



УДК 699.866:697.986

DOI: 10.31388/2220-8674-2018-2-30

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ТРУБОПРОВІДІВ

Стручаєв М. І., к.т.н.,

Стьопін Ю. О., к.т.н.,

Гулевський В. Б., к.т.н.,

Постол Ю. О., к.т.н.,

Левченко Д. В., інженер

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

E-mail: usun105@gmail.com

**Анотація** – стаття присвячена дослідженню теплоізоляції трубопроводів, відбиваюча поверхня яких влаштована різними способами, запропонована методика розрахунку та конструкція компактних теплоізоляційних елементів на прикладі зменшення втрат енергії в трубопроводах для нагрітої рідини. Приведені експериментальні дані дослідження ефективності теплоізоляції сталевих повітряних трубопроводів. Метою дослідження є встановлення можливості підвищення ефективності теплоізоляції трубопроводів шляхом визначення її оптимального розташування. Для досягнення цієї мети поставлені такі завдання: запропонувати методику розрахунку теплових втрат з урахуванням радіаційної складової; перевірити відповідність теоретичних розрахунків фактичним значенням температур поверхні зовнішнього шару теплоізоляції при різному розташуванні. Методика дослідження заснована на модифікованому методі вивчення процесу втрати тепла. Визначено теплові втрати горизонтального сталевого трубопроводу, утепленого покриттям з алюмінієвої плівки, зверненого назовні і зверненого всередину. Температура в трубі підтримувалася за допомогою електричного нагрівача. Визначено температури поверхні зовнішнього шару теплоізоляції при різному розташуванні. Експерименти проводилися при температурі навколишнього середовища 20°C. Кожні 10 хвилин температуру нагрівання реєстрували. Постійна температура досягалася через 40 хвилин після початку досліджень. Запропонована методика розрахунку теплових втрат з урахуванням радіаційної складової може бути використана при проектуванні теплоізоляції трубопроводів. Перевірено відповідність теоретичних розрахунків фактичним значенням температур поверхні зовнішнього шару теплоізоляції при різному розташуванні. Теплові втрати горизонтального сталевого трубопроводу теплоізолізованого з покриттям алюмінієвою плівкою, зверненої всередину зменшились на 10 відсотків, в порівнянні з тепловими втратами горизонтального сталевого трубопроводу теплоізолізованого з покриттям алюмінієвою плівкою, зверненої зовні. Проведені дослідження вказують, що доцільно теплоізоліувати трубопроводи, встановлюючи шар ізоляції в бік поверхні трубопроводів, а не навпаки. В цьому випадку температура теплоносія становить від 3 до 5°C вище, що дозволить в підсумку заощаджувати енергію.

**Ключові слова** – енергозбереження, теплоізоляція трубопроводів, теплопровідність, втрати енергії, компактні теплоізоляційні елементи.



*Постановка проблеми.* Істотна роль у вирішенні проблеми економії теплової енергії належить високоефективній тепловій ізоляції [1,2,3]. Теплова ізоляція трубопроводів забезпечує зниження енерговитрат на опалення будівель і споруд [4]. Однак умови експлуатації теплової ізоляції накладають особливі вимоги. Тому пошук шляхів підвищення ефективності її використання грає важливу роль, оскільки це дозволяє протягом тривалого часу знижувати втрати теплоти.

*Аналіз останніх досліджень.* Теплоізоляційні матеріали, призначені для трубопроводів, представлені матами-мінераловатними, виробами зі скловолокна, крім того, для ізоляції трубопроводів з температурою до 130 °С застосовуються шкаралупи з важкогорючого фенольно-резольного пінопласту ФРП-1 [5]. Для ізоляції трубопроводів використовують, також, одержані формуванням: циліндри, напівциліндри, сегменти з мінеральної та скляної вати [6]. Досить докладно властивості теплоізоляційних матеріалів досліджені в роботі Щербак А. С. [8], в тому числі спіненого скловолокна, в роботі Schill F. [7], а технологія теплоізоляції трубопроводів викладена в роботі Лундишева А. І. [9].

Як відомо, ефективність теплоізоляції трубопроводів залежить від термічного опору осередків пористого або волоконного матеріалу. Для теплоізоляції найбільш прийнятними є ті теплоізоляційні матеріали, у яких низький коефіцієнт теплопровідності. У той же час недостатньо вивчені питання оптимізації теплоізоляції трубопроводів, які зводяться до знаходження не тільки матеріалу, але і його розташування, при якому загальний коефіцієнт теплопередачі багатосарової конструкції з послідовно розташованими шарами, був би мінімальним.

*Постановка завдання.* Метою дослідження є встановлення можливості підвищення ефективності теплоізоляції трубопроводів шляхом визначення її оптимального розташування.

Для досягнення цієї мети поставлені такі завдання:

1. Запропонувати методіку розрахунку теплових втрат з урахуванням радіаційної складової.
2. Перевірити відповідність теоретичних розрахунків фактичним значенням температур поверхні зовнішнього шару теплоізоляції при різному розташуванні.

*Основна частина.* Теплообмін між гарячою водою та атмосферним повітрям крізь стінку труби, яка їх розділяє та теплоізоляційного матеріалу здійснюється тепло передачею. При цьому теплота від води до стінки труби і від поверхні зовнішнього шару теплоізоляції передається тепловіддачею, або радіаційно - конвективним теплообміном, а через стінку і шарами теплоізоляції –



теплопровідністю. Досліджено два варіанти розташування: коли з алюмінієвої плівки зроблений зовнішній шар теплоізоляції, та коли з алюмінієвої плівки зроблено внутрішній шар теплоізоляції.

Загальний коефіцієнт теплопередачі багат шарової теплоізоляції трубопроводу з послідовно розташованими шарами розраховують за формулою:

$$k_0 = 1/R_0 = 1/(R_H + \Sigma R_i + R_B) + R_{из}, \quad (1)$$

де  $R_0$  - загальний опір теплопередачі багат шарової конструкції,  $(m^2 \cdot K) / W$ ;

$R_H, R_B$  - опір тепловіддачі відповідно з зовнішньої і внутрішньої сторони,  $m^2 \cdot K / W$ ;  $R_H = 1/\alpha_H, R_B = 1/\alpha_B$ ;

$R_i$  - опір теплопровідності  $i$ -го шару,  $m \cdot K / W$ ;  $R_i = \delta_i / \lambda_i$ ;

$R_{из}$  - опір теплопровідності теплоізоляційного шару,  $m^2 \cdot K / W$ ;  
 $R_{из} = \delta_{из} / \lambda_{из}$ ;

$\alpha_H$  и  $\alpha_B$  - коефіцієнти тепловіддачі із зовнішньої і внутрішньої сторони відповідно,  $W / (m^2 \cdot K)$ ;

$\delta_i$  - товщина шарів,  $m$ ;

$\lambda_i$  - коефіцієнт теплопровідності шарів конструкції,  $W / (m \cdot K)$ ;

$\delta_{из}$  - товщина теплоізоляційного шару,  $m$ ;

$\lambda_{из}$  - коефіцієнт теплопровідності ізоляційного шару,  $W / (m \cdot K)$ .

Визначимо кількість теплоти, що втрачається за секунду горизонтальним не теплоізолюваним сталевим трубопроводом, діаметром 50 мм, висотою 1 метр, температура зовнішньої поверхні труби 60 °С, а температура атмосферного повітря 5 °С.

Коефіцієнт тепловіддачі із зовнішньої сторони труби  $\alpha$  для вертикального сталевого трубопроводу визначимо за формулою (2) вибравши в якості лінійного розміру діаметр:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}, \quad (2)$$

де  $Nu$  - критерій Нуссельта;

$\lambda$  - теплопровідність повітря,  $W / (m \cdot K)$ ;

$d$  - діаметр труби,  $m$ .

Критерій Нуссельта визначали за формулою (3) [1]:



$$Nu = 0.50 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_n}\right)^{0.25} \quad (3)$$

Критерій Грасгофа визначали за формулою (4), також вибравши в якості лінійного розміру діаметр:

$$Gr = \frac{\beta_t \cdot g \cdot d^3 \cdot \Delta t}{\nu^2} \quad (4)$$

$$Gr = 9.81 \cdot 0.05^3 \cdot (60-5) \cdot 10^{12} / (293 \cdot 15^2) = 10.2 \cdot 10^5,$$

$$Gr \cdot Pr = 10.2 \cdot 10^5 \cdot 0.7 = 7.14 \cdot 10^5,$$

тоді  $Nu = 0.5 \cdot (7.14 \cdot 10^5)^{0.25} = 14,5.$

Коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_l = 14,5 \cdot 0,0299 / 0,05 = 8,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

Теплові втрати горизонтального не теплоізолюваного сталевого трубопроводу

$$Q_{н.т.} = \alpha_l \cdot F \cdot (t_2 - t_1) \cdot \tau, \quad (5)$$

$$Q_{н.т.} = 8,67 \cdot 3,14 \cdot 0,05 \cdot 1 \cdot 55 \cdot 1 = 74,86 \text{ Дж.}$$

Виконаємо аналогічні розрахунки для визначення кількості теплоти, що втрачається теплоізолюваним трубопроводом, шар теплоізоляції дорівнює 5мм:

$$Q_{т.ізіл} = k_l \pi (t_{p1} - t_{p2}) \cdot l, \quad (6)$$

де  $k_l$ - коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

$$k_l = \frac{1}{1/(\alpha_1 d_1) + 1/(2\lambda) \sum_{i=1}^n \ln(d_{i+1}/d_i) + 1/(\alpha_2 d_2)}, \quad (7)$$

$$k_l = 1/(1/(1/20 \cdot 0.045) + 1/2 \cdot 45 \cdot \ln(0,05/0,045) + 1/(5 \cdot 0,06)) = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Теплові втрати горизонтального теплоізолюваного сталевого трубопроводу:



$$Q_{\text{т.ізіл}} = k_1 \pi (t_{p1} - t_{p2}) \cdot l \cdot \tau, \quad (8)$$

$$Q_{\text{т.ізіл}} = 0,15 \cdot 3,14 \cdot (60 - 5) \cdot 1 \cdot 1 = 25,9 \text{ Дж}$$

Виконаємо аналогічні розрахунки для визначення кількості теплоти, що втрачається теплоізолюваним трубопроводом, шар теплоізоляції дорівнює 5мм, покритий алюмінієвою плівкою, зверненої назовні. Ступінь чорноти плівки  $\varepsilon = 0,05$ .

Визначимо коефіцієнт тепловіддачі, який враховує променисту складову  $\alpha_{n.m.}$

$$\alpha_{n.m.} = \frac{C \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2}, \quad (9)$$

де  $C$  - коефіцієнт випромінювання звичайного тіла.

$$C = \varepsilon \cdot C_0, \quad (10)$$

де  $\varepsilon$  - ступінь або коефіцієнт чорноти, в даному випадку  $\varepsilon = 0,05$ ;

$C_0$  - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла,

$$C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K}^4),$$

$$\alpha_{n.m.} = 0,05 \cdot 5,67 \cdot ((35/100)^4 - (5/100)^4) / (35 - 5) = 0,014 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K}).$$

У нашому випадку маємо складний теплообмін, для якого визначимо коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ , який враховує променисту  $\alpha_{n.m.}$  та конвективну  $\alpha_{к.м.}$  складові теплообміну:

$$\alpha = \alpha_{n.m.} + \alpha_{к.м.}, \quad (11)$$

$$Q = (\alpha_{n.m.} + \alpha_{к.м.}) \cdot F \cdot (T_1 - T_2) \cdot \tau. \quad (12)$$

Теплові втрати горизонтального сталевого трубопроводу теплоізолюваного з покриттям алюмінієвою плівкою, зверненої назовні;

$$Q = (0,014 + 0,15) \cdot 3,14 \cdot 0,06 \cdot 30 \cdot 1 \cdot 1 = 0,93 \text{ Дж.}$$

Виконаємо аналогічні розрахунки для визначення кількості теплоти, що втрачається теплоізолюваним трубопроводом, шар теплоізоляції дорівнює 5мм, покритий алюмінієвою плівкою,

зверненої всередину - до трубопроводу. Ступінь чорноти плівки  $\varepsilon = 0,05$ .

Визначимо коефіцієнт тепловіддачі, який враховує променисту складову  $\alpha_{n.m.}$  за формулами (8) і (9):

$$\alpha_{n.m.} = 0,05 \cdot 5,67 \cdot ((60/100)^4 - (5/100)^4) / (60 - 5) = 0,003 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Теплові втрати горизонтального сталевого трубопроводу теплоізованого з покриттям алюмінієвою плівкою, зверненої всередину.

$$Q = (0,003 + 0,15) \cdot 3,14 \cdot 0,06 \cdot 30 \cdot 1 \cdot 1 = 0,86 \text{ Дж}$$

Тобто теплові втрати зменшились від 7 до 10 відсотків.

*Матеріали і методи дослідження.* Методика дослідження заснована на модифікованому методі вивчення процесу теплових втрат [8,9]. Визначалися теплові втрати горизонтального сталевого трубопроводу теплоізованого з покриттям алюмінієвою плівкою, зверненої назовні і зверненої всередину. Температура в трубі підтримувалася за допомогою електронагрівача. Схема випробувального стенду показана на рис.1.

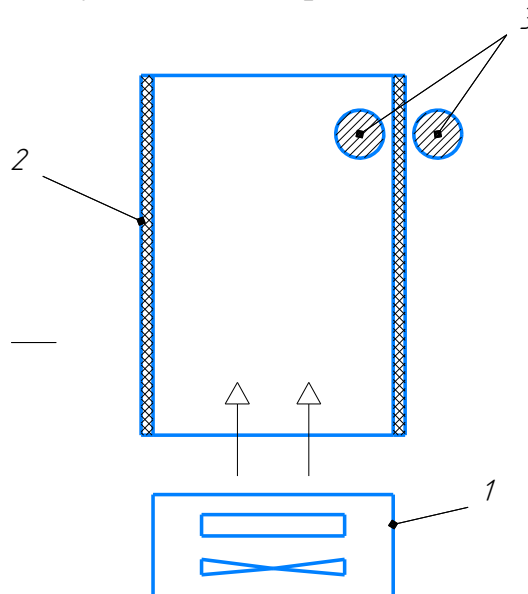


Рис.1. Схема випробувального стенду

1- теплогенератор; 2- теплоізоляція; 3-датчики температури повітря.

*Результати та обговорення.* Проведено дослідження температур поверхні зовнішнього шару теплоізоляції при різному

розташуванні. Досліди проведено при температурі навколишнього середовища 20°C (табл. 1, 2).

Таблиця 1

Дослідні дані вимірів температури повітря (відбиваюча поверхня спрямована в бік поверхні трубопроводу)

Товщина теплоізоляції, мм	Місто контролю температури повітря	Час нагрівання повітря, хв.				
		0	10	20	30	40
3	На поверхні трубопроводу	20,0	24,1	26,3	27,8	28,2
	Всередині трубопроводу	20,0	40,1	45,2	47,0	47,7
5	На поверхні трубопроводу	20,0	23,9	26,1	27,6	28,0
	Всередині трубопроводу	20,0	42,2	47,3	49,1	49,8
10	На поверхні трубопроводу	20,0	23,6	25,8	27,4	27,8
	Всередині трубопроводу	20,0	46,3	51,4	53,2	53,9

Кожні 10 хвилин фіксувалася температура нагріву. Стала температура досягалася за 40 хвилин досліджень.

*Висновки.* Запропонована методика розрахунку теплових втрат з урахуванням радіаційної складової може бути використана при проектуванні теплоізоляції трубопроводів. Перевірено відповідність теоретичних розрахунків фактичним значенням температур поверхні зовнішнього шару теплоізоляції при різному розташуванні. Теплові втрати горизонтального сталевго трубопроводу теплоізолюваного з покриттям алюмінієвою плівкою, зверненої всередину зменшились на 10 відсотків в порівнянні з тепловими втратами горизонтального сталевго трубопроводу теплоізолюваного з покриттям алюмінієвою плівкою, зверненої зовні.

Таблиця 2

Дослідні дані вимірів температури повітря (відбиваюча поверхня спрямована в бік навколишнього середовища)



Товщина теплоізоляції, мм	Місто контролю температури повітря	Час нагрівання повітря, хв.				
		0	10	20	30	40
3	На поверхні трубопроводу	20,0	24,5	26,7	28,2	28,6
	Всередині трубопроводу	20,0	36,1	41,0	43,1	43,6
5	На поверхні трубопроводу	20,0	24,3	26,5	28,0	28,4
	Всередині трубопроводу	20,0	38,7	43,6	45,8	46,2
10	На поверхні трубопроводу	20,0	24,0	26,2	27,8	28,2
	Всередині трубопроводу	20,0	42,1	48,1	49,4	50,0

Проведені дослідження вказують, що доцільно ізолювати теплотрубопроводи, встановлюючи шар ізоляції в бік поверхні трубопроводів, а не навпаки. В цьому випадку температура теплоносія становить від 3 до 5°C вище, що дозволить в підсумку заощаджувати енергію.

#### *Література*

1. Дідур В. А. Теплотехніка, теплопостачання і використання теплоти в сільському господарстві / В. А. Дідур, М. І. Стручаєв. – К.: Аграрна освіта, 2008. – 233 с.
2. Будівельне матеріалознавство на транспорті : підручник / О. М. Пшінько [та ін.]. – Дніпропетровськ, 2010. – 624 с.
3. Sallberg, S.-E., Nilsson, S., Bergstrom, G. (2006). Leakageways for ground water in PUR-foam. *10th Intern. Symposium on District Heating and Cooling* (3-5 Sept. 2006), Hannover, Germany.
4. Корчемний М. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / М. Корчемний, В. Федорейко, В. Щербань. – Тернопіль, 2001. – 984 с.
5. Горлов Ю. П. Технология теплоизоляционных материалов : учебник / Ю. П. Горлов, А. П. Меркин, А. А. Устенко. – М. : Стройиздат, 1980. – 399 с.
6. Теплоизоляционные материалы и конструкции : учебник / Ю. Л. Бобров [и др.]. – М. : Инфра-М, 2003. – 265 с.
7. Щербак А. С. Експлуатаційні та екологічні переваги теплоізоляції із застосуванням модифікованого піноскла / А. С. Щербак // Вісник Дніпр. нац. ун-ту залізн. транс. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 32. – С. 141-142.





8. Schill, F. (1962). *Penovesklo: vyroba a pouziti*. Praha: SNTL.
9. Щербак А. С. Исследование свойств современных теплоизоляционных материалов / А. С. Щербак // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – Днепропетровск, 2013. – Вип. 2 (44). – С. 136-143.
10. Лундышев А. А. Экспериментальные исследования технологии теплоизоляции трубопроводов / А. А. Лундышев. // Инженерно-строительный журнал. – Спб, 2010. – Вып. 5. – С. 49-52.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ

Стручаев Н. И., Степин Ю. А., Гулевский В. Б., Постол Ю. А., Левченко Д. В.

### Аннотация

Статья посвящена исследованию теплоизоляции трубопроводов, отражающая поверхность которых устроена разными способами, предложена методика расчета и конструкция компактных теплоизоляционных элементов, на примере уменьшения потерь энергии в трубопроводах для нагретой жидкости. Представлены экспериментальные данные об эффективности теплоизоляции стальных воздушных трубопроводов. Целью исследования является установление возможности повышения эффективности теплоизоляции трубопроводов путем определения ее оптимального расположения. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи: предложить методику расчета тепловых потерь с учетом радиационной составляющей; проверить соответствие теоретических расчетов фактическим значением температур поверхности наружного слоя теплоизоляции при различном расположении. Методика исследования основана на модифицированном методе изучения процесса потери тепла. Определены тепловые потери горизонтального стального трубопровода, утепленного покрытием из алюминиевой пленки, обращенного наружу и обращенного внутрь. Температура в трубе поддерживалась с помощью электрического нагревателя. Определены температуры поверхности наружного слоя теплоизоляции при различном расположении. Эксперименты проводились при температуре окружающей среды 20°C. Каждые 10 минут температуру нагрева регистрировали. Постоянная температура достигалась через 40 минут после начала исследований. Предложенный метод расчета тепловых потерь с учетом радиационной составляющей может быть использован при проектировании теплоизоляции трубопроводов. Проверено соответствие теоретических расчетов фактическим значениям температуры поверхности наружного слоя теплоизоляции при различном расположении. Тепловые потери горизонтального стального трубопровода, теплоизолированного с покрытием из алюминиевой фольги, повернутой внутрь, уменьшились на 10 процентов по сравнению с тепловыми потерями горизонтального стального трубопровода, теплоизолированного с покрытием из алюминиевой фольги, обращенным наружу. Проведенные исследования показывают, что целесообразно теплоизолировать трубопроводы, устанавливая слой изоляции в направлении поверхности трубопроводов, а не наоборот. В этом случае температура теплоносителя будет на 3–5°C выше, что в конечном итоге позволит сэкономить энергию.



## RESEARCH OF THERMAL INSULATION OF PIPELINES

N. Struchaev, Y. Stopin, V. Hulevskyi, Y. Postol, D. Levchenko

### *Summary*

The article is devoted to research of thermal insulation of pipelines, the reflecting surface of which is arranged in different ways, the method of calculation and construction of compact heat-insulating elements is proposed, for example, to reduce energy losses in pipelines for a heated liquid. The experimental data on the effectiveness of thermal insulation of steel air pipelines are presented. The purpose of the study is to establish the possibility of increasing the efficiency of thermal insulation of pipelines by determining its optimal location. To achieve this goal, the following tasks are set: a methodology for calculating heat losses taking into account the radiation component; check the correspondence of theoretical calculations to the actual values of the surface temperature of the external layer of thermal insulation at different locations. The method of research is based on the modified method of studying the process of heat loss. The thermal losses of a horizontal steel pipeline, heat-insulated with a coating of aluminum film, facing outwards and facing inside, were determined. The temperature in the pipe was maintained using an electric heater. Surveying the temperature of the surface of the external layer of thermal insulation with different location. Experiments have been carried out at ambient temperature of 20 °C. Every 10 minutes the temperature of the heating was recorded. A constant temperature was reached 40 minutes after the start of the study. The proposed method of calculation of heat losses taking into account the radiation component can be used in designing heat insulation of pipelines. The correspondence of theoretical calculations to the actual values of the temperature of the surface of the external layer of thermal insulation with different location is checked. Thermal losses of a horizontal steel pipeline, heat-insulated with a coating of aluminum foil, turned inside decreased by 10 percent compared with the thermal losses of a horizontal steel pipeline, heat-insulated with a coating of aluminum foil facing outwards. The conducted researches indicate that it is expedient to isolate heat pipes, setting the layer of insulation in the direction of the surface of the pipelines, and not vice versa. In this case, the temperature of the coolant is from 3 to 5°C higher, which will eventually save energy.

*Keywords:* energy saving, thermal insulation of pipelines, thermal conductivity, energy losses, compact heat-insulating elements.