

*О.А. Гаврилко, к.т.н., доц. кафедри БКМ НУ „Львівська політехніка”, Б.О. Білінський, к.т.н., доц. кафедри БКМ НУ „Львівська політехніка”, Б.М. Перетятко, к.т.н., ст. викладач кафедри БКМ НУ „Львівська політехніка”, О.І. Башинський, к.т.н., доцент, начальник кафедри НІДтаПА ЛДУ БЖД*

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ТЕМПЕРАТУРИ В ХОЛОДИЛЬНИКУ РЕСПІРАТОРА**

**Мета.** Розробка математичної моделі тепломасообмінних процесів в системі «навколишнє середовище - ізолюючий респіратор-холодильник».

**Методика.** Теоретичні дослідження тепломасообмінних процесів в ізолюючому регенеративній респіраторі з використанням теорії тепломасопереносу і урахуванням процесу нагрівання і танення водяного льоду в холодильнику.

**Результати.** Отримано залежності і результати досліджень динаміки температури нагрівання і танення водяного льоду в холодильнику ізолюючого регенеративного респіратора, похибка яких в порівнянні з даними експериментів не перевищує 12%. Наведено залежності для визначення температури внутрішнього простору респіратора, що враховують вплив температури навколишнього середовища, тяжкість роботи рятувальників, його геометричних і теплофізичних параметрів.

**Наукова новизна.** Вперше розроблено математичну модель тепломасообмінних процесів в системі «навколишнє середовище - ізолюючий респіратор-холодильник», що враховує теплові потоки, які проникають із зовнішнього середовища через оболонку респіратора, від тіла людини, що поглинаються або виділяються холодильником.

**Практична значимість.** Наведені результати роботи дозволяють визначити товщину і матеріал оболонки холодильника з більш низькими коефіцієнтами теплопровідності, які забезпечать істотне збільшення часу використання холодильника регенеративного респіратора.

**Ключові слова:** охолоджувальний елемент, ізолюючий регенеративний респіратор, холодильник, фазові перетворення, динаміка температури, теплопровідність, час використання

## MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMICS TEMPERATURES IN THE REFRIGERATOR OF THE REFRIGERATOR RESPIRATOR

The goal is to work a mathematical model of thermal exchange processes in the system "environment - isolating respirator-fridge."

**The methodology.** Theoretical studies of thermal exchange processes in isolating regenerative respirator using the theory of heat-mass and taking into account the process of heating and melting of water ice in the refrigerator.

**The results.** The dependence and results of the dynamics of the temperature of heating and melting of water ice in the refrigerator are isolated by the regenerative respirator, the error of which in comparison with the data of experiments does not exceed 12%.

**Scientific novelty.** For the first time a mathematical model of heat exchange processes in the system "environment - isolating respirator-refrigerator is developed, taking into account heat flows penetrating from the external environment through the shell of the respirator, from the human body, absorbed or released by the refrigerator.

**Practical significance.** These results allow to determine the thickness and material of the refrigerator shell with lower temperature conduction ratios, which will provide a significant increase in the time of use of the refrigerator regenerative respirator.

**Keywords:** isolating regenerative respirator, refrigerator, phase transformations, temperature dynamics, thermal conductivity.

**Постановка проблеми.** В даний час для поліпшення умов дихання рятувальники використовують респіратори з водольодяними холодильниками [1], в яких лід знаходиться в корпусах з алюмінієвими оболонками. Результати експериментальних досліджень показали, що в респіраторі Р-30 із застосуванням холодильника на основі водяного льоду при температурі навколишнього середовища плюс 40 °С і середньої тяжкості роботи рятувальників температура повітря, що вдихається може бути знижена максимум на плюс 8 °С, за дві години - в середньому на плюс 6 °С. Тобто, при використанні водяного льоду в якості холодоагенту в респіраторі вдалося протягом 100 хв підтримувати температурний режим вдихуваного повітря на рівні його 4-х годинного застосування, що є недостатнім. Отже, основна технічна характеристика - час використання респіратора з водольодяним холодильником отримана раніше на підставі експериментальних досліджень без урахування впливу зміни температури навколишнього середовища, різної тяжкості роботи рятувальників,

його геометричних і теплофізичних параметрів, можливості використання товщини і матеріалу оболонки з більш низьким коефіцієнтом теплопровідності, що дозволяють збільшити цей час.

**Мета дослідження.** Розробка математичної моделі тепломасообмінних процесів в системі «навколишнє середовище - ізолюючий респіратор-холодильник» для визначення часу використання холодильника.

**Виклад основного матеріалу.** Проведемо дослідження процесу нагрівання і танення льоду на підставі прийнятої вперше розрахункової схеми і розробленої математичної моделі, які наведені нижче. Так як холодильник має циліндричну форму (рис. 1), то динаміку температури в ньому опишемо системою диференціальних рівнянь

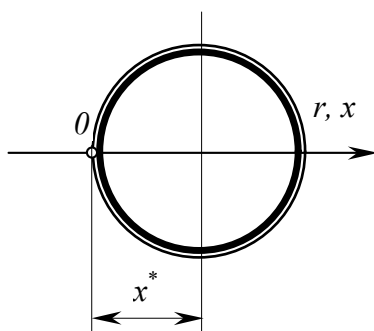


Рис. 1. Розрахункова схема холодильника

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial \tau} &= a_{\text{п}}^2 \frac{\partial^2 T_{\text{п}}}{\partial r^2}, & r \in (-\delta_0; 0) \\ \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} &= \tilde{a}^2 \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial r^2}, & r \in (0; x) \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} &= \bar{a}^2 \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2}, & r \in (x; R) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де  $r$  – координата, яка відраховується від поверхні холодильника, по нормалі до нього, до його центру, м;

$x$  – значення координати на границі фазового перетворення льоду в воду, м;

$R$  – радіус основи холодильника, м;

$x^* = R$  – гранична глибина фронту плавлення льоду, м;

$T_{\text{п}}$  – температура у внутрішньому просторі респіратора (далі – ПР), К;

$a_{\text{п}}^2 \approx 1,87 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  – коефіцієнт теплопровідності ПР;

$\tilde{T}$  – температура води, К;

$\tilde{a}^2 \approx 1,30 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  – коефіцієнт теплопровідності води;

$\bar{T}$  – температура льоду, К;

$\bar{a}^2 \approx 1,23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  – коефіцієнт теплопровідності льоду;

$\delta_0$  – товщина оболонки холодильника, м.

Вважаємо, що координата фронту фазового перетворення є функцією часу:  $x = x(t)$ .

Приймаються наступні початкові умови:

$$T_{\Pi}(r,0) = T_0; \quad \bar{T}(r,0) = T_0 - \Delta_0; \quad x(0) = 0, \quad (2)$$

де  $T_0$  – нормальна (стандартна) температура:  $T_0 = 293 \text{ К}$ ;

$\Delta_0$  – різниця між нормальною температурою і початковою температурою льоду, К.

Фактично температура в ПР з плином часу відрізняється від нормальної. Однак припускаємо, що температура холодильника, як і температура його оболонки, буде змінюватися в малі дискретні моменти часу, в межах яких температуру в ПР можна вважати постійною.

На поверхні холодильника задамо граничні умови третього роду [2]

$$\alpha_3 (T_{\Pi}|_{r=-\Delta r} - \tilde{T}|_{r=0}) = -\tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} \Big|_{r=0}, \quad (3)$$

де  $\alpha_3$  – коефіцієнт теплообміну між ПР і холодильником, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\Delta r$  – елементарна (нескінченно мала) відстань від поверхні холодильника, м;

$\tilde{\lambda} \approx 0,544 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  – теплопровідність води.

На кордоні фазового перетворення температура води і льоду дорівнює температурі плавлення льоду  $\dot{T} = 273 \text{ К} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\tilde{T}|_{r=x} = \bar{T}|_{r=x} = \dot{T}, \quad (4)$$

а різниця теплових потоків пропорційна швидкості просування кордону фазових перетворень:

$$\tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} - \bar{\lambda} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \eta \frac{\partial x}{\partial \tau}, \quad (5)$$

де  $\eta \approx 3,06 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>3</sup> – питома теплота фазового перетворення.

Так як

$$\alpha_3 \left( T_{\text{II}} \Big|_{r=-\Delta r} - \tilde{T} \Big|_{r=0} \right) = \alpha_3 \Delta r \frac{T_{\text{II}} \Big|_{r=-\Delta r} - \tilde{T} \Big|_{r=0}}{\Delta r} = -\lambda_{\text{II}} \frac{\partial T_{\text{II}}}{\partial r} \Big|_{r=0}, \quad (6)$$

де  $\lambda_{\text{I}}$ , Вт/(м·К) – теплопровідність ПР, тоді після підстановки (6) в (3) на поверхні холодильника отримаємо граничні умови четвёртого роду

$$\lambda_{\text{II}} \frac{\partial T_{\text{II}}}{\partial r} \Big|_{r=0} = \tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} \Big|_{r=0}, \quad (7)$$

яке слід доповнити умовою безперервності температурного поля

$$T_{\text{II}}(0, \tau) = \tilde{T}(0, \tau). \quad (8)$$

Тоді загальне рішення рівнянь (1) представимо у вигляді

$$T_{\text{II}} = A_{\text{II}} + B_{\text{II}} \cdot \psi(z_{\text{II}}); \quad \tilde{T} = \tilde{A} + \tilde{B} \cdot \psi(\tilde{z}); \quad \bar{T} = \bar{A} + \bar{B} \cdot \psi(\bar{z}), \quad (9)$$

де  $A_{\text{II}}, B_{\text{II}}, \tilde{A}, \tilde{B}, \bar{A}, \bar{B}$  – визначаються з крайових умов;

$\psi(z) = 2 / \sqrt{\pi} \int_0^z e^{-\xi^2} d\xi$  – інтегральна функція або так звана функція помилок

$\text{erf}(z)$ ;  $z_{\text{II}} = \frac{r}{2 \cdot a_{\text{II}} \cdot \sqrt{\tau}}$ ,  $\tilde{z} = \frac{r}{2 \cdot \tilde{a} \cdot \sqrt{\tau}}$  и  $\bar{z} = \frac{r}{2 \cdot \bar{a} \cdot \sqrt{\tau}}$  – значення безрозмірної

просторової координати в межах ПР, рідкої і твердої фаз холодильника відповідно.

З граничної умови (4) з урахуванням (9) випливає, що

$$\tilde{A} + \tilde{B} \cdot \psi\left(\frac{x}{2 \cdot \tilde{a} \cdot \sqrt{\tau}}\right) = \bar{A} + \bar{B} \cdot \psi\left(\frac{x}{2 \cdot \bar{a} \cdot \sqrt{\tau}}\right) = \dot{T}. \quad (10)$$

Оскільки в правій частині (10) константа - ліва частина рівняння не повинна залежати від координати і часу, а це можливо за умови

$$x = 2 \cdot \dot{a} \cdot \sqrt{\tau}, \quad (11)$$

де  $\dot{a} = \text{const}$  – коефіцієнт пропорційності, що має розмірність, то на підставі (5), відповідно до (10) і (11) для визначення  $\dot{a}$  отримаємо наступне рівняння

$$\frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{a}} \cdot \tilde{B} \cdot e^{-\frac{\dot{a}^2}{\tilde{a}^2}} - \frac{\bar{\lambda}}{\bar{a}} \cdot \bar{B} \cdot e^{-\frac{\dot{a}^2}{\bar{a}^2}} = \sqrt{\pi} \cdot \eta \cdot \dot{a}. \quad (12)$$

Рішення цього рівняння може бути отримано тільки чисельними (ітераційними) методами. Коефіцієнти рішення рівняння (9) визначаємо в наступному порядку.

З першої початкової умови (2), при умові, що при  $r \leq 0$  и  $\tau \rightarrow 0$ :  $\psi \rightarrow -1$ , слідує наступне

$$A_{\text{п}} = T_0 + B_{\text{п}}, \quad (13)$$

далі, на підставі (7):

$$\frac{\lambda_{\text{п}}}{a_{\text{п}}} B_{\text{п}} = \frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{a}} \tilde{B}, \text{ тоді } B_{\text{п}} = \tilde{b} \cdot \tilde{B}, \quad (14)$$

де позначено  $\tilde{b} = (\tilde{\lambda} \cdot a_{\text{п}}) / (\lambda_{\text{п}} \cdot \tilde{a})$ .

Рівність температури ПР і холодильника у поверхні (7) для вирішення (8) буде виконуватися, якщо

$$\tilde{A} = A_{\text{п}}, \quad (15)$$

звідки після підстановки (14) в (13), а потім (13) в (15), отримаємо

$$\tilde{A} = T_0 - B_{\text{п}} = T_0 - \tilde{b} \cdot \tilde{B}. \quad (16)$$

Зв'язок між ними будемо визначати з другої початкової умови (2):

$$\bar{A} = T_0 - \Delta_0 - \bar{B}. \quad (17)$$

З урахуванням (16) і (17) на підставі (10) для визначення і отримуємо систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} T_0 - \tilde{b} \cdot \tilde{B} + \psi(\dot{a}/\tilde{a}) &= \dot{T} \\ (T_0 - \Delta_0 - \bar{B}) + \bar{B} + \psi(\dot{a}/\bar{a}) &= \dot{T} \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

з якої випливає

$$\tilde{B} = \frac{T_0 - \dot{T}}{\tilde{b} - \psi(\dot{a}/\tilde{a})}; \quad \bar{B} = \frac{T_0 - \dot{T}}{1 - \psi(\dot{a}/\bar{a})}. \quad (19)$$

В результаті рівняння (12) для визначення перетворимо до наступного вигляду:

$$\dot{a} = \frac{T_0 - \dot{T}}{\eta \cdot \sqrt{\pi}} \frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{a}} \left[ \frac{1}{\tilde{b} - \psi(\dot{a}/\tilde{a})} e^{-\dot{a}^2/\tilde{a}} - \bar{b} \frac{1 - \bar{\Delta}_0}{1 - \psi(\dot{a}/\bar{a})} e^{-\dot{a}^2/\bar{a}} \right], \quad (20)$$

де

$$\bar{b} = \frac{\bar{\lambda} \cdot \tilde{a}}{\tilde{\lambda} \cdot \bar{a}}; \quad \bar{\Delta}_0 = \frac{\Delta_0}{T_0 - \dot{T}}. \quad (21)$$

Таким чином, для проведення розрахунків температури холодильника за формулами (9) необхідно спочатку визначити параметр фронту фазових перетворень з рівняння (21), потім розрахувати, за формулами (19), (14)

і  $\bar{A}$ ,  $\tilde{A}$ ,  $A_{\text{п}}$  – по (17-15). Моделювання динаміки температурного поля по глибині холодильника необхідно починати з визначення положення кордону фазових перетворень за формулою (11) в заданий момент часу. Розрахунки виконуємо до моменту, коли час досягне фронту плавлення льоду в холодильнику.

Результати розрахунку динаміки температури холодильника, зокрема, при максимальній температурі в ПР, яка дорівнює  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\delta = 120\text{ мм}$ ,  $\delta = 1,2\text{ мм}$  (ма-теріал оболонки - алюміній), маса льоду  $1,0\text{ кг}$ , при вологості повітря, що дорівнює  $100\%$ , наведені на рис. 2.

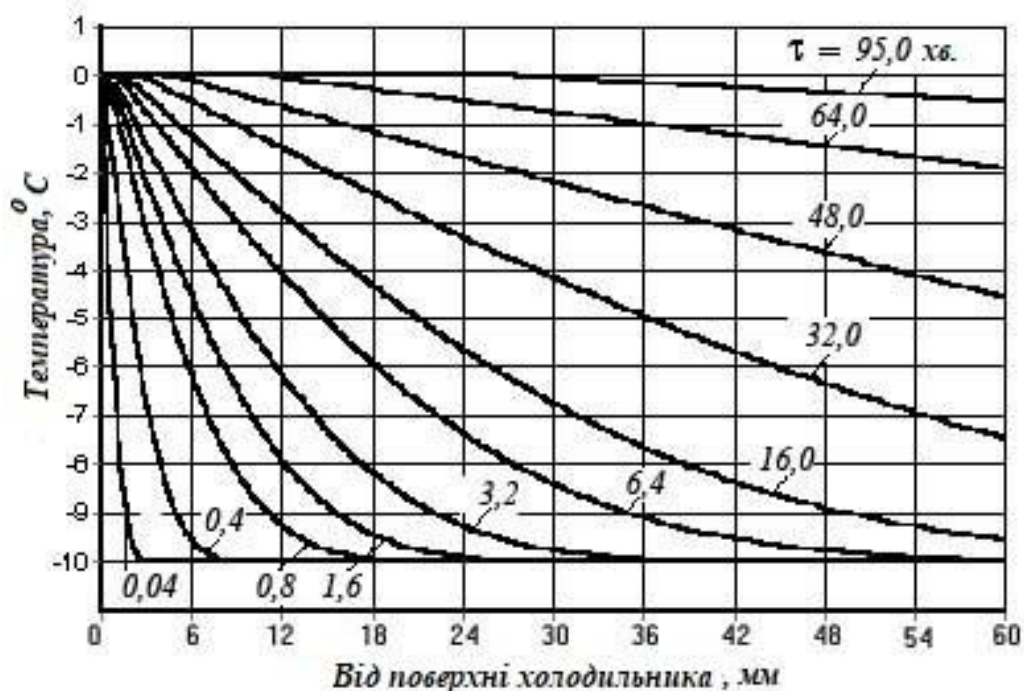


Рис. 2. Динаміка температури холодильника при температурі повітря навколишнього середовища  $T_0 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

При цьому отримано значення  $\dot{a} \approx 8,5 \cdot 10^{-5} \text{ і} \cdot \tilde{n}^{-\frac{1}{2}}$  і період танення

$$\tau^* = \frac{x^{*2}}{4 \cdot \dot{a}^2}, \quad (22)$$

становить від 95 до 100 хв. Похибка розрахунку (відношення абсолютної величини різниці між лівою і правою частинами рівняння (20) до значення функції правої частини) відповідно склала 1,7% і 1,2%.

Для дослідження динаміки температури води в холодильнику після танення льоду ( $\tau \geq \tau^*$ ) використовуємо друге рівняння системи (1) у вигляді

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} = \tilde{a}^2 \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{r}^2}, \quad (23)$$



де  $\tilde{\tau} = \tau - \tau^*$  – час з моменту завершення періоду танення льоду, с;

$\tilde{r} = R - r$  – координата, відраховується від осі холодильника в радіальному напрямку до його поверхні, м, з початковою умовою

$$T(\tilde{r}, 0) = \dot{T} \quad (24)$$

і граничними умовами

$$-\tilde{\lambda}_y \left. \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=0} = \tilde{\alpha}_y (\tilde{T}|_{\tilde{r}=0} - T_{\text{п}}); \quad \left. \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=R} = 0, \quad (25)$$

де  $\tilde{\lambda}_y \neq \lambda_y$  и  $\tilde{\alpha}_y \neq \alpha_y$  – коефіцієнти теплопровідності холодильника і теплообміну між ПР і холодильником після завершення періоду танення льоду.

Рішення цього рівняння з представленими крайовими умовами має вигляд

$$\tilde{T}(\tilde{\xi}, \tilde{Fo}) = \dot{T} + (T_{\text{п}} - \dot{T}) \cdot \left[ 1 - \frac{1}{4} \cdot \left( 1 + \frac{2}{\tilde{Bi}} - \tilde{\xi}^2 \right) \cdot \dot{A} \cdot e^{-\dot{A} \cdot \tilde{Fo}} \right], \quad (26)$$

де  $\tilde{Fo} = \frac{a^2 \cdot \tilde{\tau}}{R^2}$  – відносна величина часу (число Фур'є);

$\tilde{\xi} = \frac{\tilde{r}}{R}$  – відносна величина просторової координати;

$\tilde{Bi} = \frac{\tilde{\alpha}_y}{\tilde{\lambda}_y}$  – число Біо;

$$\dot{A} = \frac{6 \cdot \tilde{Bi} (\tilde{Bi} + 4)}{\tilde{Bi}^2 + 6 \cdot \tilde{Bi} + 12}. \quad (27)$$

Результати одного з варіантів розрахунків безрозмірної (надлишкової) температури води при  $\tilde{Bi}=1,0$  в діапазоні  $\tilde{Fo} = 0,1 \dots 3,0$  наведені на рис. 3, де

$$\tilde{t}(\tilde{\xi}, \tilde{Fo}) = 1 - \frac{1}{4} \cdot \left( 1 + \frac{2}{\tilde{Bi}} - \tilde{\xi}^2 \right) \cdot \dot{A} \cdot e^{-\dot{A} \cdot \tilde{Fo}} \quad (28)$$

При цьому, зокрема, отримано, що при вищевказаних вихідних даних час нагрівання води до температури 25°C, при якій ще відбувається охолодження органів дихання рятувальників, дорівнює приблизно 10 хв. Отже, загальний час охолоджуючої дії становить від 105 до 110 хв, що підтверджує раніше отримані експериментальні дані про час

застосування холодильника респіратора [1], похибка яких в порівнянні з результатами теорії не перевищує 12%.

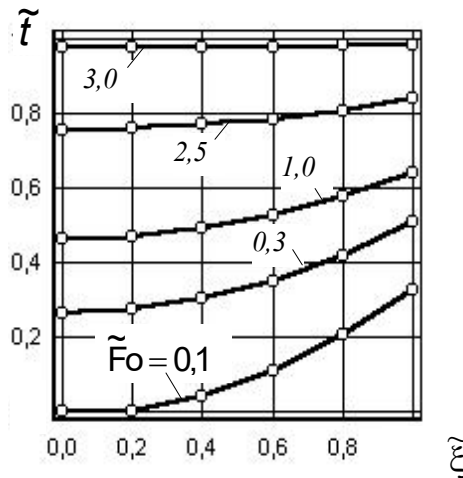


Рис. 3. Динаміка температури нагрівання води в холодильнику:

$$Bi=1 \quad \tilde{Fo} = 0,1 \quad 3,0$$

Отримана аналітична залежність температури розталого льоду від температури в ПР і інтенсивності теплообміну із зовнішнім середовищем і тілом людини використані в свою чергу при моделюванні динаміки температури в ПР з використанням холодильника.

Кількість теплоти,  $Q_i$ , Вт, яка проникла в ПР, може бути визначена на основі рівняння її балансу:

$$Q_n = Q_c + Q_q + Q_n, \quad (29)$$

де  $Q_c$ ,  $Q_q$ ,  $Q_n$  – теплові потоки, які проникають із зовнішнього середовища через оболонку респіратору, від тіла людини, що поглинаються або виділяються холодильником відповідно.

Надалі передбачається, що величина  $Q_q$  – відома змінна константа, що залежить від тяжкості виконуваної рятувальником роботи.

Для процесу перенесення теплоти (3.6) представимо у вигляді

$$\rho c_p V_n \frac{dT_n}{d\tau} = \alpha_n S_n (T_\Delta - T_n) + Q_q - \alpha_3 S_3 (T_n - T_3) + \Delta T_q, \quad (30)$$

де  $\rho$ ,  $c_p$  – густина,  $\text{кг/м}^3$ , питома теплоємність,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , середовища ПР;

$V_n$  – об'єм ПР,  $\text{м}^3$ ;

$T_n$  – температура в ПР, К;

$\alpha_n$  – сумарний коефіцієнт конвективного і променистого теплообміну між внутрішньою поверхнею оболонки респіратору і його ПР,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$S_{\Pi}$  – площа внутрішньої поверхні оболонки респіратора,  $\text{м}^2$ ;

$T_{\Delta} = T_3|_{h=\Delta}$  – температура внутрішньої поверхні оболонки респіратора, К;

$\alpha_3$  – сумарний коефіцієнт конвективного і променистого теплообміну між поверхнею оболонки холодильника і ПР,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$S_3$  – площа поверхні холодильника,  $\text{м}^2$ ;

$T_3$  – температура льоду, К;

$\Delta T_q$  – К.

Для дослідження динаміки температури в ПР з урахуванням отриманих вище результатів знову звернемося до рівняння (30).

Отже, відповідно до (30), кількість теплоти, Вт, акумульованої в ПР (ліва частина рівняння), дорівнює алгебраїчній сумі теплового потоку, який проник в ПР ззовні  $Q_c = \alpha_{\Pi} \cdot S_{\Pi} \cdot (T_{\Delta} - T_{\Pi})$ ; теплового потоку, що поглинається холодильником  $Q_3 = \alpha_3 \cdot S_3 \cdot (T_{\Pi} - T_3)$  і теплового потоку  $Q_q$ . Звідси випливає, що динаміка температури в ПР залежить як від співвідношення інтенсивностей теплообміну  $\bar{\alpha}_3 = \alpha_3 / \alpha_{\Pi}$  (між холодильником і ПР, оболонкою і ПР), так і від співвідношення  $\bar{S}_3 = S_3 / S_{\Pi}$  між площею холодильника і площею внутрішньої поверхні респіратора. Для визначення характеру цієї залежності перейдемо до знаходження рішення (30), в якому будуть фігурувати безрозмірний комплекс  $\alpha = \bar{\alpha}_3$  і константа  $s = \bar{S}_3$ . Розділимо обидві частини (30) на питомий тепловий потік ззовні  $q_{\Pi} = \alpha_{\Pi} \cdot S_{\Pi}$ , Вт/К. В результаті отримуємо

$$\tau_{\Delta} \frac{\partial T_{\Pi}}{\partial \tau} = (T_{\Delta} - T_{\Pi}) - \alpha \cdot s \cdot (T_{\Pi} - T_3) + \Delta T_q, \quad (31)$$

де  $\tau_{\Delta} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot V_{\Pi}}{\alpha_{\Pi} \cdot S_{\Pi}}$  – час, протягом якого в ПР акумулюється теплота, що проникла ззовні, с;

$$\Delta T_q = \frac{Q_q}{\alpha_{\Pi} \cdot S_{\Pi}}, \quad (32)$$

де  $\Delta T_q$  – приріст температури в ПР за рахунок теплового потоку  $Q_q$ , К.

Введемо безрозмірні змінні: відносні час і температуру, відповідно.

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_{\Delta}}, \quad t = (T_0 - T_3) / (T_{\Delta} - T_3) \quad (33)$$

З урахуванням цих змінних (31) представимо у вигляді

$$\frac{dt_{\text{II}}}{d\bar{\tau}} + (1 + \alpha \cdot s) \cdot t_{\text{II}} = 1 + \Delta t_{\text{q}}.$$

Рішення цього рівняння відповідно до [3] має вигляд

$$t_{\text{II}} = e^{-\int (1+\alpha \cdot s) d\bar{\tau}} \left[ e^{\int (1+\alpha \cdot s) d\bar{\tau}} d\bar{\tau} + \text{const} \right]. \quad (33)$$

Після інтегрування отримаємо

$$t_{\text{I}} = \frac{1 + \Delta t_{\text{q}}}{1 + \alpha s} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1 + \alpha s}{1 + \Delta t_{\text{q}}} \cdot t_0 \right) \cdot e^{-(1 + \alpha s) \cdot \bar{\tau}} \right], \quad (35)$$

де  $t_0 = (T_0 - T_s) / (T_{\Delta} - T_s)$  – відносне значення початкової температури в ПР. Граничний (усталений) розподіл температури в ПР після закінчення тривалого проміжку часу ( $\bar{\tau} \rightarrow \infty$ )

$$t_{\text{I} \infty} = \frac{1}{1 + \alpha s}. \quad (36)$$

Отже, є можливість по фактичній площі поверхні холодильника і інтенсивності теплообміну між зовнішнім середовищем, ПР, холодильником і людиною визначати граничну температуру в ПР. Результати проведених теоретичних досліджень дозволяють здійснювати прогноз температурних умов в ПР з урахуванням заданих теплофізичних властивостей і площі (маси) холодильника протягом заданого часу роботи рятувальників.

Таким чином, розроблена математична модель нестационарних процесів тепломасопереносу в системі «навколишнє середовище - ізолюючий респіратор - холодильник» дозволяє враховувати температуру навколишнього середовища, теплофізичні характеристики і геометричні параметри респіратора і холодильника, фазове перетворення холодоагенту (льоду в воду) і подальший його теплообмін, енерговитрати людини і ставлення площі, займаної холодильником, до внутрішньої площі простору респіратора. Це дає можливість вибрати товщину і матеріал оболонки холодильника з більш низьким коефіцієнтом температуропровідності, що забезпечить істотне збільшення часу використання холодильника.

### Висновки

1. Вперше розроблено математичну модель нестационарних процесів тепломасопереносу в системі «навколишнє середовище - ізолюючий респіратор -

холодильник», що враховує температуру навколишнього середовища, теплофізичні характеристики і геометричні параметри респіратора і холодильника, фазове перетворення холодоагенту (льоду в воду) і подальший його теплообмін, енерговитрати людини та співставлення площі, яку займає холодильник, до внутрішньої площі простору респіратора.

2. При цьому, зокрема, отримано, що загальний час охолоджуючої дії становить від 105 до 110 хв, що підтверджує раніше отримані експериментальні дані про час застосування холодильника респіратора, похибка яких в порівнянні з результатами теорії не перевищує 12%.

3. Надалі необхідно, використовуючи вищенаведену модель, вибрати товщину і матеріал оболонки холодильника з більш низьким коефіцієнтом теплопровідності, що забезпечить істотне збільшення часу використання холодильника, а, отже, респіратора.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Діденко Н.С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, – 1990. – 160 с.
2. Лыков А.В. Теплообмен / Лыков А.В. // Справочник. – М.: Энергия, – 1972. – 560 с.
3. Мучник Г.Ф. Методы теории теплопроводности / Мучник Г.Ф., Рубашов И.Б. // – М.: Высшая школа, – 1970. – 288 с.
4. Гаврилко А.А. Разработка метода и технических средств обеспечения безопасности пожарных при эрготермических нагрузках: дис. канд. техн. наук: спец. 05.26.01 «Охрана труда» / УкрНИИПБ.– Киев.- 2005.– 177 с.
5. Гаврилко О.А. Математичне моделювання нестационарного переносу тепла в захисному одязі пожежних і гірничорятувальників з водольодяною системою охолодження / О.А. Гаврилко // Пожежна безпека: Зб. наук. праць, ЛПБ: УкрНДПБ МНС України. – Львів. 2002. – С. 76 –82.
6. Гаврилко А.А. Теоретические исследования динамики расхода жидкости в системе охлаждения ног пожарного / А.А. Гаврилко, И.Ф. Марийчук., А.В.Ревякин //Научный вестник УкрНДПБ/. –2002, № 2. – С. 217 – 222.
7. Гаврилко А.А. Моделирование динамики температур в системах местного охлаждения защитной одежды пожарных / А.А. Гаврилко // Пожежна безпека: зб. наук. праць, УкрНДПБ МНС України. – Львів, 2004. - №4.С. 20-25.
8. Гаврилко О.А. Математичне моделювання нестационарного переносу тепла в захисному одязі пожежних і гірничорятувальників з водольодяною системою охолодження /

О.А Гаврилко //Пожежна безпека: зб. наук. праць, ЛІПБ: УкрНДІПБ МНС України. – Львів. 2002. – С. 76 –82.

9. Наказ МВС України від 26.04.2018 №340 „Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж”. – К.:Вид-во МНСУ, 2018. – 149 с.

10. Наказ МНС України від 07.05.2007 р. № 312 „Про затвердження Правил безпеки праці в органах і підрозділах Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи” [Текст]. /МНС України. – Офіц. вид. – К.:Вид-во МНСУ, 2007– 282 с.

## REFERENCES

1. Didenko NS Regenerative respirators for mining operations. - 2nd ed., Reworked. and ext. - М .: Nedra, - 1990. - 160 p.

2. Lykov AV Heat and mass transfer / Lykov AV // Directory. - М.: Energy, - 1972. - 560 p.

3. Muchnik GF Methods of the theory of thermal conductivity / Muchnik GF, Rubashov IB // - М .: High school, - 1970. - 288 p.

4. Gavrillo O.A. Development of a method and technical means of ensuring safety of firefighters at ergothermic loadings: dis. Cand. tech. Science: special. 05.26.01 "Labor protection" / UkrNIIPB.– Kiyv.- 2005.– 177 p.

5. Gavrillo OA Mathematical modeling of non-stationary heat transfer in protective clothing of firefighters and rescuers with a water cooling system / O.A. Gavrillo // Fire safety: Coll. Science. works, LIPB: UkrNDIPB of the Ministry of Emergencies of Ukraine. - Lviv. 2002. - P. 76 –82.

6. Gavrillo AA Theoretical studies of the dynamics of fluid consumption in the cooling system of the firefighter's feet / O.A. Gavrillo., I.P. Mariychuk., AV Revyakin // Scientific Bulletin of UkrNDIPB /. —2002, № 2. - P. 217 - 222.

7. Gavrillo AA Modeling of temperature dynamics in local cooling systems of protective clothing of firefighters / A.A. Gavrillo // Fire safety: coll. Science. works, UkrNDIPB of the Ministry of Emergencies of Ukraine. - Lviv, 2004. - №4.C. 20-25.

8. Gavrillo O.A. Mathematical modeling of non-stationary heat transfer in protective clothing of firefighters and rescuers with a water cooling system / O.A. Gavrillo // Fire safety: collection. Science. works, LIPB: UkrNDIPB of the Ministry of Emergencies of Ukraine. - Lviv. 2002. - P. 76 –82.

9. Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated 26.04.2018 №340 „On approval of the Statute of actions in emergency situations of management bodies and subdivisions of the

Civil Protection Rescue Service and the Statute of actions of management bodies and subdivisions of the Civil Protection Rescue Service during firefighting”. - K.: MNSU Publishing House, 2018. - 149 p.

10. Order of the Ministry of Emergencies of Ukraine dated 07.05.2007 № 312 “On approval of the Rules of labor safety in the bodies and departments of the Ministry of Emergencies and protection of the population from the consequences of the Chernobyl disaster” [Text]. / Ministry of Emergencies of Ukraine. - Officer. kind. - K.: MNSU Publishing House, 2007– 282 c.