

*М.М. Семерак<sup>1</sup>, д-р техн. наук, професор, А.М. Домінік<sup>1</sup>, К.І. Мигаленко<sup>2</sup>, Д.В. Руденко<sup>1</sup>*  
<sup>1</sup>(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності),  
<sup>2</sup>(Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля)

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКУ ФАКЕЛА ПОЖЕЖІ

Запропоновано методику визначення теплових потоків, спрямованих від пожежі до пожежної техніки залежно від температури полум'я, його розмірів, віддалі до осередку пожежі. На основі законів теплообміну випромінюванням досліджено залежність величини теплового потоку полум'я від його температури, розмірів, віддалі до найближчих предметів, розташування в просторі. Результати досліджень зображені графічно.

**Ключові слова:** пожежа, випромінювання, теплові потоки, температура.

**Актуальність теми.** Теплообмін між факелом пожежі і навколишніми предметами та механізмами здійснюється завдяки теплопровідності, конвекції і випромінювання. Із збільшенням температури факела, випромінювання збільшується, оскільки зростає його внутрішня енергія. Залежність інтенсивності випромінювання від температури значно більша, ніж від теплопровідності і конвекції. При високих температурах (600°C і більше) поширення тепла променевим теплообміном є переважаючим порівняно з конвекцією і теплопровідністю. Випромінювальні характеристики факела полум'я та його структура залежать від складу горючого матеріалу [1].

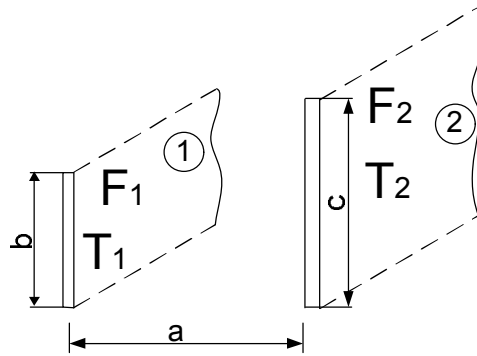
Важливим є дослідження теплового потоку факела в необмеженому об'ємі, тобто при горінні будівель, споруд, відкритих складів горючих речовин, резервуарних парків. В цьому випадку передача тепла в напрямку об'єкта внаслідок випромінювання може спричинити в них поломку, втрату працездатного стану, пожежу або вибух. Випромінювання факела створює небезпеку для життя і здоров'я людей, а також утруднює дії пожежників, пожежної техніки, пересувних модулів призначених для гасіння пожеж.

**Постановка задачі.** Під час пожежі будівель і споруд на промислових підприємствах нафтової та хімічної промисловості виділяється велика кількість тепла, значна частина якого передається до навколишніх тіл. Величина теплового потоку залежить від температури полум'я, його форми і площі, віддалі до тіл, що нагріваються, кутових коефіцієнтів випромінювання та ступеня чорноти полум'я і тіл.

**Виклад основного матеріалу.** Інтенсивність і величина нагріву навколишніх предметів, пожежної техніки, будівель і споруд залежить від величини теплового потоку, обумовленого пожежею. При дослідженні теплообміну випромінювання між факелом і будівельними конструкціями та пожежною технікою необхідно визначити долю енергії випромінювання факела, яка поглинається конструкціями та об'єктами. Якщо факел рухається вгору паралельно до конструкції, то цей потік визначається за формулою [1-2].

$$q = \varepsilon_{36} \cdot 5.67 \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \cdot \phi_{2-1}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_{36} = \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1}$  – зведений ступінь чорноти системи полум'я – конструкція (об'єкт);  $\varepsilon_1$  – ступінь чорноти поверхні конструкції (об'єкта);  $\varepsilon_2$  – ступінь чорноти факела;  $\phi_{2-1}$  – частина повної енергії випромінювання факела, яка поглинається поверхнею конструкції (об'єкта) (кутовий коефіцієнт випромінювання);  $T_1$  – температура поверхні конструкції (об'єкта), K;  $T_2$  – температура факела, K (рис. 1).



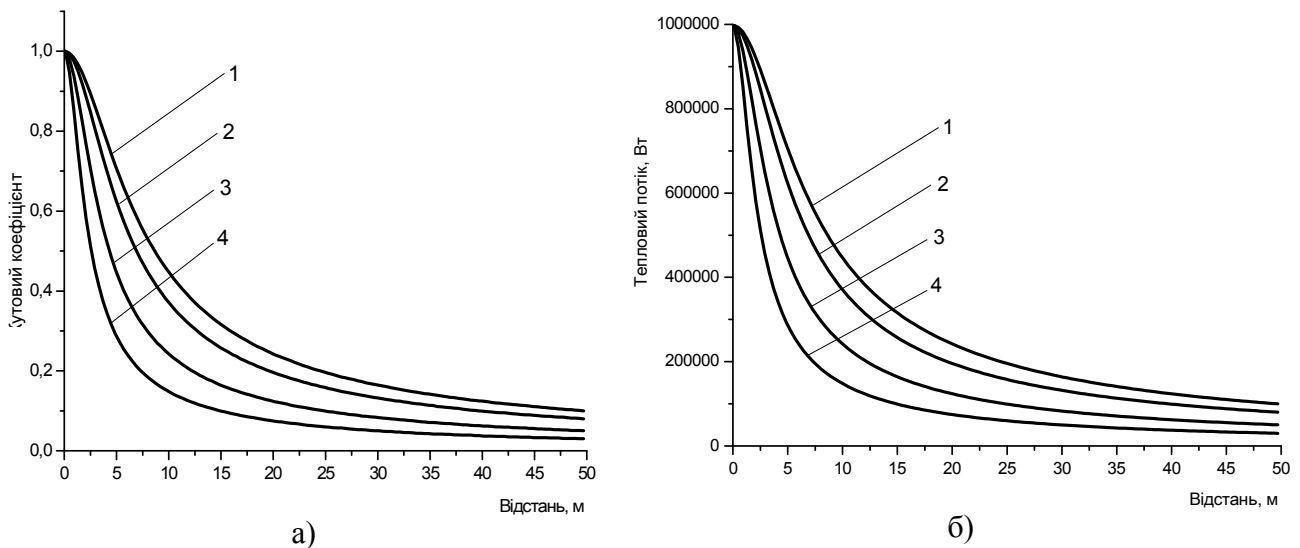
**Рис. 1.** Схема взаємного розміщення пересувного модуля “1” і факела “2”

Якщо висота факела  $c$ , висота пожежного модуля  $b$ , а віддаль між ними  $a$ , то кутовий коефіцієнт випромінювання визначаємо за формулою [3]:

$$\phi_{2-1} = \frac{1}{2 \cdot \frac{c}{a}} \left( \sqrt{\left(\frac{b+c}{a}\right)^2 + 4} - \sqrt{\left(\frac{b-c}{a}\right)^2 + 4} \right) \quad (2)$$

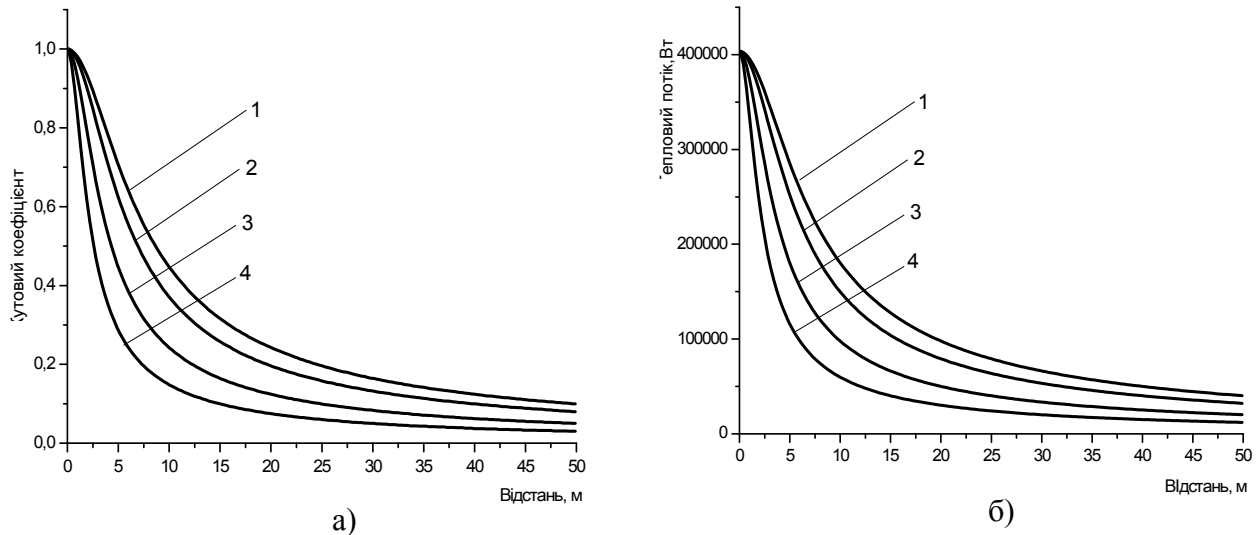
За формулою (1) проведені розрахунки величини теплового потоку, що падає на поверхню захисного кожуха пожежної техніки (модуля) залежно від віддалі  $a$  та величини температури  $T_1$  і  $T_2$ . Розрахунки проведені для таких параметрів:

1)  $c = 3 \dots 10$  м,  $b = 0,5$  м,  $a = 0,1 \dots 50$  м,  $T_1 = 300$  К,  $T_2 = 1473$  К,  $\varepsilon_1 = 0,27$ ,  $\varepsilon_2 = 0,96$  (горіння бензину у резервуарах). Результати зображені графічно на рисунку 2.



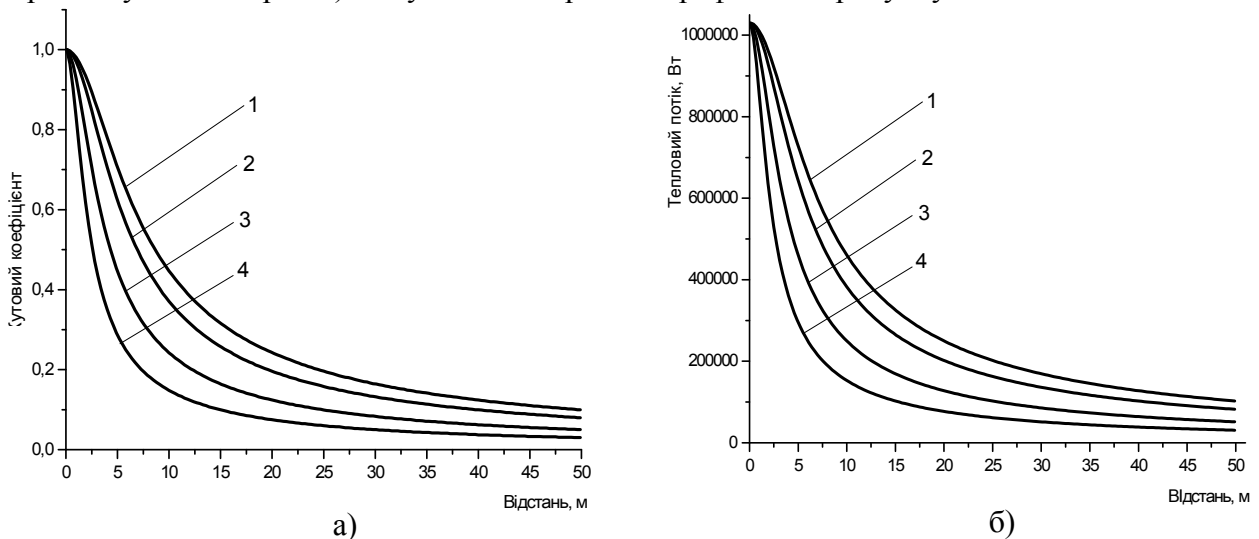
**Рис. 2.** Графіки залежності кутового коефіцієнта (а) та теплового потоку (б) від висоти полум'я і відстані між модулем і факелом  
1 – при висоті полум'я 10 м; 2 – при 8 м; 3 – при 5 м; 4 – при 3 м

2)  $c = 3 \dots 10$  м,  $b = 0,5$  м,  $a = 0,1 \dots 50$  м,  $T_1 = 300$  К,  $T_2 = 1147$  К,  $\varepsilon_1 = 0,27$ ,  $\varepsilon_2 = 0,7$  (горіння деревини). Результати зображені графічно на рисунку 3.



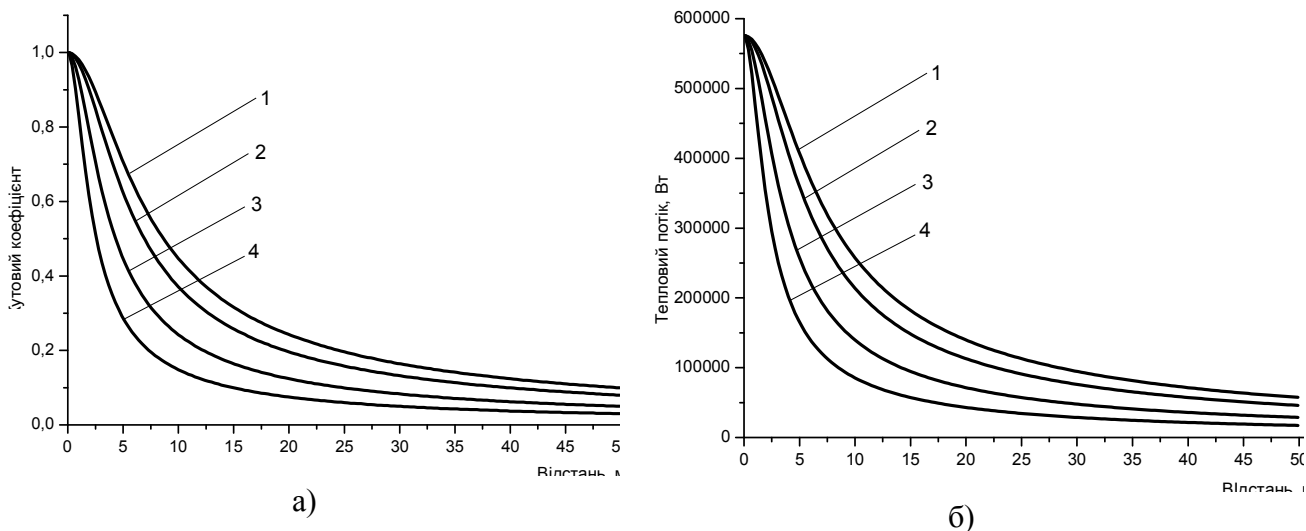
**Рис. 3.** Графіки залежності кутового коефіцієнта (а) та теплового потоку (б) від висоти полум'я і відстані між модулем і факелом:  
 1 – при висоті полум'я 10 м; 2 – при – 8 м; 3 – при – 5 м; 4 – при – 3 м

3)  $c = 3 \dots 10$  м,  $b = 0,5$  м,  $a = 0,1 \dots 50$  м,  $T_1 = 300$  К  $T_2 = 1473$  К  $\varepsilon_1 = 0,27$ ,  $\varepsilon_2 = 0,86$  (горіння гумових виробів). Результати зображені графічно на рисунку 4.



**Рис. 4.** Графіки залежності кутового коефіцієнта (а) та теплового потоку (б) від висоти полум'я і відстані між модулем і факелом:  
 1 – при висоті полум'я 10 м; 2 – при – 8 м; 3 – при – 5 м; 4 – при – 3 м

4)  $c = 3 \dots 10$  м,  $b = 0,5$  м,  $a = 0,1 \dots 50$  м,  $T_1 = 300$  К  $T_2 = 1273$  К  $\varepsilon_1 = 0,27$ ,  $\varepsilon_2 = 0,85$  (горіння мазуту у резервуарах). Результати зображені графічно на рисунку 5.



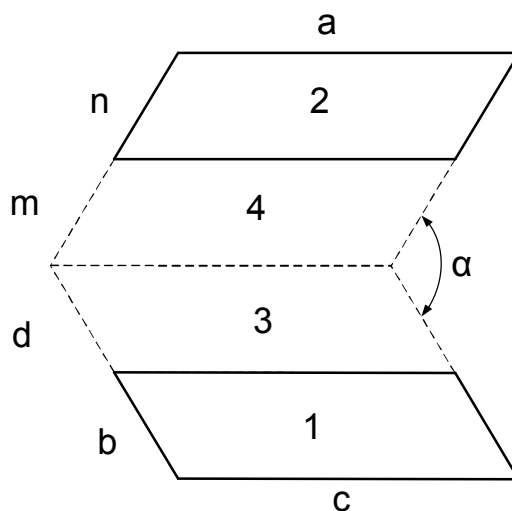
**Рис. 5.** Графіки залежності кутового коефіцієнта (а) та теплового потоку (б) від висоти полум'я і відстані між модулем і факелом:

1 – при висоті полум'я 10 м; 2 – при – 8 м; 3 – при – 5 м; 4 – при – 3 м

Аналіз проведених досліджень показує, що величина теплового потоку, який падає на поверхню пожежного модуля, значною мірою залежить від температури полум'я та чорноти факела і поверхні захисного кожуха модуля. При збільшенні віддалі між ним і факелом, а також зменшенні висоти факела величина теплового потоку різко зменшується.

Знаючи величину теплових потоків, які падають на модуль, можемо визначити і дослідити процес його нагріву в часі.

Розглянемо випадок коли площини факела пожежі і поверхні захисного кожуха модуля розташовані під прямим кутом рис. 6.



**Рис. 6.** Схема взаємного розміщення модуля "1" і факела "2"

Якщо висота факела  $n$ , довжина і ширина пересувного модуля  $b \times c$ , а віддаль між ними  $a$ , то кутівий коефіцієнт випромінювання [4]:

$$\phi_{12} = \left[ \frac{S_{13}}{S_1} (\phi_{1324} - \phi_{134}) + \frac{S_3}{S_1} (\phi_{34} - \phi_{324}) \right] \quad (3)$$

де,  $S_{13} = c \cdot (a + b)$  – площа на яку падає тепловий потік,  $m^2$ ;  $S_1$  – площа захисного покриття пересувного модуля,  $m^2$ ;  $S_3$  – площа перед пересувним модулем, на яку падає тепловий потік від полум'я,  $m^2$ .

$$\phi_{1324} = \frac{1}{\pi \cdot \left(\frac{m+n}{c}\right)} \left[ \begin{aligned} & \left( \frac{m+n}{c} \right) \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{\left(\frac{m+n}{c}\right)} \right] + \frac{b+d}{c} \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{\left(\frac{b+d}{c}\right)} \right] - \\ & - \sqrt{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2} \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2}} \right] + \\ & + \frac{1}{4} \ln \left[ \frac{\left[ 1 + \left(\frac{m+n}{c}\right)^2 \right] \cdot \left[ 1 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2 \right]}{1 + \sqrt{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2}} \cdot \frac{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 \cdot \left[ 1 + \sqrt{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2} \right]^2}{\left[ \sqrt{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2} \right]^2 \cdot \left[ 1 + \left(\frac{m+n}{c}\right)^2 \right]} \right]^{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2} + \\ & + \frac{1}{4} \ln \left[ \frac{\left(\frac{b+d}{c}\right)^2 \cdot \left[ 1 + \sqrt{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2} \right]^2}{\left[ \sqrt{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2} \right]^2 \cdot \left[ 1 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2 \right]} \right]^{\left(\frac{b+d}{c}\right)^2} \end{aligned} \right]$$

$$\phi_{324} = \frac{1}{\pi \cdot \left(\frac{m+n}{c}\right)} \cdot \left(\frac{m+n}{c}\right) \cdot \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{\left(\frac{m+n}{c}\right)} \right] + \frac{d}{c} \cdot \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{\left(\frac{d}{c}\right)} \right] - \sqrt{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 + \left(\frac{d}{c}\right)^2} \cdot \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 + \left(\frac{d}{c}\right)^2}} \right] + \\ + \frac{1}{4} \ln \left[ \frac{\left[ 1 + \left(\frac{m+n}{c}\right)^2 \right] \cdot \left[ 1 + \left(\frac{d}{c}\right)^2 \right]}{1 + \sqrt{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 + \left(\frac{d}{c}\right)^2}} \cdot \frac{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 \cdot \left[ 1 + \sqrt{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 + \left(\frac{d}{c}\right)^2} \right]^2}{\left[ \sqrt{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 + \left(\frac{d}{c}\right)^2} \right]^2 \cdot \left[ 1 + \left(\frac{m+n}{c}\right)^2 \right]} \right]^{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2} \times \\ \times \left[ \frac{\left(\frac{d}{c}\right)^2 \cdot \left[ 1 + \sqrt{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 + \left(\frac{d}{c}\right)^2} \right]^2}{\left[ \sqrt{\left(\frac{m+n}{c}\right)^2 + \left(\frac{d}{c}\right)^2} \right]^2 \cdot \left[ 1 + \left(\frac{d}{c}\right)^2 \right]} \right]^{\left(\frac{d}{c}\right)^2}$$

$$\phi_{134} = \frac{1}{\pi \cdot \left(\frac{m}{c}\right)} \cdot \left(\frac{m}{c}\right) \cdot \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{\left(\frac{m}{c}\right)} \right] + \frac{b+d}{c} \cdot \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{\left(\frac{b+d}{c}\right)} \right] - \sqrt{\left(\frac{m}{c}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2} \cdot \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m}{c}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2}} \right] +$$

$$+ \frac{1}{4} \ln \left[ \frac{\left[ 1 + \left(\frac{m}{c}\right)^2 \right] \cdot \left[ 1 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2 \right] \cdot \left[ \left(\frac{m}{c}\right)^2 \cdot \left[ 1 + \sqrt{\left(\frac{m}{c}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2} \right]^2 \right]^{\left(\frac{m}{c}\right)^2}}{1 + \left[ \sqrt{\left(\frac{m}{c}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2} \right]^2 \cdot \left[ \sqrt{\left(\frac{m}{c}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2} \right]^2 \cdot \left[ 1 + \left(\frac{m}{c}\right)^2 \right]} \right] \times$$

$$\times \frac{\left[ \left(\frac{b+d}{c}\right)^2 \cdot \left[ 1 + \sqrt{\left(\frac{m}{c}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2} \right]^2 \right]^{\left(\frac{b+d}{c}\right)^2}}{\left[ \sqrt{\left(\frac{m}{c}\right)^2 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2} \right]^2 \cdot \left[ 1 + \left(\frac{b+d}{c}\right)^2 \right]}$$

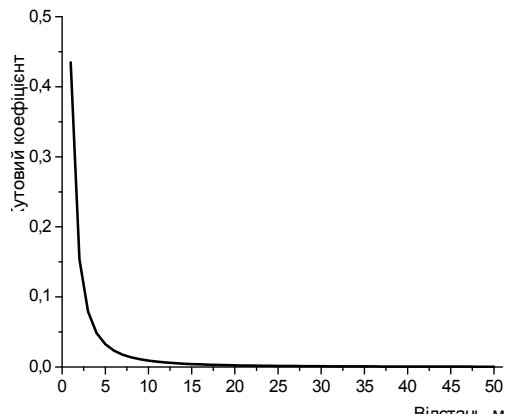
$$\phi_{34} = \frac{1}{\pi \cdot \left(\frac{m}{c}\right)} \cdot \left(\frac{m}{c}\right) \cdot \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{\left(\frac{m}{c}\right)} \right] + \frac{d}{c} \cdot \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{\left(\frac{d}{c}\right)} \right] - \sqrt{\left(\frac{m}{c}\right)^2 + \left(\frac{d}{c}\right)^2} \cdot \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m}{c}\right)^2 + \left(\frac{d}{c}\right)^2}} \right] +$$

$$+ \frac{1}{4} \ln \left[ \frac{\left[ 1 + \left(\frac{m}{c}\right)^2 \right] \cdot \left[ 1 + \left(\frac{d}{c}\right)^2 \right] \cdot \left[ \left(\frac{m}{c}\right)^2 \cdot \left[ 1 + \sqrt{\left(\frac{m}{c}\right)^2 + \left(\frac{d}{c}\right)^2} \right]^2 \right]^{\left(\frac{m}{c}\right)^2}}{1 + \left[ \sqrt{\left(\frac{m}{c}\right)^2 + \left(\frac{d}{c}\right)^2} \right]^2 \cdot \left[ \sqrt{\left(\frac{m}{c}\right)^2 + \left(\frac{d}{c}\right)^2} \right]^2 \cdot \left[ 1 + \left(\frac{m}{c}\right)^2 \right]} \right] \times$$

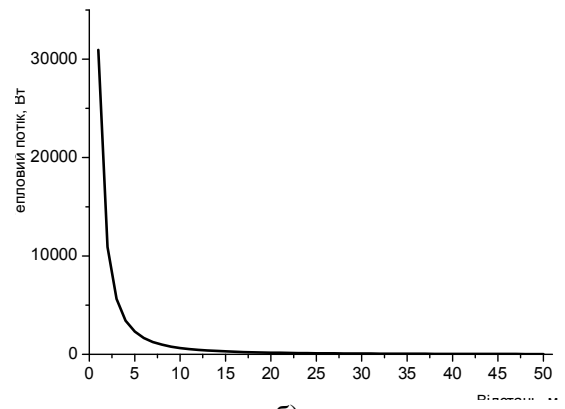
$$\times \frac{\left[ \left(\frac{d}{c}\right)^2 \cdot \left[ 1 + \sqrt{\left(\frac{m}{c}\right)^2 + \left(\frac{d}{c}\right)^2} \right]^2 \right]^{\left(\frac{d}{c}\right)^2}}{\left[ \sqrt{\left(\frac{m}{c}\right)^2 + \left(\frac{d}{c}\right)^2} \right]^2 \cdot \left[ 1 + \left(\frac{d}{c}\right)^2 \right]}$$

За формулою (1) з врахуванням виразу (3) проведені розрахунки величини теплового потоку, що падає на поверхню модуля в залежності від віддалі  $a$  та величини температури  $T_1$  і  $T_2$ . Розрахунки проведені для таких параметрів:

1)  $n = 0,5 \dots 10$  м,  $b = 1,5$  м,  $d = 0,1 \dots 50$  м,  $T_1 = 300$  К,  $T_2 = 1473$  К,  $\varepsilon_1 = 0,27$ ,  $\varepsilon_2 = 0,96$  (горіння бензину у резервуарах). Результати зображені графічно на рисунку 7.



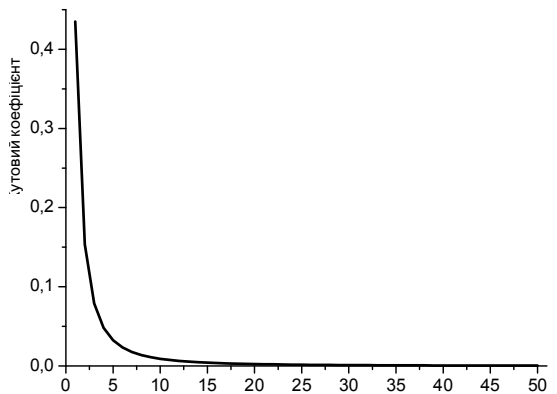
а)



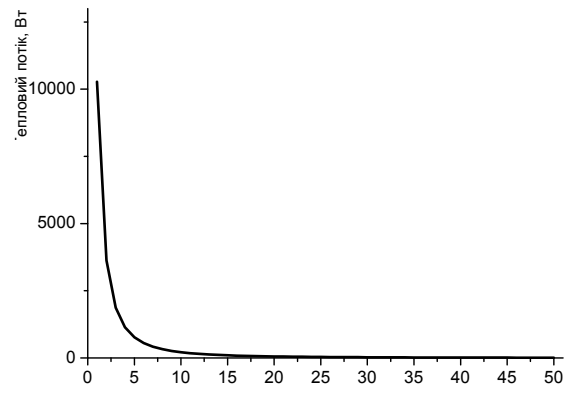
б)

**Рис. 7.** Графіки залежності кутового коефіцієнта (а) та теплового потоку (б) від відстані між модулем і факелом при висоті полум'я 10 м

2)  $n = 0,5 \dots 10$  м,  $b = 1,5$  м,  $d = 0,1 \dots 50$  м,  $T_1 = 300$  К,  $T_2 = 1147$  К,  $\varepsilon_1 = 0,27$ ,  $\varepsilon_2 = 0,7$  (горіння деревини). Результати зображені графічно на рисунку 8.



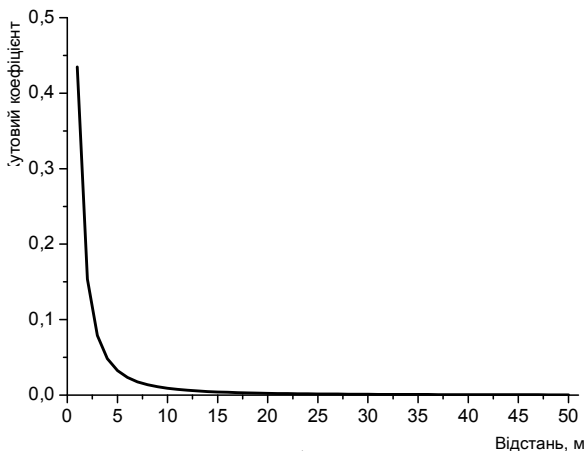
а)



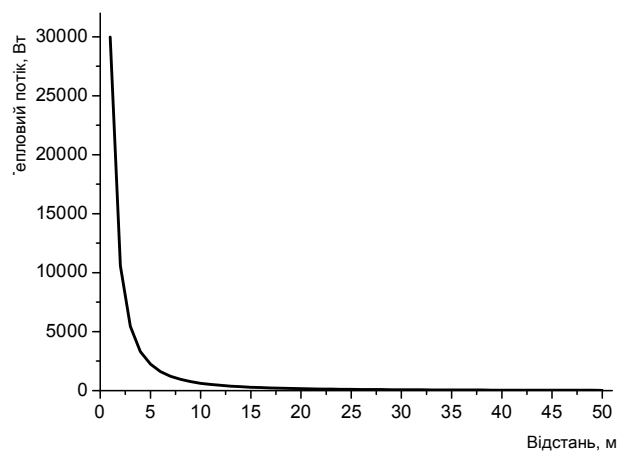
б)

**Рис. 8.** Графіки залежності кутового коефіцієнта (а) та теплового потоку (б) від відстані між модулем і факелом при висоті полум'я 10 м

3)  $n = 0,5 \dots 10$  м,  $b = 1,5$  м,  $d = 0,1 \dots 50$  м,  $T_1 = 300$  К,  $T_2 = 1473$  К,  $\varepsilon_1 = 0,27$ ,  $\varepsilon_2 = 0,86$  (горіння гумових виробів). Результати зображені графічно на рисунку 9.



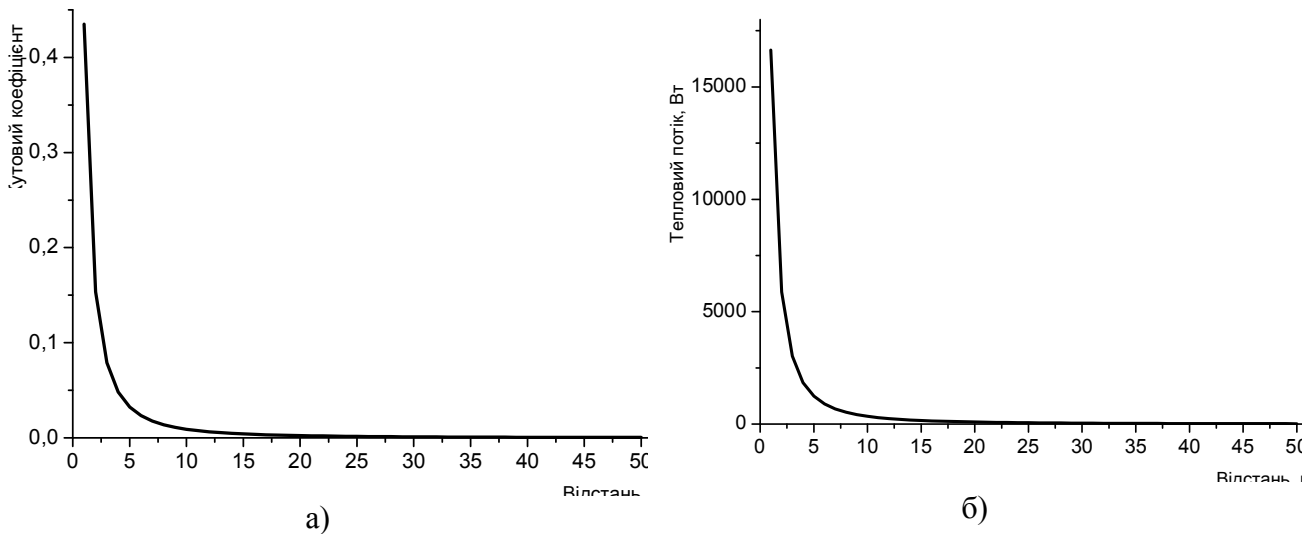
а)



б)

**Рис. 9.** Графіки залежності кутового коефіцієнта (а) та теплового потоку (б) від відстані між модулем і факелом при висоті полум'я 10 м

4)  $n = 0,5 \dots 10 \text{ м}$ ,  $b = 1,5 \text{ м}$ ,  $d = 0,1 \dots 50 \text{ м}$ ,  $T_1 = 300 \text{ К}$ ,  $T_2 = 1273 \text{ К}$ ,  $\varepsilon_1 = 0,27$ ,  $\varepsilon_2 = 0,85$  (горіння мазуту у резервуарах). Результати зображені графічно на рисунку 10.



**Рис. 10.** Графіки залежності кутового коефіцієнта (а) та теплового потоку (б) від відстані між модулем і факелом при висоті полум'я 10 м

Аналіз проведених досліджень показує, що величина теплового потоку, який падає на поверхню пожежного модуля, значною мірою залежить від температури полум'я та чорноти поверхонь захисного покриття і факела. При збільшенні віддалі між ним і факелом, а також зменшенні висоти факела величина теплового потоку різко зменшується. При цьому слід зауважити що в основному нагрівається передня частина захисного покриття модуля, що чітко видно з отриманих графіків рис. 2-5.

#### Література:

1. Романенко П.Н. Теплопередача в пожарном деле. /Романенко П.Н., Бубырь Н.Ф., Башкирцев М.П./ М.: ВШ МВД СССР, 1969. – 425с.
2. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 512с.
3. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением Госэнегоиздат, 1962. – 487с.

*М.М. Семерак, А.М. Доминик, К.И. Мигаленко, Д.В. Руденко*

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ФАКЕЛА ПОЖАРА

Предложена методика определения тепловых потоков, идущих от пожара до пожарной техники в зависимости от температуры пламени, его размеров, расстояния до очага пожара. На основе законов теплообмена излучением исследована зависимость величины теплового потока пламени от его температуры, размеров, расстояния до ближайших предметов, расположение в пространстве. Результаты исследований изображены графически.



**MATHEMATICAL MODELING AND RESEARCH OF QUANTITIES OF JET FIRE  
HEAT FLOW**

The method of determining heat flow coming from fire to fire equipment, depending on the temperature of the flame, its size, distance to the centre of the fire is suggested. On the basis of laws of heat radiation the dependence of the heat flux flame on its temperature, size, distance to nearby objects, position in space is investigated. The results are depicted graphically.

**Keywords:** fire, radiation, heat flow, temperature.

