} + R_{ext.tr} + R_{st.kan} + R_{kan} + R_{gr}, \quad (5)$$

где  $R_w$ ,  $R_{tr}$ ,  $R_{iz}$ ,  $R_{ext.tr}$ ,  $R_{st.kan}$ ,  $R_{kan}$ ,  $R_{gr}$  – термические сопротивления, соответственно: внутренней поверхности трубы, металлической стенки трубы, слоя изоляции, цилиндрической наружной поверхности трубы, внутренней поверхности бетонного или пенобетонного канала, стенки канала, грунта.

Термическое сопротивление цилиндрической внутренней поверхности трубы определяется по формуле

$$R_w = 1 / (\pi d_1 \alpha_1), \quad (6)$$

где  $\alpha_1$ ,  $Вт / (м^2 К)$  – коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности стенки трубы. Его величина зависит от скорости течения теплоносителя  $\vartheta_w$  и находится в пределах от 500 до 1500  $Вт / (м^2 К)$ .

При таких значениях  $\alpha_1$  термическое сопротивление  $R_w$  оказывается столь малым (менее 0,001  $(мК) / Вт$ ), что им можно пренебречь.

Формула для определения термического сопротивления металлической стенки трубы имеет вид

$$R_{tr} = \frac{1}{2\lambda_{tr}\pi} \ln \frac{d_2}{d_1}, \quad (7)$$

где  $d_1$  – внутренний диаметр трубы,  $м$ ;

$d_2$  – диаметр наружной поверхности стальной трубы (без учета тепловой изоляции),  $м$ .

С учетом приведенных выше исходных данных величина термического сопротивления стенки трубы составляет  $R_{tr} = 0,000085 (мК) / Вт$ . Ввиду малости  $R_{tr}$  величиной этого сопротивления также можно пренебречь.

Формула для определения термического сопротивления слоя изоляции по аналогии с (7) будет

$$R_{iz} = \frac{1}{2\lambda_{iz}\pi} \ln \frac{d_{iz}}{d_2}, \quad (8)$$

где  $d_{iz}$  – диаметр трубы со слоем изоляции,  $m$ .

Из формулы (8) получаем  $R_{iz} = 0,71277 (mK) / Bm$ .

Термическое сопротивление цилиндрической наружной поверхности стальной трубы определяется по формуле

$$R_{ext.tr} = 1 / (\pi d_{iz} \alpha_2), \quad (9)$$

где  $\alpha_2 = \alpha_{2izl} + \alpha_{2konv}$ ,  $Bm/(m^2 K)$  – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности трубы;

$\alpha_{2izl}$ ,  $\alpha_{2konv}$  – лучистая и конвективная составляющие коэффициента теплоотдачи.

Лучистая  $\alpha_{2izl}$  и конвективная  $\alpha_{2konv}$  составляющие коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности трубы определяются по формулам [1]

$$\alpha_{2izl} = c \frac{\left( \frac{t_{iz} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_f + 273}{100} \right)^4}{(t_{iz} - t_f)} \quad (10)$$

$$\alpha_{2konv} = 1,16 \sqrt[4]{(t_{iz} - t_f) / d_{iz}}, \quad (11)$$

где  $c = 4,4 Bm/(m^2 K^4)$  – коэффициент лучеиспускания;

$t_{iz}$  – температура наружной поверхности изоляции,  $^{\circ}C$ ;

$t_f$  – температура среды (воздуха), которая окружает трубопровод, находящийся в коробе.

При значениях температур теплоносителя  $t_w$ , не превышающих  $100^{\circ}C$ , величина лучистой составляющей коэффициента теплоотдачи не превышает  $8 Bm/(m^2 K)$ . Величину конвективной составляющей коэффициента теплоотдачи для трубы, расположенной горизонтально, можно принять равной  $\alpha_{2konv} = 12 Bm/(m^2 K)$ .

Отсюда находим  $\alpha_2 = 20 Bm/(m^2 K)$ . Используя полученное значение  $\alpha_2$ , по формуле (9) находим  $R_{ext.tr} = 0,0261 (mK) / Bm$ ; в случае, когда труба без изоляции плотно покрыта слоем пенобетона, сопротивление наружной поверхности трубы будет находиться как  $R'_{ext.tr} = 1 / (\pi d_2 \alpha_2) = 0,03122 (mK) / Bm$ .

Формула для определения термического сопротивления внутренней поверхности короба имеет вид

$$R_{st.kan} = 1 / (\pi d_{eqv1} \alpha_k), \quad (12)$$

где  $d_{eqv1} = P_1 / \pi$  – эквивалентный внутренний диаметр короба,  $m$ ;

$P_1$  – внутренний периметр короба,  $m$

$\alpha_k$  для внутренней поверхности короба можно принять равной  $\alpha_k = 10 Bm/(m^2 K)$ .

Используя формулу (12), находим:

– для бетонного канала  $R_{st.bet.kan} = 0,03125 (мК) / Вм$

– для пенобетонного канала  $R_{st.pbet.kan} = 0,049 (мК) / Вм$ .

Формула для определения термического сопротивления бетонного канала имеет вид

$$R_{b.kan} = \frac{1}{2\lambda_{bet}\pi} \ln \frac{d_{eqv2}}{d_{eqv1}}, \quad (13)$$

где  $d_{eqv2} = P_2 / \pi$  – эквивалентный внешний диаметр короба, м;

$P_2$  – внешний периметр короба, м.

Термическое сопротивление пенобетонного короба  $R_{pb.kan}$  находится по формуле (13), где вместо  $\lambda_{bet}$  используется  $\lambda_{pbet}$ . Значения  $R_{b.kan}$  и  $R_{pb.kan}$ , определяемые из формулы (13), будут  $R_{b.kan} = 0,0222 (мК) / Вм$  и  $R_{pb.kan} = 0,766 (мК) / Вм$ .

Тепловое сопротивление грунта определяется по формуле Форхгеймера [1]

$$R_{gr} = \frac{1}{2\lambda_{gr}\pi} \ln \frac{4h}{d_{eqv2}}, \quad (14)$$

где  $h = 1,68 м$  – глубина погружения оси трубопровода под поверхность земли.

Из формулы (14) находим:

– для бетонного канала (см. рис. 1)  $R'_{gr} = 0,18 (мК) / Вм$  ;

– для пенобетонного канала (см. рис. 2)  $R''_{gr} = 0,196 (мК) / Вм$ .

С учетом того, что составляющей  $R_w$  мы пренебрегаем ввиду ее малости, формула (5) применительно к бетонному каналу принимает вид

$$R = R_{tr} + R_{iz} + R_{ext.tr} + R_{st.bet.kan} + R_{b.kan} + R'_{gr}. \quad (15)$$

Формула (5) применительно к пенобетонному каналу принимает вид

$$R = R_{tr} + R_{iz} + R'_{ext.tr} + R_{st.pbet.kan} + R_{pb.kan} + R''_{gr}. \quad (16)$$

Таким образом, суммарные сопротивления для бетонного и пенобетонного канала будут равны соответственно  $1,0113 (мК) / Вм$  и  $1,052 (мК) / Вм$ .

Найдем потери теплоты для бетонного канала (см. рис. 1):

$$q_l = \frac{(t_w - t_{gr})}{(R_{tr} + R_{iz} + R_{ext.tr} + R_{st.bet.kan} + R_{b.kan} + R'_{gr})}. \quad (17)$$

Из формулы (17) получаем  $q_l = 95,755 Вм / м$ .

Соответственно, для пенобетонного канала

$$q'_l = \frac{(t_w - t_{gr})}{(R_{tr} + R_{iz} + R'_{ext.tr} + R_{st.pbet.kan} + R_{pb.kan} + R''_{gr})}. \quad (18)$$

Отсюда  $q'_l = 92,2 \text{ Вт} / \text{м}$ .

Таким образом, тепловые потери даже без применения изоляции на трубе по сравнению с исходной конструкцией снижаются на 4 %.

Рассмотрим вариант конструкции пенобетонного канала, в котором вместо воздушного слоя 2 (см. рис. 1) используется изоляционный наполнитель (см. рис. 2). Так как наполнитель расположен в углах конструкции и труба в четырех точках касается слоя пенобетона, то можно принять толщину слоя изоляции как усредненную эквивалентную толщину цилиндрического слоя, равную 45 мм. Эквивалентный диаметр конструкции будет  $d_{eq2} = P_2 / \pi$ , где  $P_2 = 3,32 \text{ м}$  – наружный периметр конструкции, представленной на рис. 3. Таким образом, конструкция, представленная на рис. 2, по термическому сопротивлению будет идентична конструкции, приведенной на рис. 3.

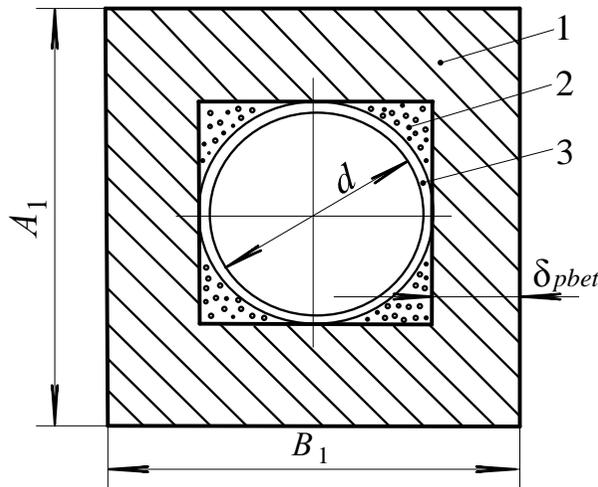


Рис. 2. Схема подземной прокладки трубы с пенобетонной изоляцией квадратного сечения:

- 1 – прямоугольный пенобетонный короб; 2 – наполнитель (минеральная вата,  $\lambda_{iz} = 0,04 \text{ Вт} / (\text{мК})$ );
- 3 – металлическая стенка трубы

Если пренебречь величиной термического сопротивления металлической стенки трубы  $R_{tr}$ , то потери тепла будут определяться по формуле

$$q''_l = \frac{(t_w - t_{gr})}{(R'_{iz} + R'_{pb.kan} + R''_{gr})} \quad (19)$$

и составят  $q''_l = 50,0 \text{ Вт} / \text{м}$ .

Таким образом, потери теплоты в пенобетонном коробе при использовании конструкции, приведенной на рис. 3, на 52 % меньше, чем в бетонном (см. рис. 1).

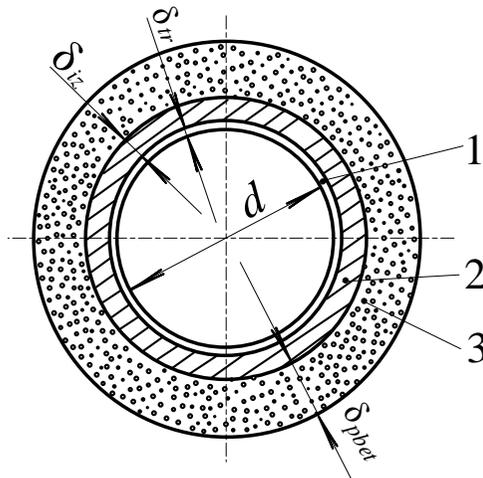


Рис. 3. Схема подземной прокладки трубы с наружной изоляцией из пенобетона: 1 – металлическая стенка трубы; 2 – слой изоляции на поверхности трубы ( $\delta_{iz} = 45 \text{ мм}$ ,  $\lambda_{iz} = 0,04 \text{ Вт/(мК)}$ ); 3 – слой пенобетона («скорлупа»),  $\delta_{bet} = 75 \text{ мм}$ ,  $\lambda_{iz} = 0,1 \text{ Вт/(мК)}$

### Выводы

1. Расчеты показали, что воздушная прослойка между трубами и коробами ввиду высокой интенсивности конвективного теплообмена и, как следствие, больших величин эквивалентных коэффициентов теплопроводности воздуха практически не влияет на потери теплоты в грунт. В связи с этим предлагается уменьшить габариты пенобетонного короба до размеров, сопоставимых с диаметром трубы, что приводит к значительному уменьшению габаритов конструкции и ее веса. Потери теплоты в этом случае уменьшаются на 4–5 % (при двукратном увеличении толщины стенки пенобетонного короба) по сравнению с бетонным (неизменной толщины).

2. Несмотря на увеличение толщины стенки, вес пенобетонного короба уменьшается вследствие уменьшения его общих габаритов, а также ввиду меньшего удельного веса пенобетона ( $\rho_{pbet} = 0,5 \text{ т/м}^3$ ) по сравнению с бетоном ( $\rho_{bet} = 2,3 \text{ т/м}^3$ ). Если пространство, заполненное воздухом, заменить слоем тепловой изоляции с  $\lambda_{iz} = 0,04 \text{ Вт/(мК)}$ , то при той же уменьшенной в размерах конструкции теплотери уменьшатся на 52 %.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 360 с.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1969. – 440 с.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
4. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1980. – 469 с.
5. Болгарский А.В., Мухачёв Г.А., Шукин В.К. Термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1975. – 495 с.

6. Прибытков И.А., Левицкий И.А. Теоретические основы теплотехники. – М.: Академия, 2004. – 464 с.

*Статья поступила в редакцию 12 января 2018 г.*

## **CALCULATION OF HEAT LOSSES IN THE UNDERGROUND LAYING OF PIPELINES**

***A.N. Branfileva, A.V. Eremin, R.Zn. Gabdushev, E.M. Demkova***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: totig@yandex.ru,

***Abstract.*** *It is the results of calculations of two types of underground laying of pipelines of heating networks laid in concrete (foam concrete) boxes. The first type is pipelines with applying thermal insulation on the surface of the pipe (concrete boxes). The second type is pipelines without this insulation (foam concrete boxes). Since the air layer between the pipe and the shells of the boxes practically does not affect to the heat losses to the ground due to intensive convective heat transfer, we propose to reduce the dimensions of foam concrete rectangular boxes to the size of the pipe diameter. It will lead to significant (up to 50%) reduction in heat losses to the ground due to a much lower coefficient of thermal conductivity of the foam concrete compared to concrete as well as a smaller area of heat exchange with the soil. In addition, the weight of the structure, its dimensions and cost are reducing.*

***Keywords:*** *pipelines of heating systems, underground laying, thermal insulation, concrete and foam concrete boxes, heat losses to the ground.*

---

*Anastasia N. Branfileva (Ph. D. (Tech)), Senior Lecturer.  
Anton V. Eremin (Ph. D. (Tech)), Associate Professor.  
Ruslan Zn. Gabdushev (Ph. D. (Tech)), Associate Professor.  
Elizabeth M. Demkova, Student.*