

УДК 699.86:697.341

Подкопай Виктория Николаевна, мл. науч. сотр., e-mail: vivpo@yandex.ua**Ганжа Антон Николаевич**, д-р техн. наук, проф.Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина.
Ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002, e-mail: ganza_371@ukr.net**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ И ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ТРУБОПРОВОДАМИ ТЕПЛОТРАСС С УЧЕТОМ ФАКТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИХ ИЗОЛЯЦИИ**

Предложено аналитическое решение математической модели определения фактических тепловых потерь через изоляцию трубопроводов с учетом повреждения изоляционного слоя. Построен алгоритм определения результирующего теплового потока для всего трубопровода с поврежденной изоляцией с учетом доли повреждений и их количества. Это позволяет проводить экспертную оценку тепловых потерь. Найдены зоны влияния поврежденного участка на величину теплопотерь, установлены коэффициенты увеличения тепловых потоков.

Підкопай Вікторія Миколаївна, мол. наук. співроб., e-mail: vivpo@yandex.ua**Ганжа Антон Миколайович**, д-р техн. наук, проф.Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.
Вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002, e-mail: ganza_371@ukr.net**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ТА ЕКСПЕРТНА ОЦІНКА ТЕПЛОВИХ ВТРАТ ТРУБОПРОВОДАМИ ТЕПЛОТРАС З УРАХУВАННЯМ ФАКТИЧНОГО СТАНУ ЇХ ІЗОЛЯЦІЇ**

Запропоновано аналітичне рішення математичної моделі визначення фактичних теплових втрат через ізоляцію трубопроводів з урахуванням пошкодження ізоляційного шару. Побудовано алгоритм визначення результирующего теплового потоку для всього трубопроводу з пошкодженою ізоляцією з урахуванням частки ушкоджень та їх кількості. Це дозволяє проводити експертну оцінку теплових втрат. Знайдено зони впливу пошкодженої ділянки на величину тепловтрат, встановлені коефіцієнти збільшення теплових потоків.

Podkopay Viktoriya Nikolaevna, JRF, e-mail: vivpo@yandex.ua**Ganza Anton Nikolayevich**, D-r Sci. Eng., Prof.

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine. Frunze st, 21, Kharkov, Ukraine, 61002, e-mail: ganza_371@ukr.net

SIMULATION OF THERMAL STATE AND EXPERT EVALUATION OF HEAT LOSSES OF HEATING MAINS PIPELINE BASED ON THE ACTUAL CONDITIONS OF THEIR INSULATION

An analytical solution of the mathematical model for determining the actual heat loss through the insulation of pipelines with a damage of the insulating layer is proposed. The algorithm for determining the resulting heat flow for the entire pipeline with damaged insulation is constructed, taking into account the share of damages and their quantity. This allows to spend the expert evaluation of heat loss. The zones of influence the damaged area on the value of heat loss are found, the coefficients of increase of heat flow are set.

Постановка проблемы

Одной из основных проблем в коммунальной теплоэнергетике Украины является определение и прогнозирование потерь тепловой энергии в окружающую среду при транспортировании теплоносителя к потребителям. Большинство трубопроводов тепловых сетей и их изоляция во многих населенных пунктах Украины давно изношены. Они представляют собой значительно разветвленную систему, а длина участков теплотрасс и магистралей большого диаметра может достигать 10 км и более. Без установки приборов учета тепловой энергии у всех потребителей (т. е. зданий) без исключения определить реальные тепловые потери сети является довольно трудоемкой задачей.

Изучению определения тепловых потерь с учетом физического износа теплоизоляционной конструкции посвящены работы ученых Томского Политехнического университета: Кузнецова, Озеровой, Половникова, Рахимовой, Хузеева, Цыганковой и др.

[1–3]. Ученые акцентируют внимание на учете неоднородности теплоизоляции и ее повреждения по длине трубопровода, факторов эксплуатации, увлажнения и деформации слоя изоляции. В работах в основном рассматриваются одномерные задачи или определение двумерного температурного поля и фактических тепловых потоков в поперечном сечении к оси характерного поврежденного участка изоляции. Но при этом не учитывается двухмерность температурного поля поврежденного слоя изоляции по длине (т. е. вдоль оси) трубопровода. Поэтому целью данной работы является разработка методики определения и экспертной оценки тепловых потерь трубопроводами теплотрасс с учетом фактического состояния их изоляции и распределения характерных повреждений по их длине.

При проведении натурных обследований трубопроводов (особенно теплотрасс, проложенных на открытом воздухе) удастся выяснить характер повреждения их теплоизоляции. А значит можно построить геометрическую модель участка с характерным для данной сети повреждением изоляции. Для решения задачи проводится отдельное математическое моделирование температурного состояния участка поврежденного слоя изоляции с определением теплового потока через него. Далее находятся коэффициенты увеличения теплового потока по отношению к исходному неповрежденному участку. При равномерном распределении характерных повреждений по общей длине трубопровода зная границы влияния повреждения, долю повреждения изоляции и количество повреждений на трубопроводе, можно определить реальный тепловой поток с наружной поверхности трубопроводов в т. ч. и коэффициент увеличения тепловых потерь на участке теплотрассы по отношению к нормативным.

Исходя из вышеизложенного основные задачи работы: аналитическое решение математической модели определения фактических тепловых потерь характерных поврежденных участков. Создание списка характерных повреждений изоляции и их характеристик (тепловые потоки и коэффициенты их увеличения, зоны влияния повреждения) для различных типоразмеров труб. Эти данные будут использоваться для определения, прогнозирования и экспертной оценки тепловых потерь участков теплотрасс, подвергшихся натурному обследованию и осмотру.

Математическая модель, алгоритм и методика расчета представлены ниже. На рис. 1. приведена характерная схема поврежденного участка.

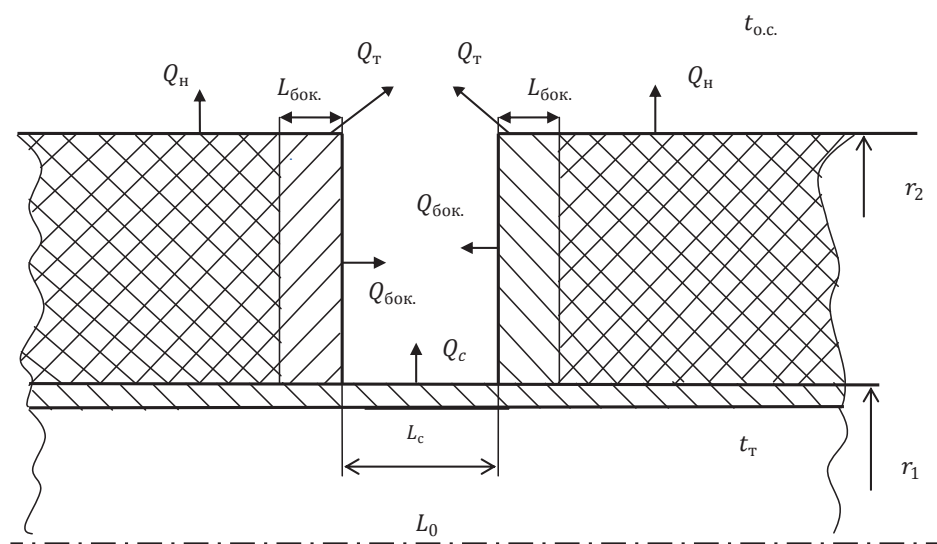


Рис. 1. Модель трубопровода с участком повреждения изоляции

Для схемы, приведенной на рис. 1, решается двумерная краевая задача нахождения поля температур t в слое и на поверхности участка трубы с поврежденной изоляцией с граничными условиями 3 рода и дифференциальным уравнением теплопроводности в

цилиндрических координатах (при условии постоянства теплофизических свойств слоя изоляции и замене $v = t - t_0$):

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0. \quad (1)$$

Граничные условия записываем в виде (см. рис.1):

а) снаружи трубы на слое изоляции ($r = r_2$)

$$-\lambda \frac{\partial v}{\partial r} - \alpha_H v = 0; \quad (2)$$

б) снаружи трубы на углублении слоя поврежденной изоляции или оголенной трубе ($r = r_c$)

$$-\lambda \frac{\partial v}{\partial r} - \alpha_C v = 0; \quad (3)$$

в) снаружи трубы на боковом срезе поврежденной изоляции ($x = 0$)

$$\lambda \frac{\partial v}{\partial x} - \alpha_B v = 0; \quad (4)$$

г) внутри трубы с учетом термического сопротивления стенки трубы ($r = r_1$)

$$-\lambda \frac{\partial v}{\partial r} + \alpha_B v = \alpha_B \cdot (t_T - t_0), \quad (5)$$

где α_H , α_C , α_B и α_B – коэффициенты теплоотдачи к воздуху снаружи слоя изоляции, углублению повреждения изоляции (оголенном участке), на боковом срезе и от воды внутри трубы (эквивалентный с учетом термического сопротивления стенки).

t_T – температура теплоносителя, °С; t_0 – температура окружающей среды, °С.

Граничное условие теплообмена внутри трубы (5) является неоднородным, а все остальные – однородными.

Предложено решение искать аналитическим путем в виде суммы частных аналитических решений с учетом граничных условий. Представляя общее решение данного уравнения в виде частных решений [4] с учетом весовых коэффициентов и подставляя в граничные условия получим:

$$v = \sum_{k=1}^n a_k \cdot v_k, \quad v_k = \left(c_k \cdot I_0 \left(\frac{k \cdot \pi}{l} \cdot r \right) + K_0 \left(\frac{k \cdot \pi}{l} \cdot r \right) \right) \cdot \left(\sin \left(\frac{k \cdot \pi}{l} \cdot x \right) + b_k \cdot \cos \left(\frac{k \cdot \pi}{l} \cdot x \right) \right), \quad (6)$$

где k – текущий индекс (целое положительное число);

n – количество частных решений (т. е. членов бесконечного ряда, что определяется сходимостью);

a_k – весовой коэффициент решения (из граничного условия (5) и разложения его правой части в ряд Фурье);

b_k и c_k – коэффициенты, которые получаются из граничных условий (4) и (2);

I_0 и K_0 – модифицированные функции Бесселя и Ганкеля первого рода (т.е. от мнимого аргумента) нулевого порядка;

l – длина участка разложения решения.

На рис. 2 представлен пример решения задачи нахождения поля температур для участка трубопровода $\varnothing 273$ мм и толщиной слоя изоляции $\delta = 40$ мм. (на длине от оголенного участка). Температура окружающего воздуха $0,2$ °С, теплоносителя – $61,3$ °С. Как видно из рис. 2 поле температур в зоне повреждения неоднородно. Влияние повреждения распространяется на длину $\approx 0,2$ м от повреждения. Вне этой длины поле

температур есть одномерным и можно считать теплопередачу как для неповрежденной изоляции. Подобные исследования были проведены при разных граничных условиях и для других диаметров трубопровода.

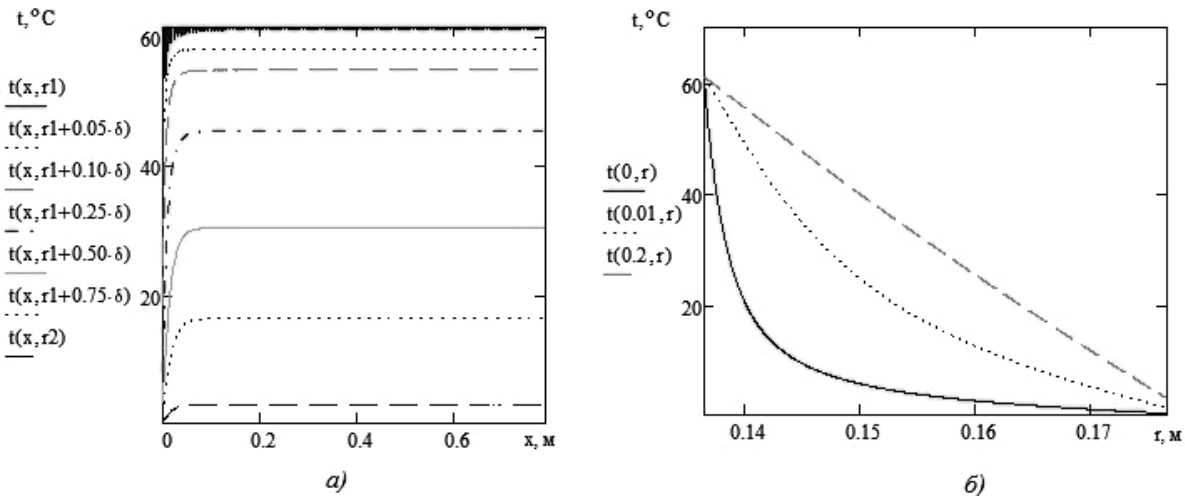


Рис. 2 Пример поля температур слоя изоляции в разрезе поврежденного участка: а) – по длине трубы на различных радиусах; б) – по радиусу на различной длине

При проведении математического моделирования найдена зона влияния повреждения и теплопередачи через боковые поверхности поврежденного изоляционного слоя трубы на тепловой поток $L_{бок}$ (см. рис. 1). Установлено, что при диаметрах труб от 32 мм до 273 мм и стандартных толщинах изоляции в 40 мм из минеральной ваты эта зона влияния составила 0,2 м в обе стороны от повреждения, и 0,32 м при толщине изоляции 60 мм для больших диаметров труб. Выявлено, что эти значения не зависят от температурных и граничных условий.

Для поиска результирующего теплового потока с участка трубопровода с поврежденной изоляцией (см. рис. 1) также используется математическое моделирование. Тепловые потоки с поверхностями повреждения определяются путем интегрирования решения (6) на границах участка:

Q_T – тепловой поток с "торцевой" части на длине влияния повреждения, Вт

$$Q_T = 2\pi r_2 \int_0^{L_{бок}} \alpha_T \nu dx \tag{7}$$

$Q_б$ – тепловой поток с "боковых" поверхностей в разрезе повреждения, Вт

$$Q_б = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r \alpha_б \nu dr \tag{8}$$

Кроме того рассчитываются:

Q_c – тепловой поток с оголенного участка трубы с учетом граничных условий (3) и (5), Вт

$$Q_c = k_c (t_T - t_{o.c.}) L_c \tag{9}$$

Q_{H0} – нормативный тепловой поток, определенный по нормам плотности теплового потока q_{H0} [5] с учетом разности температур теплоносителя и окружающей среды

$$Q_{H0} = q_{H0} L_0 \tag{10}$$

Q_H – тепловой поток при заданной нормативной толщине изоляции $\delta = 40$ мм, или

$\delta = 60$ мм [6] (т. е. с неповрежденных участков)

$$Q_H = q_H L_H, \quad (11)$$

где L_0 – полная длина рассматриваемого участка трубопровода, м; L_C – участок оголенной трубы, м; L_H – длина участка трубопровода без оголенной трубы и зон влияния повреждения, м;

q_H – линейный тепловой поток с неповрежденного участка, Вт/м, $q_H = k_H(t_T - t_{o.c.})$;

k_C и k_H – линейные коэффициенты теплопередачи через оголенный участок и через неповрежденный участок (с полным слоем изоляции).

В итоге фактические тепловые потери поврежденного участка трубопровода

$$Q_\Phi = Q_C + Q_T + Q_{бок}. \quad (12)$$

Суммарные тепловые потери с участка трубопровода

$$Q_\Phi = \sum Q_H + \sum Q_C + \sum Q_T + \sum Q_{бок}. \quad (13)$$

В разработанной методике рассчитываются необходимые коэффициенты:

а) увеличения теплового потока с оголенного участка трубопровода

$$K_{Lc} = \frac{q_C}{q_H} = \frac{k_C(t_T - t_{o.c.})}{k_H(t_T - t_{o.c.})} = \frac{k_C}{k_H}; \quad (14)$$

б) увеличения теплового потока на участке влияния повреждения

$$K_{бок} = \frac{Q_T + Q_{бок}}{q_H L_{бок}}, \quad (15)$$

где $L_{бок}$ – зона влияния участка повреждения, м;

в) Коэффициент увеличения (уменьшения) нормативного теплового потока при заданной толщине слоя изоляции

$$K_\delta = \frac{q_H}{q_{H0}}. \quad (16)$$

Результирующий коэффициент увеличения теплового потока для всего трубопровода теплотрассы по сравнению с нормативным:

$$K_{из.н.} = \frac{Q_\Sigma}{q_H L_0} = 1 + K_{повр.} n_{повр.} (K_{Lc} - 1) + n_{повр.} (K_{бок} - 1) \frac{L_{бок}}{L_0}, \quad (17)$$

где $K_{повр.}$ – доля повреждений;

$n_{повр.}$ – количество повреждений.

Если необходимо рассчитать результирующий коэффициент увеличения теплового потока для всего трубопровода теплотрассы по отношению к нормативному тепловому потоку, определенному по нормам плотности с учетом температурных условий работы сети, $K_{из.н.}$ необходимо умножить еще и на K_δ .

В качестве примера рассмотрена модельная задача на участке подающего трубопровода $\varnothing 273$ мм и толщиной слоя изоляции $\delta = 40$ мм. Распределение температур в интервале $L_{бок} = 0,2$ м для одного повреждения на этом участке приведено на рис. 2. При обследовании выявлено, что доля повреждения изоляции трубопровода составила $K_{повр.} = 0,15$, а количество повреждений на общей длине $n_{повр.} = 10$. В результате математического моделирования рассчитаны необходимые коэффициенты: $K_{Lc} = 15,8681$,

$K_{\text{бок}} = 1,2936$, $K_{\delta} = 1,0269$. Результирующий коэффициент увеличения нормативного теплового потока $K_{\text{из.н.}}$ (17) для данных температурных условий работы (т. е. с учетом K_{δ}) составил 3,3292.

Проведенные экспериментальные и численные исследования аналогичных задач подтвердили правильность аналитического решения предложенной модели.

Вывод

Разработанные математические модели и методы позволяют оценить и прогнозировать реальные тепловые потери через изоляцию трубопроводов при передаче теплоносителя с учетом фактического состояния изоляции при эксплуатации трубопроводов тепловых сетей. Их достаточно легко использовать для других условий работы сети, исследовать влияние наиболее весомых факторов на тепловые потери, а также для выбора рациональных параметров работы тепловой сети и нормирования тепловых потерь.

Список использованной литературы:

1. Половников В. Ю. Численный анализ тепловых потерь теплопроводов в условиях деформации и нарушения целостности слоя тепловой изоляции / В.Ю. Половников, Ю.Н. Рахимова // Теплофизические основы энергетических технологий: II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, 06 – 08 октября 2011 г. : сб. науч. трудов. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2011 – С. 296–300.
2. Цыганкова Ю. С. Оценка транспортных потерь тепловой энергии через теплоизоляционные конструкции трубопроводов тепловых сетей : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.14.06 "Промышленная теплоэнергетика" / Цыганкова Ю. С. – Красноярск, 2012. – 19 с.
3. Кузнецов Г. В. Оценка фактических потерь тепла при транспортировке теплоносителя с учетом технического состояния и реальных условий эксплуатации тепловых сетей / Г. В. Кузнецов, И. П. Озерова, В. Ю. Половников, Ю. С. Цыганкова // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4.– С. 56 – 60.
4. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн ; под общ. ред. И. Г. Арамановича. – М. : Наука, 1978. – 832 с.
5. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных и паровых тепловых сетях: РД 34.09.255 (МУ 34-70-080-84) – М. : – Союзтехэнерго. – 1985. – 72 с.
6. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов: : СНиП 2.04.14-88. – Официальное издание. – М. : Госстрой СССР, 1989.

Referenses:

1. Polovnikov V. Y. Numerical analysis of heat loss of the pipelines in the conditions of deformation and breaking the integrity of the thermal insulation layer [Chislennyiy analiz teplovyih poter teploprovodov v usloviyah deformatsii i narusheniya tselostnosti sloya teplovoy] / V. Y. Polovnikov, Rakhimova Y. N. // Thermophysical basics of energy technology: II All-Russian scientific practical conference with international participation, 06 – 08 October, 2011 : the collection of scientific papers – Tomsk : National Research Tomsk Polytechnic University, 2011 – P. 296 – 300.
2. Tsygankova Y. S. The assessment of transport of heat loss through the thermal insulation constructions of heat pipelines : author's abstract of dissertation for the scientific degree of candidate of technical sciences: speciality 05.14.06 "Industrial heat and power" [Otsenka transportnyih poter teplovyoy energii cherez teploizolyatsionnyie konstruktssii truboprovodov teplovyih setey : avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tehn. nauk : spets. 05.14.06 "Promyishlennaya teploenergetika"]/ Y.S. Tsygankova – Krasnoyarsk, 2012. – 19 p.
3. Kuznetsov G. V. The evaluation of actual heat loss during transport heat transfer medium taking into account technical condition and real conditions of the operation of heat networks / G. V. Kuznetsov, I. P. Ozerova, V. Y. Polovnikov, Y. S. Tsygankova [Otsenka fakticheskikh poter tepla pri transportirovke teplonositelya s uchetom tehnikeskogo sostoyaniya i realnyih usloviy ekspluatatsii teplovyih setey]// Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. – 2011. – V. 319. – № 4. – P. 56 – 60.
4. Korn G. Mathematical Handbook [Spravochnik po matematike] / G. Korn, T. Korn ; under the general editorship I.G. Aramanovicha. – M : Science, 1978. - 832 p.
5. Methodological guidelines for the definition of heat loss in water and steam heating networks: RD 34.09.255 (MU 34-70-080-84) [Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu teplovyih poter v vodyanyih i parovyih teplovyih setyah: RD 34.09.255 (MU 34-70-080-84) – M : Soyuztehenenergo. – 1985. – 72 p.
6. Thermal insulation of the equipment and pipelines: CNaR^{2.04.14-88} - Official edition. [Teplovaya izolyatsiya oborudovaniya i truboprovodov: : SNiP 2.04.14-88. – Ofitsialnoe izdanie] – M. : State Building of USSR, 1989.

Поступила в редакцию 02.03 2015 г.