

## Ways to Improve the Efficiency of Pipelines Heat Insulation

Struchaev N., Postol Y., Stopin Y., Zhuravel D., Hulevskiy V.

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University  
Melitopol, Ukraine

**Abstract.** A significant part of thermal energy is lost precisely during its transportation. By increasing the efficiency of thermal insulation of pipelines, it is possible to reduce significantly heat loss around the world. The purpose of the paper is to develop and validate methods for increasing the efficiency of thermal insulation of pipelines by determining its optimal location. This purpose has been achieved by applying of a modified method for studying the process of heat loss, taking into account the radiation component, to calculate the heat loss and surface temperature of the thermal insulation with different spatial arrangements. For comparison, we analysed three options for the heat loss of pipe with a different spatial arrangement of thermal insulation coated with an aluminium reflective film facing outward, facing inward and in both directions. Comparison of these variants showed that it had been advisable to insulate the pipelines by installing an insulation layer coated with an aluminium reflective film facing in both directions. The main result of paper has been the proposed method for calculating of heat losses, which could be used in the design of thermal insulation of pipelines and the obtained data confirming the correspondence of theoretical calculations to actual values of the surface temperature of thermal insulation taking into account its various spatial arrangements. The importance of the results of the work lies in the possibility of using this technique to assess the effectiveness of thermal insulation of pipelines and determine the best solutions for its spatial location.

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

**DOI:** 10.5281/zenodo.3898231

**UDC:** 69:699.86

**Modalități de îmbunătățire a eficienței izolației termice a conductelor**  
**Struchaev N.I., Postol Yu.A., Stepin Yu.A., Zhuravel D.P., Gulevsky V.B.**  
Universitatea Agrotehnică de Stat Taurida Dmitry Motornâi  
Melitopol, Ucraina

**Rezumat.** Articolul este dedicat studiului izolării termice a conductelor, a căror suprafață reflectantă este amenajată în moduri diferite, se propune o metodologie pentru calcularea elementelor termoizolante, utilizând pentru elucidare exemplul reducerii pierderilor de energie în conducte. Tendințele actuale în formarea strategiilor de conservare a energiei și îmbunătățirea eficienței utilizării energiei termice includ câteva componente importante, precum: generarea, transportul, distribuția și consumul. În același timp, o parte semnificativă a energiei termice la nivel mondial se pierde tocmai în timpul transportului în conducte. Astfel, creșterea eficienței izolației termice a conductelor poate reduce semnificativ pierderea de căldură la nivel mondial pentru o lungă perioadă de timp. Scopul articolului este de a dezvolta și testa metode pentru sporirea eficienței utilizării izolației termice a conductelor, acoperite cu o peliculă reflectorizantă din aluminiu, orientată spre exterior, orientată spre interior și în ambele direcții, prin determinarea locației spațiale optime. Acest obiectiv este atins folosind o metodă modificată de studiere a procesului de pierdere de căldură, care ia în considerare componenta de radiație, pentru a calcula pierderea de căldură și temperatura de suprafață a stratului exterior de izolare termică, cu dispunerea spațială diferită. Rezultatul principal al lucrării îl prezintă metoda propusă pentru calcularea pierderilor de căldură, care poate fi folosită la proiectarea izolației termice a conductelor, precum și datele obținute, care confirmă corespondența calculului teoretic al valorilor reale ale temperaturii izolației termice la diferite locații spațiale. Importanța rezultatelor lucrării constă în posibilitatea utilizării acestei tehnici pentru a evalua eficacitatea izolării termice a conductelor pentru a determina cele mai bune soluții pentru amplasarea spațială a acesteia.

**Cuvinte-cheie:** economisire de energie, izolația termică, conductivitate termică, pierderi de energie, elemente de izolație termică compacte.

**Пути повышения эффективности теплоизоляции трубопроводов**

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

Таврический государственный агротехнологический университет имени Дмитрия Моторного  
Мелитополь, Украина

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию теплоизоляции трубопроводов, отражающая поверхность которых устроена разными способами, предложена методика расчета теплоизоляционных элементов, на примере уменьшения потерь энергии в трубопроводах. Современные тенденции формирования стратегии по энергосбережению и повышению эффективности использования тепловой энергией включают несколько важных компонентов, таких как: генерирование, транспортировка, распределение и потребление. В то же время, значительная часть тепловой энергии во всем мире теряется именно при её транспортировке в трубопроводах. Таким образом, повышение эффективности теплоизоляции трубопроводов позволяет значительно снижать тепловые потери во всем мире в течение длительного времени. Целью статьи является разработка и проверка методов повышения эффективности использования теплоизоляции трубопроводов, покрытой алюминиевой отражающей пленкой, обращенной наружу, обращенной внутрь и в обе стороны, путем определения ее оптимального пространственного расположения. Поставленная цель достигается с помощью модифицированного метода изучения процесса тепловых потерь, который учитывает радиационную составляющую, для расчета тепловых потерь и температуры поверхности наружного слоя теплоизоляции, при её различном пространственном расположении. Для сравнения были проанализированы три варианта тепловых потерь трубопровода при различном пространственном расположении теплоизоляции, покрытой алюминиевой отражающей пленкой, обращенной наружу, обращенной внутрь и в обе стороны. Сравнение этих вариантов показывает, что целесообразно теплоизолировать трубопроводы, устанавливая слой изоляции, покрытый алюминиевой отражающей пленкой, обращенной в обе стороны. При этом тепловые потери снижаются на 10 процентов. Главным результатом работы является предложенный метод расчета тепловых потерь, который может быть использован при проектировании теплоизоляции трубопроводов и полученные данные подтверждающие соответствие теоретических расчетов фактическим значениям температуры теплоизоляции при её различном пространственном расположении. Важность результатов работы состоит в возможности использования этой методики для оценки эффективности теплоизоляции трубопроводов и определения лучших решений её пространственного расположения.

**Ключевые слова:** энергосбережение, теплоизоляция трубопроводов, теплопроводность, потери энергии, компактные теплоизоляционные элементы.

**ВВЕДЕНИЕ**

Современные тенденции формирования стратегии по энергосбережению и повышению эффективности использования тепловой энергии включают несколько компонентов. Одним из них является её эффективная транспортировка. Ежегодные глобальные потери при транспортировке тепловой энергии составляют более 10–20%, а в некоторых регионах – до 40% [1]. Разработка методов теплоизоляции трубопроводов варьируется в зависимости от типа прокладки тепловых сетей, так как условия эксплуатации предъявляют особые требования. Значительная часть теплотрасс имеет воздушную прокладку [2]. Поэтому поиск путей повышения эффективности использования теплоизоляции играет важную роль поскольку позволяет в течение длительного времени снижать потери теплоты.

Значительная роль в решении проблемы экономии тепловой энергии принадлежит высокоэффективной теплоизоляции [2,3,4]. Теплоизоляция трубопроводов обеспечивает

снижение энергозатрат на отопление зданий и сооружений [5]. Теплоизоляционные материалы, предназначенные для трубопроводов, представлены стекловолоконными матами и матами из минеральной ваты, кроме того, для теплоизоляции трубопроводов с температурой до 130°C используются оболочки из огнестойкой фенол-резольной пены FRP-1 [5,6,7,8]. Для теплоизоляции трубопроводов используют также формованные: цилиндры, полуцилиндры, сегменты из минеральной и стекловаты [9].

Свойства теплоизоляционных материалов достаточно подробно изучены в работах А. Щербака. [11], в том числе изделия на основе стекловаты (маты, цилиндры), фасонные изделия из пеностекла, в работе Сопегина [10], а технология теплоизоляции трубопроводов описана в работе А. Лундышева [12]. Как известно, эффективность теплоизоляции трубопроводов зависит от теплового сопротивления ячеек из пористого или волокнистого материала. Для теплоизоляции наиболее приемлемыми являются те

теплоизоляционные материалы, которые имеют низкий коэффициент теплопроводности [7,8,9,10,11,12]. В то же время проблемы оптимизации теплоизоляции трубопроводов, сводятся к нахождению не только материала, но и его расположения относительно трубопровода, при котором суммарный коэффициент теплопередачи многослойной структуры с последовательно расположенными слоями будет минимальным, изучены недостаточно [17,18,19,20,21].

### I. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Метод исследования основан на модифицированном методе изучения процесса потери теплоты [2,13,14,15,16].

Основной целью данной работы является установление возможности повышения эффективности теплоизоляции трубопроводов, путем определения ее оптимального пространственного расположения.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1. Предложить метод расчета тепловых потерь с учетом радиационной составляющей.

2. Проверить соответствие теоретических расчетов фактическим значениям температуры поверхности наружного слоя теплоизоляции в разных местах.

Теплообмен между горячим теплоносителем и атмосферным воздухом через стенку трубы и слой теплоизоляционного материала на ней, которые их разделяют, осуществляется путем теплопередачи. В этом случае, тепловая энергия от теплоносителя к стенке трубы и от поверхности наружного слоя теплоизоляции к атмосферному воздуху передается за счет теплоотдачи или радиационно-конвективного теплообмена, а через стенку и слой теплоизоляции - за счет теплопроводности. Были исследованы три варианта расположения: когда алюминиевой пленкой покрыт внешний теплоизоляционный слой, когда алюминиевой пленкой покрыт внутренний теплоизоляционный слой и когда покрытие из алюминиевой пленки нанесено с обеих сторон.

Общий коэффициент теплопередачи многослойной теплоизоляции труб с

последовательными слоями [2] рассчитывается по формуле (1)

$$k_0 = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_u + \sum R_i + R_s + R_{m.u.}} \quad (1)$$

где  $R_0$  — общее сопротивление теплопередаче многослойной конструкции,  $(\text{м}^2 \text{К}) / \text{Вт}$ ;

$R_u, R_s$  — сопротивление теплопередаче снаружи и изнутри,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт}$ ;

$R_i$  — сопротивление теплопроводности  $i$ -го слоя,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт}$ ;

$R_{m.u}$  — сопротивление теплопроводности теплоизоляционного слоя,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт}$ .

Определим количество теплоты, теряемой в секунду горизонтальной стальной неизолированной трубой диаметром 50 мм, длиной 1 метр, температурой наружной поверхности трубы  $60^\circ\text{C}$ , при температуре окружающего воздуха  $5^\circ\text{C}$ .

Коэффициент теплоотдачи с внешней стороны трубы  $\alpha$  для стального трубопровода определяется по формуле (2) выбрав в качестве линейного размера диаметр трубы:

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

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт} / (\text{м}^2 \text{К})$ ;

$Nu$  — критерий Нуссельта;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности воздуха,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$d$  — диаметр трубы, м.

Критерий Нуссельта [2] определяется по формуле (3):

$$Nu = 0,50 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot \left( \frac{Pr_c}{Pr_n} \right)^{0,25} \quad (3)$$

Критерий Грасгофа определяется по формуле (4), также выбирая в качестве линейного размера диаметр шрифтом).

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

$$Gr = \frac{9,81 \cdot 0,053 \cdot (60-5) \cdot 10^2}{(293 \cdot 152)} = 10,2 \cdot 10^5$$

$$Gr \cdot Pr = 10,2 \cdot 10^5 \cdot 0,7 = 7,14 \cdot 10^5$$

$$Nu = 0,5 \cdot (7,14 \cdot 10^5)^{0,25} = 14,5$$

Получим значение коэффициента теплоотдачи по формуле (2):

$$\alpha_1 = \frac{14,5 \cdot 0,0299}{0,05} = 8,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Тепловые потери горизонтального неизолированного стального трубопровода определяются по формуле (5):

$$Q_{н.-из.} = \alpha_1 \cdot F \cdot (t_2 - t_1) \cdot \tau \quad (5)$$

где  $Q_{н.-из.}$  — тепловые потери неизолированного трубопровода, Дж,  
 $F$  — площадь поверхности трубопровода, м<sup>2</sup>,  
 $t_1$  — температура трубопровода, °С,  
 $t_2$  — температура воздуха, °С,  
 $\tau$  — время, с.

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

Выполним аналогичные расчеты для определения количества теплоты, потерянной утепленным трубопроводом, слой теплоизоляции составляет 5 мм:

$$Q_{м.из.1.} = k_1 \cdot \pi \cdot (t_2 - t_1) \cdot l \cdot \tau \quad (6)$$

где  $Q_{м.из.1.}$  — тепловые потери теплоизолированного трубопровода, Дж,  
 $k_1$  — линейный коэффициент теплопередачи, Вт / (м К);  
 $t_1$  — температура трубопровода, °С,  
 $t_2$  — температура воздуха, °С,  
 $l$  — длина трубопровода, м,  
 $\tau$  — время, с.

Линейный коэффициент теплопередачи определим по формуле (7):

$$k_1 = \frac{1}{1/(\alpha_1 d_1) + 1/(2\lambda_i) \sum_{i=1}^n \ln(d_{i+1}/d_i) + 1/(\alpha_2 d_2)} \quad (7)$$

где  $\lambda_i$  — коэффициент теплопроводности слоев структуры, Вт/(м·К);

$d_i$  — диаметр  $i$ -го слоя структуры, м,  
 $\alpha_1$  — коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны трубы, Вт/(м<sup>2</sup>·К),  
 $\alpha_2$  — коэффициент теплоотдачи с внешней стороны теплоизоляции трубы, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

$$k_1 = \frac{1}{1/(20 \cdot 0,045) + 1/(2 \cdot 0,035) \cdot \ln(0,05/0,045) + 1/(5 \cdot 0,06)} = 0,15 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Тепловые потери горизонтального теплоизолированного стального трубопровода определим по формуле (6):

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

Выполним аналогичные расчеты с учетом лучистой составляющей для определения количества теплоты, потерянной теплоизолированным трубопроводом, слой теплоизоляции 5 мм, покрытый алюминиевой пленкой, обращенной наружу. Степень черноты пленки  $\varepsilon = 0,05$ .

Коэффициент теплоотдачи, который учитывает составляющую теплового излучения  $\alpha_{м.изл.}$  определим по формуле (8):

$$\alpha_{м.изл.} = \frac{C \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2} \quad (8)$$

где  $C$  — коэффициент излучения обычного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

$$C = \varepsilon \cdot C_0 \quad (9)$$

где  $\varepsilon$  — степень или коэффициент черноты, в данном случае,  $\varepsilon = 0,05$ ;

$C_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>),  $C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$

В нашем случае имеем сложный теплообмен, для которого определяем коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , учитывающий лучистую  $\alpha_{м.изл.}$  и конвективную составляющие  $\alpha_{к.т.}$  теплообмена (10):

$$\alpha = \alpha_{м.изл.} + \alpha_{к.т.} \quad (10)$$

Тогда:

$$Q = (\alpha_{m.изл} + \alpha_{к.м}) \cdot F \cdot (t_1 - t_2) \cdot \tau \quad (11)$$

Тепловые потери теплоизолированного горизонтального стального трубопровода с покрытием теплоизоляции алюминиевой пленкой, обращенной наружу:

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

Выполним аналогичные расчеты для определения количества теплоты, теряемого теплоизолированным трубопроводом, слой теплоизоляции которого равен 5 мм и покрыт алюминиевой пленкой, обращенной внутрь - к трубопроводу. Степень черноты пленки  $\varepsilon = 0,05$ .

Определим коэффициент теплоотдачи, который учитывает лучистую составляющую  $\alpha_{m.изл.}$  согласно формулам (8) и (9):

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

Тепловые потери теплоизолированной горизонтальной стальной трубы, с покрытием теплоизоляции алюминиевой пленкой, обращенной внутрь к трубе:

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

То есть потери тепла снизились на 7 – 10 процентов.

## II. МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

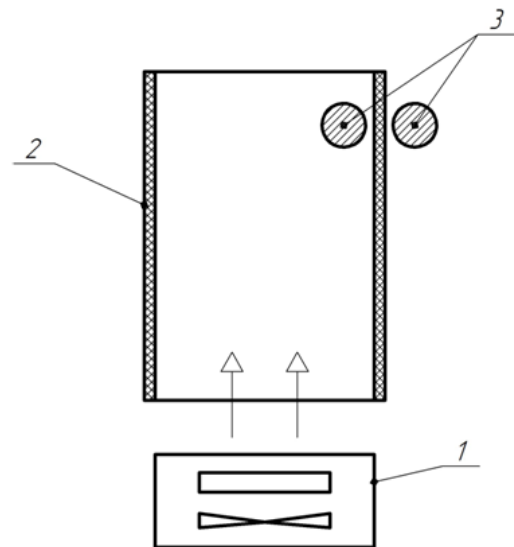
Исследования выполнялись на испытательном стенде, на который поочередно устанавливались следующие образцы: горизонтальный стальной трубопровод без теплоизоляции; горизонтальный стальной трубопровод с покрытием теплоизоляции ячеистой структуры алюминиевой пленкой отражающая поверхность, которой обращена в окружающую среду; горизонтальный стальной трубопровод с покрытием теплоизоляции алюминиевой пленкой отражающая поверхность, которой обращена к трубе; трубопровод с покрытием теплоизоляции двумя алюминиевыми пленками отражающие поверхности, которых

Выход на стационарный режим определяли, как состояние, когда три последовательных измерения температуры

обращены в обоих направлениях и к трубе и в окружающую среду.

Цилиндрический образец имеет достаточно большую длину по сравнению с диаметром. На цилиндрическом образце выделялся опытный участок такой длины, при которой аксиальные потоки теплоты пренебрежимо малы, в сравнении с радиальными. Температура в трубе поддерживалась электрическим теплогенератором, создающим равномерный обогрев. Тепловой поток, поступающий от нагревателя внутрь трубы во всех экспериментах - одинаков. Температура внутри трубопровода и на внешней поверхности измерялась датчиками температуры, сигнал которых передавался на цифровой прибор. Относительная погрешность измерения температуры составляла 0,5%, при рабочем диапазоне 0...+70 °С. Температура окружающей среды измерялась лабораторным термометром. Коэффициент теплоотдачи поддерживался постоянным. Окружающую среду считаем настолько теплоемкой, что теплота, полученная ею от образца, вызывает пренебрежимо малое повышение ее температуры, процесс теплообмена протекает при температуре среды  $t_{cp} = \text{const}$ .

Схема испытательного стенда приведена на рис. 1.



1 — теплогенератор; 2 — образец; 3 — датчики температуры.

Рис. 1. Схема испытательного стенда.<sup>1</sup>

одним датчиком давали одинаковые результаты.

<sup>1</sup> Appendix 1

**III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Была исследована температура наружного слоя теплоизоляции, покрытой алюминиевой пленкой которая по-разному расположена в пространстве: снаружи, изнутри и с обеих сторон и температура внутри трубопровода.

Эксперименты проводились при температуре окружающей среды  $t_{cp.const} = 20^{\circ}C$ . Температура регистрировалась каждые 10 минут. В таблицы 1,2,3 внесены значения температур, определенные путем усреднения показаний термомпар.

Таблица 1<sup>2</sup>

Данные измерения температуры воздуха (отражающая поверхность направлена в окружающую среду)<sup>3</sup>

Толщина изоляции, мм. Thickness insulation mm.	Температура воздуха, °C. Air temperature, °C	Время нагрева, мин. Heating time, min.								
		0	10	20	30	40	60	90	120	150
5	А (на поверхности трубопровода) <sup>20</sup>	20,0	24,3	26,5	28,0	28,4	28,4	28,5	28,5	28,5
	В (внутри трубопровода) <sup>21</sup>	20,0	38,7	43,6	45,8	46,2	46,2	46,3	46,3	46,3
10	А	20,0	24,0	26,2	27,8	28,2	28,2	28,3	28,3	28,3
	В	20,0	42,1	48,1	49,4	50,0	50,0	50,2	50,2	50,2

Таблица 2<sup>4</sup>

Данные измерения температуры воздуха (отражающая поверхность направлена на поверхность трубопровода)<sup>5</sup>

Толщина изоляции, мм	Температура воздуха, °C. Air temperature, °C	Время нагрева, мин. Heating time, min								
		0	10	20	30	40	60	90	120	150
5	А (на поверхности трубопровода) <sup>20</sup>	20,0	23,9	26,1	27,6	28,0	28,0	28,2	28,2	28,2
	В (внутри трубопровода) <sup>21</sup>	20,0	42,2	47,3	49,1	49,8	49,8	49,9	49,9	49,9
10	А	20,0	23,6	25,8	27,4	27,8	27,8	27,9	27,9	27,9
	В	20,0	46,3	51,4	53,2	53,9	53,9	54,0	54,0	54,0

Таблица 3<sup>6</sup>

Данные измерения температуры воздуха (две отражающие поверхности направлены в обе стороны).<sup>7</sup>

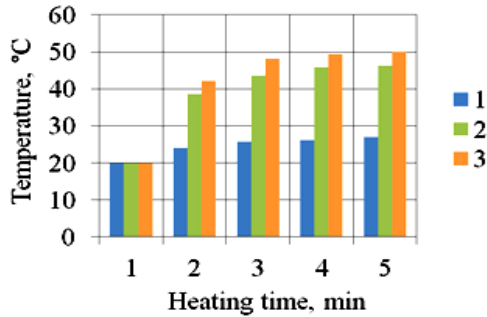
Толщина изоляции, мм	Температура воздуха, °C. Air temperature, °C	Время нагрева, мин. Heating time, min								
		0	10	20	30	40	60	90	120	150
5	А (на поверхности трубопровода) <sup>20</sup>	20,0	24,1	25,8	26,5	27,0	27,0	27,2	27,2	27,2
	В (внутри трубопровода) <sup>21</sup>	20,0	44,7	47,6	50,8	52,2	52,2	52,3	52,3	52,3
10	А	20,0	23,4	24,2	24,8	25,2	25,2	25,3	25,3	25,3
	В	20,0	48,1	54,1	59,4	62,0	62,0	62,2	62,2	62,0

Стационарный режим температуры исследования, однако темп роста достигался на 120...150 минуте температуры практически прекращался к 40 минуте, поэтому на рис. 2,3,4 представлены именно эти участки эксперимента.

2,3,4,5,6,7,20,21. Appendix

На рисунке 5 показана полная картина процесса теплопередачи.

Зависимость температуры теплоизолированного горизонтального стального трубопровода, с покрытием теплоизоляции алюминиевой пленкой от времени для случая, когда отражающая поверхность алюминиевой пленки обращена в окружающую среду, показана на рис. 2.



1 - температура отражающей поверхности, направленной к трубопроводу, толщина теплоизоляции 5 мм; 2 - температура внутри трубопровода, покрытого теплоизоляцией с отражающей поверхностью, направленной в окружающую среду, толщина изоляции 5 мм; 3 - температура внутри трубопровода, покрытого теплоизоляцией с отражающей поверхностью, направленной в окружающую среду, толщина изоляции 10 мм

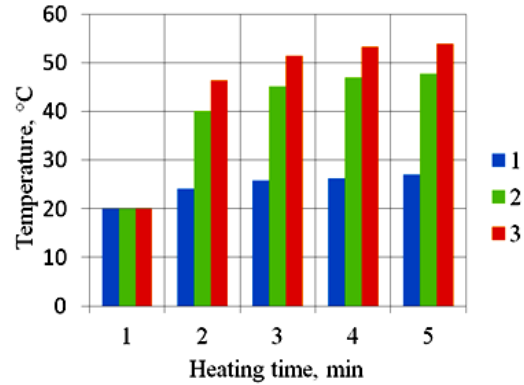
Рис. 2. Зависимость температуры от времени, отражающая поверхность обращена в окружающую среду<sup>8</sup>

Зависимость температуры теплоизолированного горизонтального стального трубопровода, с покрытием теплоизоляции алюминиевой пленкой от времени для случая, когда отражающая поверхность алюминиевой пленки обращена к поверхности трубопровода, показана на рис. 3.

Стационарный режим температуры достигался на 120...150 минуте исследования, однако темп роста температуры практически прекращался к 40 минуте, поэтому на рис. 2,3,4 представлены именно эти участки эксперимента. На рисунке 5 показана полная картина процесса теплопередачи

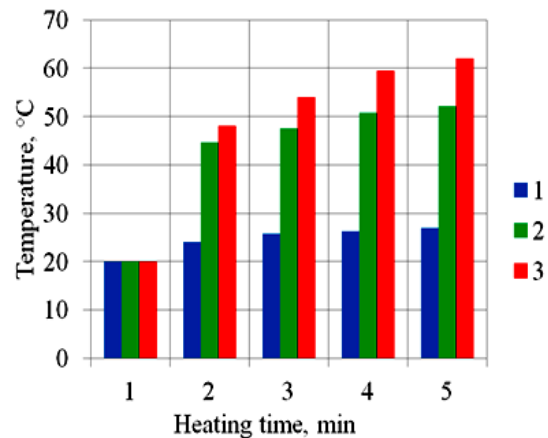
Зависимость температуры теплоизолированного горизонтального стального трубопровода, с покрытием теплоизоляции алюминиевой пленкой от времени для случая, когда теплоизоляция покрыта алюминиевой пленкой с двух сторон – и снаружи и изнутри и отражающие

поверхности обращены в обоих направлениях и к трубе, и в окружающую среду, показана на рис. 4. Температурная зависимость поверхности изоляции труб для различных вариантов расположения отражающего слоя изоляции показана на рис. 5.



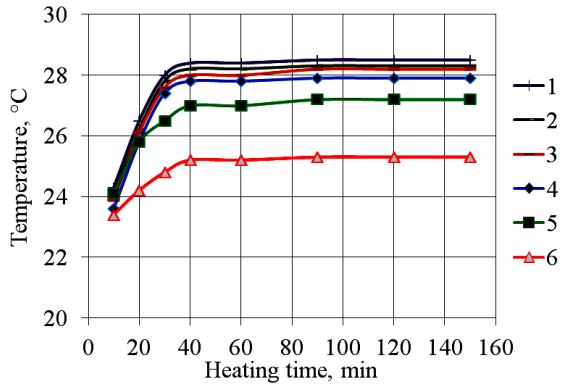
1 - температура отражающей поверхности, направленной к трубопроводу, толщина изоляции 5 мм; 2 - температура внутри трубопровода, покрытого теплоизоляцией, отражающая поверхность, направлена к трубопроводу, с толщиной изоляции 5 мм; 3 - температура внутри трубопровода, покрытого теплоизоляцией, отражающая поверхность направлена к трубопроводу, толщина изоляции 10 мм

Рис. 3. Зависимость температуры от времени, отражающая поверхность обращена к трубе<sup>9</sup>



1 - температура поверхности с двумя отражающими слоями, направленными в обе стороны, толщина изоляции 5 мм; 2 - температура внутри трубопровода, покрытого изоляцией, с двумя отражающими слоями, толщина 5 мм; 3 - температура внутри трубопровода, покрытого изоляцией с двумя отражающими слоями, толщина 10 мм

Рис. 4. Зависимость температуры от времени, отражающие поверхности обращены в обоих направлениях и к трубе, и в окружающую среду<sup>10</sup>



1- отражающая поверхность направлена в окружающую среду, толщина изоляции 5 мм; 2 - отражающая поверхность, направленная в окружающую среду, толщина изоляции 10 мм; 3 - отражающая поверхность, направленная к поверхности трубопровода, толщина изоляции 5 мм; 4 - отражающая поверхность, направленная к поверхности трубопровода, толщина изоляции 10 мм; 5 - две отражающие поверхности, направленные в обе стороны, толщина изоляции 5 мм; 6 - две отражающие поверхности, направленные в обе стороны, толщина изоляции 10 мм

**Рис. 5. Зависимость температуры поверхности теплоизолированной трубы от пространственного расположения теплоизоляции<sup>11</sup>**

Исследования показали, что целесообразно изолировать тепловые трубопроводы, установив слой изоляции, покрытый отражающей алюминиевой пленкой, обращенной в обоих направлениях и к трубе, и в окружающую среду. В этом случае температура наружной поверхности теплоизоляции снижается на 10%, что позволит сэкономить тепловую энергию при транспортировке

### ВЫВОДЫ

Одним из резервов повышения эффективности транспортировки тепловой энергии по трубопроводам является улучшение их теплоизоляции.

В предложенном методе расчета тепловых потерь с учетом радиационной составляющей было подтверждено соответствие теоретических расчетов фактической температуре поверхности наружного слоя теплоизоляции при различном расположении отражающего слоя алюминиевой пленки на теплоизоляции.

Установлено что тепловые потери горизонтальной теплоизолированной стальной трубы с покрытием на

теплоизоляции из алюминиевой пленки, обращенным в обоих направлениях (и к трубе, и в окружающую среду), уменьшились на 10 процентов по сравнению с тепловыми потерями горизонтальной теплоизолированной стальной трубы, покрытой алюминиевой пленкой обращенной в окружающую среду, и на 7% по сравнению с потерями теплоты горизонтальной теплоизолированной стальной трубы, покрытой алюминиевой пленкой, обращенной к трубе.

Полученные результаты могут быть использованы при расчете тепловых потерь и выборе ориентации отражающего слоя теплоизоляции трубопроводов.

### APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

<sup>1</sup>**Fig. 1.** The scheme of the test bench: 1 - heat generator; 2 - sample; 3 - temperature sensors.

<sup>2,3</sup>**Table 1.** Air temperature measurement data (reflective surface directed towards the environment).

A-(on the surface of the pipeline)<sup>20</sup>. B - (inside Pipeline)<sup>21</sup>.

<sup>4,5</sup>**Table 2.** Air temperature measurement data (reflective surface directed to pipeline surface).

A-(on the surface of the pipeline)<sup>20</sup>. B - (inside Pipeline)<sup>21</sup>.

<sup>6,7</sup>**Table 3.** Air temperature measurement data (two reflecting surface directed in both directions).

A-(on the surface of the pipeline)<sup>20</sup>. B - (inside Pipeline)<sup>21</sup>.

<sup>8</sup>**Fig. 2.** The dependence of temperature on time, when the reflecting surface facing to the environment. 1 - temperature of the reflecting surface, the insulation thickness of 5 mm; 2 - temperature inside the pipeline coated with thermal insulation with a reflective surface directed into the environment, insulation thickness of 5 mm; 3 - temperature inside the pipeline coated with thermal insulation with a reflective surface directed into the environment, insulation thickness 10 mm.

<sup>9</sup>**Fig. 3.** The dependence of temperature on time, when the reflective surface is facing to the pipe.

1 - temperature of the reflecting surface directed to the pipeline, insulation thickness of 5 mm; 2 - temperature inside the pipeline coated with thermal insulation, the reflecting surface is directed to the pipeline, with an insulation thickness of 5 mm; 3 - temperature inside the pipeline coated with thermal insulation, the reflecting surface is directed to the pipeline, the insulation thickness is 10 mm

<sup>10</sup>**Fig. 4.** The dependence of temperature on time, reflective surfaces facing in both directions: to the pipe and to the environment.

1 - surface temperature with two reflective layers directed in both directions, insulation thickness of 5 mm; 2 - temperature inside the pipeline coated with

<sup>11</sup>Appendix 1



insulation, with a double-sided arrangement of reflective layers, thickness 5 mm; 3 - temperature inside the pipeline coated with insulation with a double-sided arrangement of reflective layers, thickness 10 mm.

<sup>14</sup>**Fig. 5.** Dependence of the surface temperature of the heat insulation pipe on the spatial location of the insulation.

1- reflective surface directed into the environment, insulation thickness 5 mm; 2 - reflective surface directed into the environment, insulation thickness 10 mm; 3 - reflective surface directed to the surface of the pipeline, insulation thickness 5 mm; 4 - reflective surface directed to the surface of the pipeline, insulation thickness 10 mm; 5 - two reflective surfaces directed in both directions, insulation thickness of 5 mm; 6 - two reflective surfaces directed in both directions, insulation thickness 10 mm.

### Литература (References)

- [1] Nussbaumer T, Thalmann S. Status Report on District Heating Systems in IEA Countries IEA Bioenergy, Swiss Federal Office of Energy, and Verenum, Zürich 2014, vol. 32 pp.48. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/2836/aedc9487704c7cd7c9d62ee4dd25d2313eb0.pdf> (дата посещения 21.06.2020)
- [2] Теплотехніка, теплостачання і використання тепла в сільському господарстві. [Heat engineering, heat supply and heat utilization in agriculture]. Kiev, 2008. 233 p. Available at: <http://nmcbook.com.ua/wpcontent/uploads/2017/1/Теплотехніка-теплостачання-і-використання-теплоти-в-сільському-господарстві.pdf> (дата посещения 21.06.2020)
- [3] G. M. Zaki, A. M. Al-Turki. Optimization of Multilayer Thermal Insulation for Pipelines. *Heat Transfer Engineering*, 2000, vol.21, pp 63-70. doi.org/10.1080/01457630050144514.
- [4] Paschenko T.M., Svitla Z.I. *Budivel'ne materialoznavstvo*. [Building Materials]. Kiev: Agrarna osvita. 2009. – 434 p. Available at: <http://nmcbook.com.ua/wpcontent/uploads/2017/1/Будівельне-матеріалознавство.pdf> (дата посещения 21.06.2020)
- [5] Sallberg S.-E., Nilsson S., Bergstrom G. *Leakageways for ground water in PUR-foam*. 10th Intern.Symposium on District Heating and Cooling 3-5 Sept. 2006, Hannover, Germany. Available at: [http://www.lsta.lt/files/events/31\\_saellberg.pdf](http://www.lsta.lt/files/events/31_saellberg.pdf) (accessed 08.08.2006)
- [6] Korchemny M. Fedoreiko V., Shcherban V. *Enerhozhberezhennya v ahropromyslovomu kompleksі*. [Energy saving in agro-industrial complex]. Ternopil, 2001. 984 p.
- [7] Gorlov Yu.P. *Tekhnologiya teploizolyatsionnykh materialov*. [Thermal insulation technology]. Available at: [http://books.totalarch.com/technology\\_of\\_heat-insulating\\_materials](http://books.totalarch.com/technology_of_heat-insulating_materials) . (accessed 11.04.2020)
- [8] Bobrov Yu. L, Ovcharenko E.G, Schoichet B.M, Petukhova E. Yu. *Teploizolyatsionnyye materialy i konstruksii*. [Thermal insulation materials and structures]. Moscow. 2003. 268 p.
- [9] Shcherbak, A. S. Ekspluatatsiyni ta ekolohichni perevahy teploizolyatsiyni iz zastosovannam modyfikovanoho pinoskla. [The operational and environmental benefits of insulation using modified foam glass]. *Visnyk Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana – Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 2010, no. 32, pp. 141-142. (In Ukrainian). Available at: <http://eadnurt.dit.edu.ua/jspui/handle/123456789/312>
- [10] Sopegin, Georgiy & Rustamova, Diana & Fedoseev, Sergey. (2019). Analysis of existing technological solutions of foam glass production. *Vestnik MGSU*. 14. 1584-1609. DOI:10.22227/1997-0935.2019.12.1584-1609. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/338233397\\_Analysis\\_of\\_existing\\_technological\\_solutions\\_of\\_foam\\_glass\\_production/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/338233397_Analysis_of_existing_technological_solutions_of_foam_glass_production/citation/download) (дата посещения 21.06.2020).
- [11] Scherbak A.S. Issledovaniye svoystv sovremennykh teploizolyatsionnykh materialov [Research of properties of modern heat-insulation materials]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk dniproetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana – Science and progress of transport. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryana*, 2013, no.2 (44), pp 136-143. (In Russian).
- [12] Lundyshev I.A. Eksperymental'ne doslidzhennya tekhnolohiy teploizolyatsiyni truboprovodiv monolitnym pinobetonom. [An experimental study of the technology of thermal insulation of pipelines with monolithic foam concrete]. *Magazine of civil engineering*, 2010, no. 5(15), pp. 49-52. doi: 10.18720/MCE.15.1
- [13] Determination of the Duration of Spherical-Shaped Berries Freezing Under the Conditions Stationary Heat Flow. *Modern Development Paths of Agricultural Production. Trends and Innovations*. 2019, part II, pp 405-414. doi: 10.1007/978-3-030-14918-5\_42.
- [14] Analiz termodynamichnykh protsesiv u pototsi povitrya [Analysis of thermodynamic processes in airflow]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva im. P.Vasylenka – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agri-*

- culture. P. Vasilenko, 2017, no. 187, pp.28-29. (In Ukrainian). Available at: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/4844> (дата посещения 21.06.2020)
- [15] Yalpachik V., Kurchev S., Verholantseva V. *Doslidzhennya protsesu teploobminu pry okhlo-dzhenni sharu zerna pshenytsi*. [Investigation of the process of heat exchange during cooling of a grain of wheat], *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva imeni Petra Vasylenka - Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Peter Vasylenko*, 2015, vol. 165(2), pp. 130-131. (In Ukrainian). Available at: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/3887> (дата посещения 21.06.2020)
- [16] Vinh Tung Le, Ngoc San Ha, Nam Seo Goo, Jae Young Kim. Insulation System Using High-Temperature Fibrous Insulation Materials. *Heat Transfer Engineering*, 2019, vol.40, pp 17-18. doi: org/10.1080/01457632.2018.1474602
- [17] Esam M. Alawadhi. Thermal Analysis of a Pipe Insulation with a Phase Change Material: Material Selection and Sizing. *Heat Transfer Engineering*, 2008, vol.29, pp 624-631. doi: org/10.1080/01457630801922469
- [18] Tolga Ural, Ali Daşdemir, Ali Keçebaş. Sensitivity Analysis of Optimum Insulation Thickness for Pipe Diameters in Pipe Insulation with Air Gap for City Pipelines. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 2019, vol.38 (5). doi: org/10.1002/ep.13155.
- [19] Ertürk, Mustafa. Optimum insulation thicknesses of pipes with respect to different insulation materials, fuels and climate zones in Turkey. *Energy, Elsevier*, 2016. vol. 113(C), pp 991-1003. doi: 10.1016/j.energy.2016.07.115
- [20] Dalla Rosa, A. & Li, H. & Svendsen, S., Method for optimal design of pipes for low-energy district heating, with focus on heat losses. *Energy, Elsevier*, 2011, vol. 36(5), pp 2407-2418. doi: 10.1016/j.energy.2011.01.024.
- [21] Gabrielaitiene Irina, Bøhm Benny, Sunden Bengt. Modelling temperature dynamics of a district heating system in Naestved, Denmark-A case study. *Energy Convers and Management* 2007; vol. 48(1): pp 78-86 doi: org/10.1016/j.enconman.2006.05.011.

**Сведения об авторах.**



**Стручаев Николай Иванович**  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Электротех-  
нологии и тепловые процессы»  
ТГАТУ, г. Мелитополь, Украи-  
на. Область научных интересов:  
теплотехнические аспекты  
энерго- и ресурсосбережения  
E-mail: [usun105@gmail.com](mailto:usun105@gmail.com)



**Журавель Дмитрий**  
**Павлович**, доктор технических  
наук, профессор кафедры  
«Технический сервис и  
системы в АПК», ТГАТУ,  
г. Мелитополь, Украина  
Область научных интересов:  
ресурсоэнергосберегающие  
технологии в АПК  
E-mail:  
[dmytro.zhuravel@tsatu.edu.ua](mailto:dmytro.zhuravel@tsatu.edu.ua)



**Постол Юлия Александровна**  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Электротех-  
нологии и тепловые процессы»,  
ТГАТУ, г. Мелитополь, Украи-  
на. Область научных интересов:  
теплотехнические аспекты  
энерго- и ресурсосбережения  
E-mail:  
[yuliapostol111@gmail.com](mailto:yuliapostol111@gmail.com)



**Гулевский Вадим Борисович**  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Электротех-  
нологии и тепловые процессы»,  
ТГАТУ, г. Мелитополь, Украи-  
на. Область научных интересов:  
ресурсоэнергосберегающие  
технологии в АПК  
E-mail: [v\\_gul@meta.ua](mailto:v_gul@meta.ua)



**Степин Юрий Алексеевич**  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Электротех-  
нологии и тепловые процессы»,  
ТГАТУ, г. Мелитополь, Украи-  
на. Область научных интересов:  
ресурсоэнергосберегающие  
технологии в АПК  
E-mail: [stepin2605@tsatu.edu.ua](mailto:stepin2605@tsatu.edu.ua)