

Ю. В. Немировский¹, А. С. Мозгова²

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ НА УЧАСТКЕ СЛОИСТОГО ТРУБОПРОВОДА ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

¹*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

²*Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия*

Аннотация. Тепловые потери являются одним из основных показателей энергетической эффективности эксплуатации тепловых сетей и включаются в тарифы на тепловую энергию. Определение фактических тепловых потерь является важной практической задачей. Транспортные потери тепла вызывают падение температуры теплоносителя, вследствие этого удельные тепловые потери по длине трубопровода изменяются [1]. В статье рассмотрен метод определения уровня тепловых потерь на участке трубопровода тепловых сетей.

Ключевые слова: теплопроводность, тепловая сеть, тепловая изоляция, потери тепла, теплоноситель.

УДК: 539.374

1. Введение.

В системах централизованного теплоснабжения транспортировка тепла от теплоисточника до потребителей связана с потерями тепловой энергии, в том числе через тепловую изоляцию трубопроводов тепловых сетей. По опыту проведения энергетических обследований [2] величина тепловых потерь при транспортировке теплоносителя в существующих тепловых сетях составляет 15-30 % в зависимости от времени года.

Уровень тепловых потерь тепловыми сетями через теплоизоляционные конструкции в общем виде зависят от [3]:

© Немировский Ю. В., Мозгова А. С., 2017

Немировский Юрий Владимирович

e-mail: nemirov@itam.nsc.ru, доктор физико-математических наук, профессор, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, Россия.

Мозгова Анна Станиславовна

e-mail: mozgova-energo@yandex.ru, кандидат экономических наук, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 17-41-210272, 15-01-00825, 16-31-00511).

Поступила 05.06.2017

Поступила 07.03.2017

- вида теплоизоляционной конструкции и примененных теплоизоляционных материалов;
- типов прокладки (надземная, подземная канальная, бесканальная и т. п.) и их соотношений для данной тепловой сети;
- температурного режима и продолжительности работы тепловой сети в течение года;
- параметров окружающей среды;
- материальной характеристики тепловой сети и ее структуры по диаметрам и протяженности трубопроводов, по типам прокладки и видам теплоизоляционных конструкций;
- срока и условий эксплуатации тепловых сетей.

Под тепловыми потерями понимается количество теплоты, переданной от теплоносителя через теплоизоляционные конструкции в окружающую среду.

В статье трубопровод с тепловой изоляцией будем рассматривать как слоистую конструкцию трубопровода тепловых сетей.

Предположим, что трубопровод тепловых сетей, в котором протекает теплоноситель, полностью изолирован теплоизоляционным материалом, у которого коэффициент теплопроводности равен нулю. Следовательно, в этом случае температура теплоносителя, проходящая через участок трубопровода, будет постоянной и будет иметь начальную температуру. Данный случай рассматривается как идеальные условия протекания теплоносителя в трубопроводе без падения температуры теплоносителя.

Согласно закону Фурье, общее количество теплоты, протекающее за время t через конечную площадь поверхности, определяется по формуле [4]:

$$Q = - \sum_{j=1}^m \int_0^t \int_{R_j}^{R_{j+1}} \int_0^l \lambda_{jk} \frac{\partial T_j}{\partial n} dt dr dz, \quad (j = \overline{1, m}; k = r, z), \quad (1)$$

здесь $T_j = T_j(r, z, t)$ – температурное поле в j -ом слое; $\frac{\partial T_j}{\partial n}$ – частная производная от функции T_j по направлению нормали n ; λ_{jk} – коэффициенты теплопроводности вдоль осей Or и Oz соответственно; r, z – координаты; t – время; m – число слоев.

Ось слоистого трубопровода обозначим за ось Oz , тогда изотермическими поверхностями для теплопроводности будут сечения слоистого трубопровода, перпендикулярные оси Oz , нормаль к ним совпадает с осью Oz и $\frac{\partial T_j}{\partial n} = \frac{\partial T_j}{\partial z}$ ($j = \overline{1, m}$).

В реальных условиях потери тепла в трубопроводах тепловых сетей через теплоизоляцию технически неизбежны. За счет теплопроводности стенки трубопровода и теплоизоляционных материалов происходят тепловые потери, соответственно температура теплоносителя при протекании в трубопроводе падает. В этом случае количество теплоты dQ (рис.1), переданной от теплоносителя через слои трубопровода в окружающую среду, определим следующим образом [4]:

$$dQ = Q_z - Q_{z+dz}. \quad (2)$$

Здесь dQ – количество теплоты, переданной от теплоносителя через слои трубопровода в окружающую среду за единицу времени; Q_z – количество теплоты, входящее в трубопровод тепловой сети за единицу времени; Q_{z+dz} – количество теплоты, которое выходит из трубопровода тепловой сети за то же время.

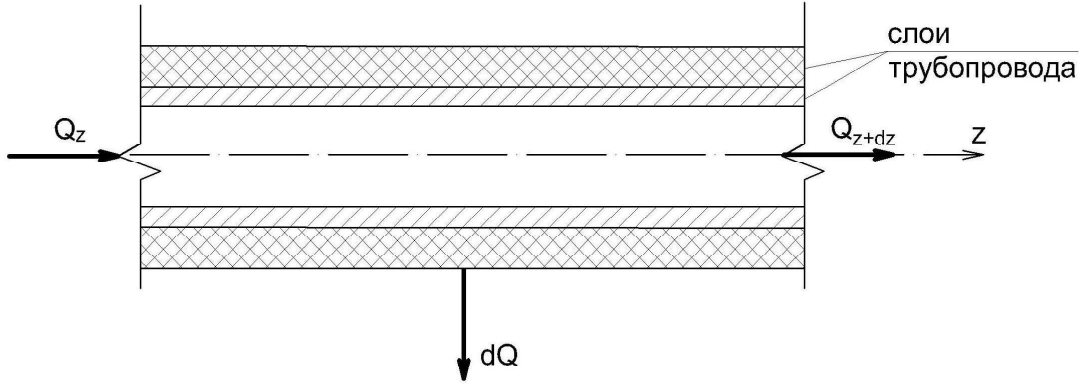


Рис. 1.

$$Q_z = - \sum_{j=1}^m \int_0^t \int_{R_j}^{R_{j+1}} \int_0^l \lambda_{jk} \frac{\partial T_j}{\partial z} dt dr dz, \quad (j = \overline{1, m}; k = r, z), \quad (3)$$

$$Q_{z+dz} = - \sum_{j=1}^m \int_0^t \int_{R_j}^{R_{j+1}} \int_0^l \lambda_{jk} \frac{\partial T_j}{\partial z} dt dr dz + \sum_{j=1}^m \int_0^t \int_{R_j}^{R_{j+1}} \int_0^l \lambda_{jk} \frac{\partial^2 T_j}{\partial z^2} dt dr dz^2, \quad (4)$$

$$(j = \overline{1, m}; k = r, z)$$

Подставив (3) и (4) в (2), получим:

$$Q = \sum_{j=1}^m \int_0^t \int_{R_j}^{R_{j+1}} \int_0^l \lambda_{jk} \frac{\partial^2 T_j}{\partial z^2} dt dr dz^2, \quad (j = \overline{1, m}; k = r, z). \quad (5)$$

Таким образом, уровень тепловых потерь на участке слоистого трубопровода тепловых сетей можно определить как разность между количеством теплоты при идеальных условиях и количеством теплоты с учетом тепловых потерь через слои трубопровода.

Для нахождения количества теплоты необходимо определить температурное поле в каждом слое трубопровода.

2. Постановка краевой задачи. Рассмотрим задачу по определению температурного поля в слоистом трубопроводе тепловых сетей с протекающей жидкостью. Решение задачи нестационарной теплопроводности слоистого трубопровода, применительно к осесимметричному случаю, состоящего из m слоев, разнородных по тепловым свойствам, при совершенном контакте на поверхности раздела слоев, сводится к решению системы уравнений [4]:

$$\frac{\partial T_j(r, z, t)}{\partial t} = a_{jr} \left(\frac{\partial^2 T_j(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_j(r, z, t)}{\partial r} \right) + a_{jz} \left(\frac{\partial^2 T_j(r, z, t)}{\partial z^2} \right) - \beta_j v_j \left(\frac{\partial T_j(r, z, t)}{\partial z} \right); \quad (6)$$

$$(t > 0; R_{j-1} \leq r < R_j; j = \overline{1, m}; 0 \leq z < l)$$

$$\beta_j = \begin{cases} 0 & \text{твердое тело;} \\ 1 & \text{жидкость.} \end{cases}$$

Здесь r и z – координаты; t – время; R_j и R_{j+1} – радиусы слоев трубопровода, ($j = \overline{1, m}$); l – длина трубопровода; m – число слоев; a_{jr} и a_{jz} – коэффициенты теплопроводности вдоль осей Or и Oz соответственно, ($j = \overline{1, m}$); v_j – скорость теплоносителя в трубопроводе, ($j = \overline{1, m}$).

В случае, когда количество теплоты протекает через боковые поверхности трубопровода, а торцевые стороны трубопровода непроницаемы для тепла, для первого и последнего слоя задаем температуры окружающей среды и закон конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Для описания процесса теплообмена используем закон Ньютона–Рихмана [4]. На границе раздела j -го и $(j + 1)$ -го слоев задаем условия идеального теплового контакта. Для решения системы (6) зададим следующие начальные и граничные условия [4]:

$$T_j(r, z, 0) = T_0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_1(R_1, z, t)}{\partial r} - H_{1r}[T_1(R_1, z, t) - T_{\text{ср}}(t)] = 0; \quad (8)$$

$$T_j(R_j, z, t) = T_{j+1}(R_j, z, t); \quad (9)$$

$$\lambda_{jr} \frac{\partial T_j(R_j, z, t)}{\partial r} = \lambda_{j+1r} \frac{\partial T_{j+1}(R_j, z, t)}{\partial r}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_m(R_m, z, t)}{\partial r} + H_{mr}[T_m(R_m, z, t) - T_{\text{окр.в.}}(t)] = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial T_1(r, 0, t)}{\partial z} = T_0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial T_1(r, l, t)}{\partial z} - H_{1z}[T_1(r, l, t) - T_{\text{ср}}(t)] = 0; \quad (13)$$

здесь $H_{1r} = \frac{\alpha_1}{\lambda_{1r}}$; $H_{mr} = \frac{\alpha_m}{\lambda_{mr}}$; $H_{1z} = \frac{\alpha_1}{\lambda_{1z}}$; α_1 и α_m – коэффициенты теплоотдачи соответственно теплоносителя и m -го слоя трубопровода; λ_{1r} , λ_{mr} и λ_{1z} – коэффициенты теплопроводности, соответственно, теплоносителя и m -го слоя трубопровода вдоль осей Or и Oz ; T_0 – начальная температура теплоносителя; $T_{\text{ср}}(t)$ – температура теплоносителя; $T_{\text{окр.в.}}(t)$ – температура окружающего воздуха.

Если количество теплоты протекает через торцевые стороны трубопровода, а боковые поверхности непроницаемы для тепла, для решения системы (6) зададим следующие начальные и граничные условия [4]:

$$T_j(r, z, 0) = T_0; \quad (14)$$

$$\frac{\partial T_j(r, 0, t)}{\partial z} - H_{jz}[T_j(r, 0, t) - T_{\text{окр.в.}}(t)] = 0; \quad (15)$$

$$\frac{\partial T_j(r, l, t)}{\partial z} + H_{jz}[T_j(r, l, t) - T_{\text{окр.в.}}(t)] = 0, \quad (16)$$

$$\frac{\partial T_1(R_1, z, t)}{\partial r} = T_{\text{ср.}}(t); \quad (17)$$

$$\frac{\partial T_m(R_m, z, t)}{\partial r} = T_{\text{окр.в.}}(t), \quad (18)$$

$$T_j(R_j, z, t) = T_{j+1}(R_j, z, t); \quad (19)$$

$$\lambda_{jr} \frac{\partial T_j(R_j, z, t)}{\partial r} = \lambda_{jr+1} \frac{\partial T_{j+1}(R_j, z, t)}{\partial r}; \quad (20)$$

здесь $H_{jz} = \frac{\alpha_j}{\lambda_{jz}}$; α_j – коэффициент теплоотдачи j -го слоя; λ_{jz} – коэффициенты теплопроводности j -го слоя вдоль оси Oz ; T_0 – начальная температура теплоносителя; $T_{\text{ср.}}(t)$ – температура теплоносителя; $T_{\text{окр.в.}}(t)$ – температура окружающего воздуха.

При идеальных условиях, когда стенка трубопровода тепловых сетей непроницаема для тепла, зададим следующие начальные и граничные условия [4]:

$$T_j(r, z, 0) = T_0; \quad (21)$$

$$\frac{\partial T_1(R_1, z, t)}{\partial r} = T_{\text{ср.}}(t); \quad (22)$$

$$\frac{\partial T_2(R_2, z, t)}{\partial r} = T_{\text{окр.в.}}(t); \quad (23)$$

$$T_1(R_1, z, t) = T_2(R_2, z, t) \quad (24)$$

$$\lambda_{1r} \frac{\partial T_1(R_1, z, t)}{\partial r} = \lambda_{2r} \frac{\partial T_2(R_2, z, t)}{\partial r}; \quad (25)$$

$$\frac{\partial T_1(r, 0, t)}{\partial z} = T_0; \quad (26)$$

$$\frac{\partial T_1(r, l, t)}{\partial z} - H_{1z}[T_1(r, l, t) - T_{\text{ср.}}(t)] = 0, \quad (27)$$

Задача теплопроводности для многослойного цилиндра без протекающей жидкости рассмотрена в статье [5].

3. Решение задачи. Приближенное решение задачи, следуя методу Л. В. Канторовича, определим среди функций вида [6]:

$$T_j(r, z, t) = T_{\text{ср.}}(t) + \sum_{j=1}^m f_j(t) \psi_j(r, z), \quad (j = \overline{1, m}) \quad (28)$$

здесь $f_j(t)$ - неизвестные функции времени; $\psi_j(r, z)$ - координатные функции.

В качестве простейшего примера рассмотрим участок слоистого трубопровода тепловых сетей с протекающей жидкостью, в случае, когда торцевые стороны трубопровода непроницаемы для тепла, а количество теплоты теряется через боковые поверхности трубопровода (рис. 2).

Координатные функции $\psi_j(r, z)$ представим в виде:

$$\psi_j(r, z) = E_{1j}(z) + E_{2j}(z)r^2, \quad (j = \overline{1, m}), \quad (29)$$

где $E_{1j}(z)$ и $E_{2j}(z)$ - неизвестные коэффициенты, определяемые из граничных условий (8)–(11).

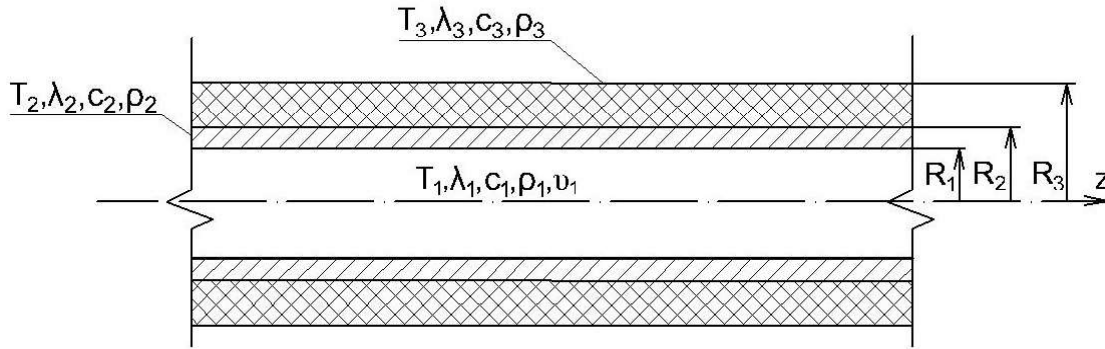


Рис. 2.

Здесь c_1 , c_2 и c_3 - удельная теплоемкость, соответственно, теплоносителя, трубопровода и теплоизоляционного материала; ρ_1 , ρ_2 и ρ_3 - плотность теплоносителя, соответственно, теплоносителя, трубопровода и теплоизоляционного материала; v_1 - скорость теплоносителя в трубопроводе.

Выделим подобласти:

$0 \leq r \leq R_1$, $0 \leq z \leq l$ - теплоноситель;

$R_1 \leq r \leq R_2$; $0 \leq z \leq l$ - стенка трубопровода;

$R_2 \leq r \leq R_3$; $0 \leq z \leq l$ - теплоизоляционный материал.

Исходя из (29), координатные функции для каждого слоя трубопровода будут иметь вид:

для теплоносителя - $\psi_1(r, z) = E_{11}(z) + E_{21}(z)r^2$;

для стенки трубопровода - $\psi_2(r, z) = E_{12}(z) + E_{22}(z)r^2$;

для теплоизоляционного материала - $\psi_3(r, z) = E_{13}(z) + E_{23}(z)r^2$,

здесь $E_{11}(z)$, $E_{21}(z)$, $E_{12}(z)$, $E_{22}(z)$, $E_{13}(z)$, $E_{23}(z)$ - неизвестные коэффициенты, определяемые из граничных условий (8)–(11).

Используя условия сопряжения (19) и (20), получим:

$$E_{11}(z) + E_{21}(z)R_1^2 = E_{12}(z) + E_{22}(z)R_1^2 \quad (30)$$

$$\lambda_1[2E_{21}(z)R_1] = \lambda_2[2E_{22}(z)R_1] \quad (31)$$

$$E_{12}(z) + E_{22}(z)R_2^2 = E_{13}(z) + E_{23}(z)R_2^2 \quad (32)$$

$$\lambda_2[2E_{22}(z)R_2] = \lambda_3[2E_{23}(z)R_2]. \quad (33)$$

Используя условия конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой (8) и (11), получим:

$$2E_{21}(z)R_1 - H_1[E_{11}(z) + E_{21}(z)R_1^2 - T_{cp}(t)] = 0 \quad (34)$$

$$2E_{23}(z)R_3 + H_3[E_{13}(z) + E_{23}(z)R_3^2 - T_{окр.в.}(t)] = 0. \quad (35)$$

Неизвестные коэффициенты из уравнений (30)–(35) выразим через $E_{21}(z)$:

$$\begin{aligned} E_{22}(z) &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2} E_{21}(z); \\ E_{23}(z) &= \frac{\lambda_1}{\lambda_3} E_{21}(z); \\ E_{11}(z) &= \frac{E_{21}(z)[2R_1 - H_1R_1^2]}{H_1} - T_{cp}(t); \\ E_{13}(z) &= \frac{E_{21}(z)[-2\frac{\lambda_1}{\lambda_3}R_3 - H_3\frac{\lambda_1}{\lambda_3}R_3^2]}{H_3} + T_{окр.в.}(t); \\ E_{12}(z) &= \frac{E_{21}(z)[2R_1 - H_1R_1^2]}{H_1} + E_{21}^2(z)R_1^2 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} E_{21}(z)R_1^2 - T_{cp}(t). \end{aligned}$$

Таким образом, получим координатные функции для каждого слоя трубопровода: для теплоносителя

$$\psi_1(r, z) = \frac{E_{21}(z)[2R_1 - H_1R_1^2]}{H_1} - T_{cp}(t) + E_{21}(z)r^2; \quad (36)$$

для трубопровода

$$\psi_2(r, z) = \frac{E_{21}(z)[2R_1 - H_1R_1^2]}{H_1} + E_{21}^2(z)R_1^2 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} E_{21}(z)R_1^2 - T_{cp}(t) + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} E_{21}(z)r^2; \quad (37)$$

для теплоизоляционного материала

$$\psi_3(r, z) = \frac{E_{21}(z)[-2\frac{\lambda_1}{\lambda_3}R_3 - H_3\frac{\lambda_1}{\lambda_3}R_3^2]}{H_3} + T_{окр.в.}(t) + \frac{\lambda_1}{\lambda_3} E_{21}(z)r^2. \quad (38)$$

Неизвестный коэффициент $E_{21}(z)$ определим из граничных условий (12)–(13).

Распределение температуры по длине трубопровода примем в виде полинома второй степени:

$$E_2(z) = z^2 + Bz + C. \quad (39)$$

Значения неизвестных коэффициентов B и C найдем из граничных условий (12)–(13):

$$B = T_{cp}(t)$$

$$C = \frac{H_1 T_{cp}(t) - 2l - T_{cp}(t) - H_1 l^2 + T_{cp}(t) l H_1}{H_1}$$

Таким образом, получим:

$$E_2(z) = z^2 + T_{cp}(t)z + \frac{H_1 T_{cp}(t) - 2l - T_{cp}(t) - H_1 l^2 + T_{cp}(t) l H_1}{H_1}. \quad (40)$$

Подставив $E_{21}(z)$ в (36)–(38), получим окончательные координатные функции для каждого слоя трубопровода.

Для нахождения неизвестных функций времени составим интеграл взвешенной невязки уравнения (6) [6]:

$$\sum_{j=1}^3 \int_{r_{j-1}}^{r_j} \int_0^l \left(\frac{\partial f_j(t)}{\partial t} \psi_j(r, z) - f_j(t) \left[a_j \left(\frac{\partial^2 \psi_j(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_j(r)}{\partial r} \right) + a_{1j} \left(\frac{\partial^2 \psi_j(r, z)}{\partial z^2} \right) - \beta_j v_j \left(\frac{\partial \psi_j(r, z)}{\partial z} \right) \right] \right) dr dz = 0. \quad (41)$$

$$(j = \overline{1, m})$$

Определяя интегралы в (41), относительно неизвестной функции времени, получим дифференциальное уравнение первого порядка.

Введем обозначение:

$$A_j = \int_{r_{j-1}}^{r_j} \int_0^l \psi_j(r, z) dr dz; \quad (j = \overline{1, m})$$

$$D_j = \int_{r_{j-1}}^{r_j} \int_0^l \left[a_j \left(\frac{\partial^2 \psi_j(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_j(r)}{\partial r} \right) + a_{1j} \left(\frac{\partial^2 \psi_j(r, z)}{\partial z^2} \right) - \beta_j v_j \left(\frac{\partial \psi_j(r, z)}{\partial z} \right) \right] dr dz; \quad (j = \overline{1, m})$$

С учетом введенных обозначений получаем следующее уравнение:

$$A_j f'(t) - D_j f(t) = 0 \quad (42)$$

Решая уравнение (42), получим:

$$f_j(t) = C_j \exp\left(\frac{D_j}{A_j} t\right), \quad (43)$$

здесь C_j – постоянная интегрирования, определяемая из начального условия (7).

Тогда соотношение (28) примет вид:

$$T_j(r, z, t) = \sum_{j=1}^3 C_j \exp\left(\frac{D_j}{A_j} t\right) \psi_j(r, z). \quad (44)$$

Для определения постоянной интегрирования найдем интеграл взвешенной невязки начального условия

$$\int_{r_{j-1}}^{r_j} \int_0^l \left(C_j \psi_j(r, z) \exp\left(\frac{B}{A} \cdot 0\right) - T_0 \right) dr dz = 0. \quad (45)$$

После нахождения постоянных интегрирования температурное поле определим из уравнения (44). Таким же образом определяется температурное поле в слоях идеального трубопровода при граничных условиях (22)–(27).

Количество теплоты, переданной от теплоносителя через слои трубопровода в окружающую среду определим по формуле (5), количество теплоты в трубопроводе при идеальных – определим по формуле (1).

Уровень тепловых потерь на участке слоистого трубопровода тепловых сетей определим как разность между количеством теплоты при идеальных условиях и количеством теплоты с учетом тепловых потерь через слои трубопровода.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Козин В. Е., Левина Т. А., Марков А. П., Пронина И. Б., Слемзин В. А. Теплоснабжение: учебное пособие для студентов вузов. Т. 34. М.: Высш. школа, 1980. 408 с.
- [2] Мозгова А. С., Суриков А. В. Энергетическое обследование котельных и тепловых сетей // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы III Международной (IX Всероссийской) конференции НАСКР-2016. Чебоксары, 2016. С. 474–480.
- [3] РД 153-34.0-20.523-98. Часть II. Методические указания по составлению энергетической характеристики водяных тепловых сетей по показателю тепловые потери.
- [4] Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высш. школа, 2001. 550 с.
- [5] Немировский Ю.В., Мозгова А. С. Теплопроводность конструкционного элемента космического аппарата в виде многослойного цилиндра // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2017. № 1 (31). С. 49–54.
- [6] Кудинов В. А., Карташов Э. М., Калашников В. В. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций: учебное пособие для вузов. М.: Высш. школа, 2005. 430 с.

Yu. V. Nemirovsky¹, A. S. Mozgova²

DEFINITION OF THERMAL LOSSES ON THE SITE OF THE LAYERED PIPELINE OF HEAT NETWORKS

¹*Institute of Theoretical and Applied Mechanics S. Christianovich Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

²*I. Ulianov Chuvash State University, Cheboksary, Russia*

Abstract. Thermal losses are one of the main rates of energy efficiency of heat networks and included in the tariffs for thermal energy. The determination of the actual thermal loss is an important practical task. Transport thermal loss as cause the temperature drop of the heat carrier, therefore the specific heat losses along the length of the pipeline change [1]. The article describes the method of determining the level of thermal losses in the pipeline section of heat networks.

Keywords: thermal conductivity, heat network, thermal isolation, thermal losses, heat carrier.

REFERENCES

- [1] Kozin V.E., Levina T.A., Markov A.P., Pronina I.B., Slemzin V.A. Teplosnabzheniye: Manual for students of higher education institutions. M.: Vyssh. school, 1980. 408 p. (in Russian).
- [2] Mozgova A. S., Surikov A. V. Power inspection of boiler and thermal networks // New in architecture, design of building constructions and reconstruction: materials III International (IX All-Russian) NASKR-2016 conferences. Cheboksary. 2016. P. 474–480. (in Russian).
- [3] RD 153-34.0-20.523-98. Part II. Methodical instructions on drawing up the power characteristic of water thermal networks on an indicator thermal losses. (in Russian).
- [4] Kartashov E. M. Analytical methods in the theory of heat conductivity of solid bodies. M.: Vyssh. shk., 2001. 550 p. (in Russian).
- [5] Nemirovsky Yu. V., Mozgova A. S. The Thermal conductivity of a constructional element of the spacecraft in the form of the multilayered cylinder//the Bulletin of the Chuvash state pedagogical university I. Yakovleva. Series: Mechanics of a limit state. 2017. №. 1 (31). P. 49–54. (in Russian).
- [6] Kudinov V. A., Kartashov E. M., Kalashnikov V. V. Analytical solutions of problems of a heatmass transfer and thermoelasticity for multilayered designs: manual for higher education institutions. M.: Vyssh. shk., 2005. 430 p. (in Russian).

Nemirovsky Yuri Vladimirovich

e-mail: nemirov@itam.nsc.ru, Dr. Sci. Phys. & Math., Professor, Institute of Theoretical and Applied Mechanics S. Christianovich Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.

Mozgova Anna Stanislavovna

e-mail: mozgova-energo@yandex.ru, Candidate of Economic Sciences, I. Ulianov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.