

## УДК 614.8

*С. В. Говаленков, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-5610-814X)*

*О. М. Семків, д.т.н., професор, проректор (ORCID 0000-0002-9347-0997)*

*К. М. Карпець, к.геогр.н., доцент, провідн.н.с. (ORCID 0000-0001-6388-7647)*

*Ю. С. Безугла, к.т.н., викл. каф. (ORCID 0000-0003-4022-2807)*

*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ІЗОЛЮЮЧОЇ ПОВЕРХНІ ПОЛУМ'Я ПРИ ГОРІННІ НАФТОПРОДУКТІВ В РЕЗЕРВУАРІ

Існуючи моделі процесів виникнення і розвитку пожеж резервуарів з нафтою та нафтопродуктами не враховують залежність величини виникаючого при пожежі теплового потоку від параметрів резервуара, форми факела полум'я, вітру, а отже й кута нахилу факела, температури. В роботі досліджено математичні моделі геометричних форм факелів горіння резервуарів з нафтою та нафтопродуктами та їх вплив на величину теплового потоку. Досліджена залежність теплового потоку від форми і висоти факелу полум'я, кута його нахилу, діаметрів резервуарів і відстані між ними. Показано, що при формі факела у вигляді конуса (усіченого конуса), поблизу стінок резервуара є «мертва» зона близько 2 м. Залежність випромінювання від відстані для конуса і усіченого конуса незначно відрізняються один від одного. Модель факелу у вигляді прямокутника призводить до максимального випромінювання, яке знаходиться приблизно на 5 метрів ближче до резервуару, ніж дають моделі конуса і усіченого конуса. Модель точкового джерела призводить до великих похибок на великих відстанях, та до ще більших похибок на малих відстанях. Тому використанню такої моделі доцільно уникати. Для визначення впливу форми і розміру факелу горіння на величини вражаючих факторів при пожежі резервуарів доцільно досліджувати нахилені фігури, які б моделювали форму факелу при наявності вітру. Отримані результати показують, що значення локального кутового коефіцієнта випромінювання, а значить і величини теплового потоку, істотно залежать від форми факела саме на відстанях найважливіших, з точки зору безпечного розміщення сил і засобів при організації гасіння пожеж нафти і нафтопродуктів в резервуарних парках. Залежності, отримані для коефіцієнта випромінювання, можна умовно розбити на три групи, в кожній з яких значення близькі між собою. До першої групи належать криві для факелів в формі конуса, конусу що звужується вгору і еліпсоїда ( $b > L$ ), значення для яких в максимумі 0,02. До другої групи належать криві для циліндра і еліпсоїда ( $b > L$ ), максимальне значення 0,03. Відносно близькі між собою криві для моделей прямокутника і конуса, що розширюється вгору, причому остання модель дає найбільше значення 0,04 в максимумі.

**Ключові слова:** резервуар, пожежа, а факел, конус, циліндр, еліпс, теплове випромінювання

### 1. Вступ

У всіх країнах світу, в тому числі Україні, проводяться інтенсивні дослідження по розробці та здійсненню широкого комплексу мір з метою попередження і гасіння пожеж в резервуарах, тому що проблема їх протипожежного захисту далека від вирішення, свідомством чого є великі пожежі та вибухи, які щорічно виникають у світі.

Одним з основних методів дослідження процесів горіння резервуарів є методи ґрунтовані на аналітичних та ймовірнісних підходах і спрямовані на з'ясування процесів, що виникають при пожежі в окремому резервуарі. Як правило, застосовуються моделі, де розглядається горіння рідини на вільній поверхні в умовах штилю. Ці моделі не враховують залежність величини виникаючого при пожежі теплового потоку від параметрів резервуара, форми факелу полум'я, вітру, а отже й кута нахилу факела. Тому залишаються не вивченими питання про вплив теплового потоку від палаючого резервуара на нагрівання сусідніх резервуарів, про вплив геометричних параметрів форми факелу полум'я, вітру (кута нахилу факелу) на величину теплового потоку.

Тепловий потік залежить від форми факелу; існують різні моделі (конус, циліндр, еліпсоїд, прямокутник, точкове джерело), вони дають різні результати. Тому однією з проблем є вибір геометричної форми для апроксимації випромінюючої поверхні полум'я.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Резервуарні парки для зберігання нафти та нафтопродуктів є складними інженерно-технічними спорудами і складаються з резервуарів, як правило, об'єднаних по групах, систем трубопроводів та інших споруд [1, 2]. До складу резервуарних парків входить комплекс технологічних будівель, споруд і установок, призначених для приймання, зберігання і видачі нафти і нафтопродуктів, а також підсобно-виробничі, побутові будівлі і споруди, що забезпечують їх нормальну експлуатацію.

На цей час існує чимало моделей факелу палаючих резервуарів з нафтопродуктами. Але всі вони дають різні результати. Розглянемо деякі з них, що безпосередньо стосуються нашої задачі.

В [3] пропонується розглядати факел як конус. Нахил конуса пов'язаний з вітром. За умови відсутності вітру довжина факела  $L$  обчислюється за формулою [4]:

$$L = 1,2D, \quad (1)$$

де  $D$  – діаметр резервуара.

В [5] пропонується інша формула:

$$L = 42D \left( \frac{V_m}{\rho_{\text{п}} \sqrt{gD}} \right)^{0,3}, \quad (2)$$

де  $V_m$  – масова швидкість вигорання рідини,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$ ;  $\rho_{\text{п}}$  – густина повітря,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$  – прискорення вільного падіння.

При наявності вітру довжина факела обчислюється за тією ж самою формулою, а його висота –  $H = L \cos \alpha$ , де кут нахилу  $\alpha$  залежить від швидкості вітру.

В роботі [6] кут нахилу факелу  $\alpha$  від вертикальної осі розраховується за формулою:

$$\cos \alpha = 0,75V^{-0,49}, \quad (3)$$

де  $V = V_{\text{в}} \left( \frac{V_m g D}{\rho_{\text{п}}} \right)^{\frac{1}{3}}$ ;  $V_{\text{в}}$  – швидкість вітру,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $D$  – діаметр основи факелу,  $\text{м}$ ;

$\rho_{\text{п}} = \frac{\mu p}{RT}$  – щільність пару,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $p = 10^5 \text{ Па}$  – атмосферний тиск;  $T$  – температура факела,  $\text{К}$ ;  $\mu$  – молярна маса пару,  $\text{кг}/\text{моль}$ .

В [7] наведено інший підхід до обчислення кута  $\alpha$ :

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{V'}}, \quad (4)$$

де  $V' = \frac{V_{\text{в}}}{u^*} \left( \frac{\pi \rho_{\text{г}} \Delta H_{\text{с}}}{2 \rho_{\text{п}} c_{\text{p}} T_0} \right)^{\frac{1}{3}}$ ,  $u^* = 1,9 \sqrt{\dot{Q}_{\text{с}}}$ ,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\dot{Q}_{\text{с}} = V_m \Delta H_{\text{с}} S$  – енергія факела, що виділяється в одиницю часу,  $\text{Вт}$ ;  $\Delta H_{\text{с}} = 41900 \text{ кДж}/\text{кг}$  – константа;  $\rho_{\text{п}} = 0,2$  – щільність газу,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{в}} = 1,2$  – щільність повітря,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $T_0$  – температура повітря;  $c_{\text{п}}$  – теплоємність повітря.

В роботі [8] описано експеримент по визначенню геометричних параметрів факелу полум'я. Організація експерименту здійснювалась наступним чином. Модель резервуара – металевий сталевий циліндр діаметром 6 метрів, висотою 1,6 метри був заповнений сировою нафтою загальним об'ємом  $10 \text{ м}^3$ . Резервуар на металевих конструкціях піднятий на висоту 8,4 метри. Умови навколишнього середовища були наступні: атмосферний тиск 746 мм. рт. ст., температура повітря  $15 \text{ C}^0$ , вітер північно-західний, швидкістю 1-4 м/с.

Висота факелу вимірювалась за допомогою теодоліту, який знаходився на відстані 60 метрів від резервуару. За даними вимірювань висота факелу становила 6,5-10,0 метрів, що відповідає співвідношенню 1,1-1,67D.

По-перше, оцінимо очікувані довжину і кут нахилу факела за формулами (1)-(4). Формула (1) дає довжину факела 7,2 м. Формула (2) дає, очевидно, дуже завищену довжину 40,0 м. Можливо вона є більш придатною для обчислення довжини факелу від розливу нафтопродуктів на великій площі. Обчислення кута нахилу дає  $25^\circ$  (3) або  $67^\circ$  (4) для швидкості вітру 4 м/с.

З рис. 1 видно, що форму факелу дійсно можливо апроксимувати похилим конусом, як це й пропонується в [3, 9].

Нахил конуса пов'язаний з вітром. За умови відсутності вітру довжина факела  $L$  обчислюється за формулою (1). При наявності вітру довжина факела обчислюється за тією ж самою формулою, а висота  $H$  похилого конуса:

$$H = L \cos \alpha, \quad (5)$$

де кут нахилу  $\alpha$  залежить від швидкості вітру (рис. 1).



Рис. 1. Параметри факелу:  $ABC$  – конус факела;  $BN$  – довжина факела;  $BM$  – висота факела;  $\angle MBN = \alpha$  – кут нахилу конуса відносно вертикальної вісі

Якщо відомі координати точок  $A(x_1, y_1)$ ,  $C(x_2, y_2)$ ,  $B(x_3, y_3)$ , (виміряні по фотознімку), то можна обчислити висоту факела, довжину та його нахил. Знайдемо координати точки  $M$  (рис. 1):

$$x_M = \frac{(y_2 - y_1)^2 x_1 + (x_2 - x_1)^2 x_3 - (y_2 - y_1)(x_2 - x_1)(y_1 - y_3)}{(y_1 - y_2)^2 + (x_1 - x_2)^2},$$

$$y_M = \frac{(x_2 - x_1)^2 y_1 + (y_2 - y_1)^2 y_3 - (x_2 - x_1)(y_2 - y_1)(x_1 - x_3)}{(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2}.$$

Координати точки N (рис. 1):  $x_N = \frac{x_1 + x_2}{2}$ ,  $y_N = \frac{y_1 + y_2}{2}$ .

Тоді довжина факела L, його висота H і кут нахилу  $\alpha$  визначаються наступними виразами

$$L = \sqrt{(X_N - X_3)^2 + (Y_N - Y_3)^2}; \quad H = \sqrt{(X_M - X_3)^2 + (Y_M - Y_3)^2} \quad \cos \alpha = \frac{H}{L}; \quad (6)$$

При дослідженні пожежі координати точок А, С і N були фіксованими, AN = NC, та визначеними заздалегідь, а координати точки В визначались за допомогою теодоліту в рівні моменти часу. Враховуючи, що AC = D = 6 м., і застосовуючи (6) обчислимо значення L, H,  $\alpha$ . Результати розрахунків зведемо в табл. 1.

**Табл. 1. Параметри факелу в різні моменти часу**

№ з/п	L, (м)	H, (м)	$\alpha$ , градуси
1	2	3	4
1	8,32	6,56	37,9
2	8,91	5,82	49,2
3	7,02	4,36	51,6
4	8,23	5,95	43,7
5	8,86	7,39	33,5
6	7,52	5,08	47,5
7	7,47	5,11	46,9
8	7,57	6,32	33,3
9	6,12	4,76	39,0
10	6,81	5,03	42,4
11	7,16	5,16	43,9
12	4,49	0,11	88,6
13	7,10	6,50	23,8
14	7,91	7,25	23,6
15	9,00	8,42	20,7
16	6,98	6,14	28,3
17	6,79	5,77	31,8
18	6,80	5,70	33,1
19	7,63	6,44	32,4
20	7,96	6,81	31,1
21	7,54	5,90	38,6
22	8,19	7,01	31,1
23	7,35	7,04	16,7
24	8,77	7,98	24,5
25	7,51	6,75	26,0
26	8,01	7,16	26,6
27	7,90	6,80	30,6
28	8,16	7,39	25,1
29	7,88	5,65	44,2
30	7,55	5,28	45,7
31	8,41	5,75	46,9
Середнє	7,61	6,05	36,7
Середньо-кватратичне відхилення	0,89	1,44	13,2

### 3. Мета та завдання дослідження

Мета роботи – ідентифікація геометричної форми і розмірів факелу полум'я при горінні нафтопродуктів у вертикальному сталевому резервуарі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- експериментально визначити геометричні параметри факела при горінні нафтопродукту в моделі резервуара;
- обрати геометричну фігуру, апроксимуючу ізольовану поверхню полум'я;
- оцінити вплив геометричної форми факела на тепловий потік.

### 4. Дослідженні математичних моделей геометричних параметрів факелу полум'я в палаючому резервуарі

При дослідженні математичних моделей геометричних параметрів факелу полум'я в палаючому резервуарі можна виділити наступні небезпеки впливу теплового потоку:

- нагрівання верхньої частини стінки резервуара з подальшим її руйнуванням під вагою даху резервуара;
- нагрівання верхньої частини стінки і вибух газоповітряної суміші нафтопродукту;
- скипання нафтопродукту поблизу стінок;
- скипання води, що знаходиться в нафтопродукті.

В даній роботі розглянемо геометричні форми факелу як конуса або усіченого конуса, еліпсоїда та циліндра.

Враховуючи отримані експериментальні дані визначимо закон розподілу випадкової величини довжини факела  $L$ . Для цього розглянемо гістограму згрупованого статистичного ряду для значень  $L$  (рис. 2).

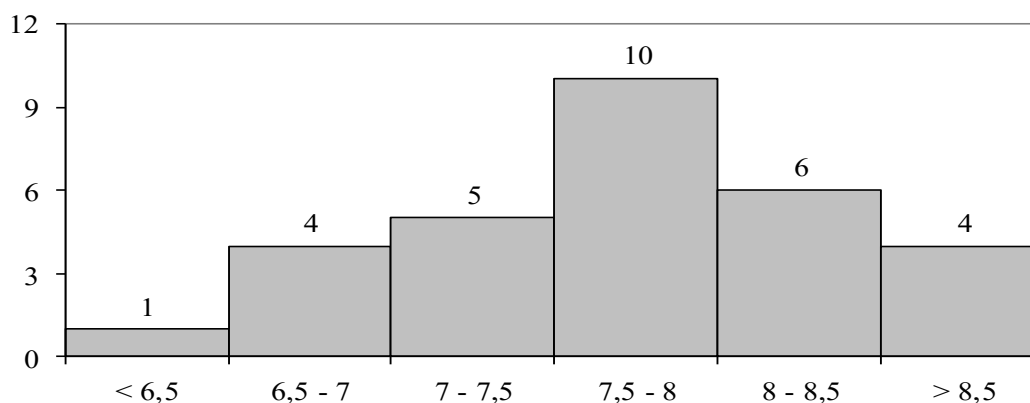


Рис. 2. Гістограма розподілу довжини факела

На основі гістограми висунемо гіпотезу про нормальний розподіл довжини факела  $L$  і перевіримо її за допомогою  $\chi^2$ -критерію. Для підрахунку  $\chi^2$  спостереженого, складемо табл. 2, в якій наведено значення емпіричних  $n_k$  і теоретичних  $p_k$  частот ( $n = 31$ ).

Підрахуємо величину  $\chi^2 = \sum_{k=1}^6 \frac{(n_k - np_k)^2}{np_k} = 2,61$ . Критичне значення для довір-

чої ймовірності  $p=0,95$  і 3-х ступенів свободи складає  $\chi_{кр}^2 = 7,8$  [8]. Оскільки  $\chi^2 < \chi_{кр}^2$ , то можна зробити висновок про те, що експериментальні дані не суперечать гіпотезі про нормальний закон розподілу довжини факела.

Табл. 2. Перевірка гіпотези про нормальний розподіл довжини факелу

Номер інтервалу, $k$	Довжина факелу, $L$ (м)	Ймовірність влучання, $p_k$	Очікувана кількість влучань, $np_k$	Фактична кількість влучань, $n_k$
1	$< 6,5$	0,11	3,4	2
2	$6,5 - 7$	0,14	4,3	4
3	$7 - 7,5$	0,2	6,2	5
4	$7,5 - 8$	0,22	6,8	10
5	$8 - 8,5$	0,17	5,3	6
6	$> 8,5$	0,16	5	4

Враховуючи нормальний закон розподілу величини  $L$  з надійністю  $p = 0,95$  знаходимо довірчий інтервал для математичного очікування довжини факелу, а саме:  $7,28 \leq \bar{L} \leq 9,94$ . При цьому за правилом «трьох сигм» майже вірогідним буде наступний інтервал для довжини факела:  $4,94 \leq \bar{L} \leq 10,28$ . Частка довжини факела  $\bar{L}$  і

діаметра резервуара складає  $\frac{\bar{L}}{D} = 1,27$ , що збігається зі значенням вказаним в (1).

Таким чином, в подальших розрахунках можна виходити з того, що факел має форму конусу з довжиною  $L$ , яка нормальна розподілена з математичним сподіванням  $\bar{L} = 1,2D$  і середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_L = 0,15D$ , де  $D$  – діаметр резервуара.

Це означає, що довжина факелу для сирої нафти з ймовірністю  $p = 0,95$  має інтервал:

$$0,97D \leq L \leq 1,43D.$$

Під час проведення експерименту швидкість вітру була в межах 1-4 м/с, середній кут нахилу факелу склав  $36,7^\circ$ . Це означає, що при розрахунках пожежної небезпеки резервуарів необхідно враховувати можливий нахил факелу до сусідніх резервуарів.

Основним способом передачі тепла під час пожежі резервуару є теплове випромінювання. У випадку пожежі в резервуарних парках висока температура і великі розміри факела можуть стати причиною загоряння сусідніх об'єктів, а також ускладнювати дії аварійно-рятувальних підрозділів.

Потік тепла через елементарну площадку  $dF$  від факела визначається законом Стефана-Больцмана [7]:

$$q = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \psi,$$

де  $T_1$  – середня температура поверхні факела;  $T_2$  – температура, поверненої до факела поверхні тіла;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – наведена чорнота системи;  $c_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$ ;  $\psi$  – локальний кутовий коефіцієнт випромінювання.

Головною проблемою є визначення коефіцієнту випромінювання  $\psi$ . Цей ко-

ефіцієнт в першу чергу залежить від форми факела. Але в літературі розглянуті лише деякі найпростіші форми.

Найбільш поширеним є представлення факела як прямокутник з основою рівною діаметру резервуара і площу рівну площі поперечного перетину факела [4].

Інше можливе уявлення – модель точкового джерела, коли все випромінювання представляється з однієї точки, розташованої в центрі факела [7]. Недоліком цих моделей є ігнорування реальної форми факела, що унеможливило їх застосування в безпосередній близькості до резервуару.

Для розрахунку коефіцієнта випромінювання від факелів будемо представляти їх у формі конуса або усіченого конуса (рис. 3).

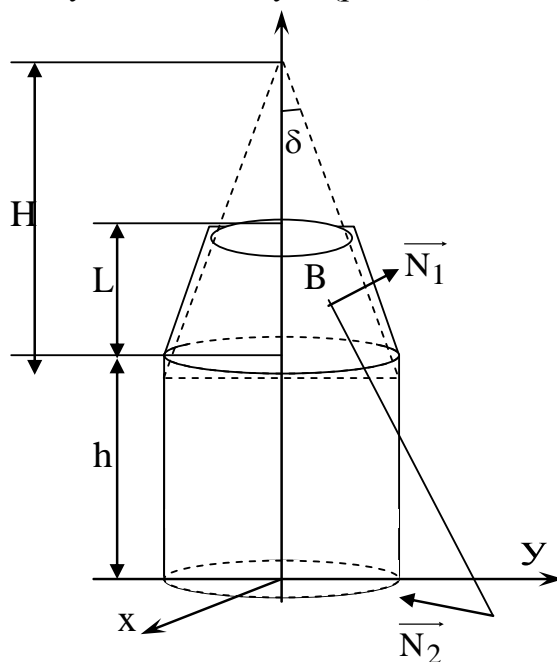


Рис. 3. Факел в формі усіченого конуса: висота резервуара  $h$ , радіус резервуара  $R$ , довжина полум'я  $L$ , висота конуса  $H$

Розглянемо циліндричну систему координат і обчислимо значення коефіцієнта випромінювання  $\psi$  для точки, що належить вертикальній площадці, зверненої в бік факелу. У загальному випадку знаходимо як інтеграл по поверхні факела, видимого з точки  $A$ :

$$\psi = \frac{1}{\pi} \iint_S \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} ds, \quad (7)$$

де  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  – кути між вектором  $\overrightarrow{BA}$  і нормальними векторами  $\overrightarrow{N}_1$  к поверхні факела і  $\overrightarrow{N}_2$  згідно;  $r$  – довжина вектора  $\overrightarrow{AB}$ .

Точка  $B$ , що належить поверхні конуса, має циліндричні координати:  $(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi, z)$ , де  $\rho = (H + h - z) \frac{R}{H}$ .

Одиничний нормальний вектор до поверхні конуса в точці  $B$ :

$$\overrightarrow{N}_1 = (\cos \varphi \sin \delta, \sin \varphi \sin \delta, \cos \delta),$$

де  $\delta$  – кут при вершина конуса (рис. 1),  $\operatorname{tg}\delta = \frac{R}{H}$ .

Одиничний нормальний вектор до вертикальної площадки в точці А :

$$\vec{N}_2 = (-\cos\chi, -\sin\chi, 0), \text{ де } \operatorname{tg}\chi = \frac{y_0}{x_0}, \text{ } r_0 = (x_0^2 + y_0^2)^{1/2}.$$

Тоді для (7) отримуємо вираз

$$\psi = \frac{1}{\pi} \int_h^{L+h} dz \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{(\vec{AB}, \vec{N}_2)(\vec{BA}, \vec{N}_1)}{(\vec{AB}, \vec{AB})^2} \rho d\varphi, \quad (8)$$

де кути  $\beta_1, \beta_2$  – виражені нижче.

Межі інтегрування по  $\varphi$ , тобто кут під яким видно конус на висоті  $z$  :

$$\beta_{1,2} = \chi \pm \arccos \frac{(H+h)\operatorname{tg}\delta}{r_0}.$$

Звідси маємо так звану «мертву» зони поблизу резервуара, де факел не буде видно:

$$r_0 < (H+h) \frac{R}{H} = R \left(1 + \frac{h}{H}\right).$$

Ця зона буде тим більше від поверхні резервуара, чим менше висота факела  $H$ . Очевидно, якщо конус буде не усічений, а повний, то і всі наведені викладки зберігаються.

Проведемо порівняння того, наскільки форма факелу впливає на коефіцієнт випромінювання  $\psi$ . Для цього розглянемо факели з однаковою площею вертикального перетину, проведеного через вісь симетрії резервуара, щоб перевірити наскільки справедливим виявляється наближене уявлення факела прямокутником.

Вихідні дані для розрахунків наведені в табл. 3.

**Табл. 3. Вихідні дані для порівняння факелів**

Форма Параметр	Точкове джерело	Прямокутник	Конус	Усічений конус
Довжина полум'я, м	–	10	20	14,29
Верхній радіус, м	–	–	–	2
Площа перетину, кв. м		100		
Висота резервуара, м		10		
Радіус резервуара, м		5		

Результати розрахунків наведені на рис. 4. Розглянемо факели, що мають циліндричну і еліпсоїдну форму.

Потік тепла  $q$  ( $\text{Вт} / \text{м}^2$ ), що проходить через елементарну площадку приймача випромінювання від поверхні факелу знаходиться з формули:



$$q = \eta \dot{Q}_c \psi,$$

де  $\dot{Q}_c$  – інтенсивність випромінювання одиниці поверхні факела;  $\eta$  – наведена чорнота системи;  $\psi$  – локальний кутовий коефіцієнт випромінювання.

Через складність форми реального факела використовують різного роду наближення. Найбільш поширений спосіб оцінки коефіцієнта випромінювання полягає в заміні об'ємної форми факела на прямокутник по площі рівний вертикальному перетину факела [4].

Ще більшим спрощенням є розрахунок щільності потоку випромінювання від точкового джерела [7]:  $\psi = \frac{P}{r^2}$ , де  $P$  – площа факела;  $r$  – відстань від центру факела до заданої точки.

Обидва ці підходи призводять до формул, які мають нескладний вид, але володіє очевидним недоліком – вони не враховують форму факела, що унеможливає їх застосування на малих відстанях.

Для побудови математичної моделі розрахунку коефіцієнта випромінювання від факелів в формі циліндра і еліпсоїда обертання представимо їх у вигляді, представленому на рис. 4.

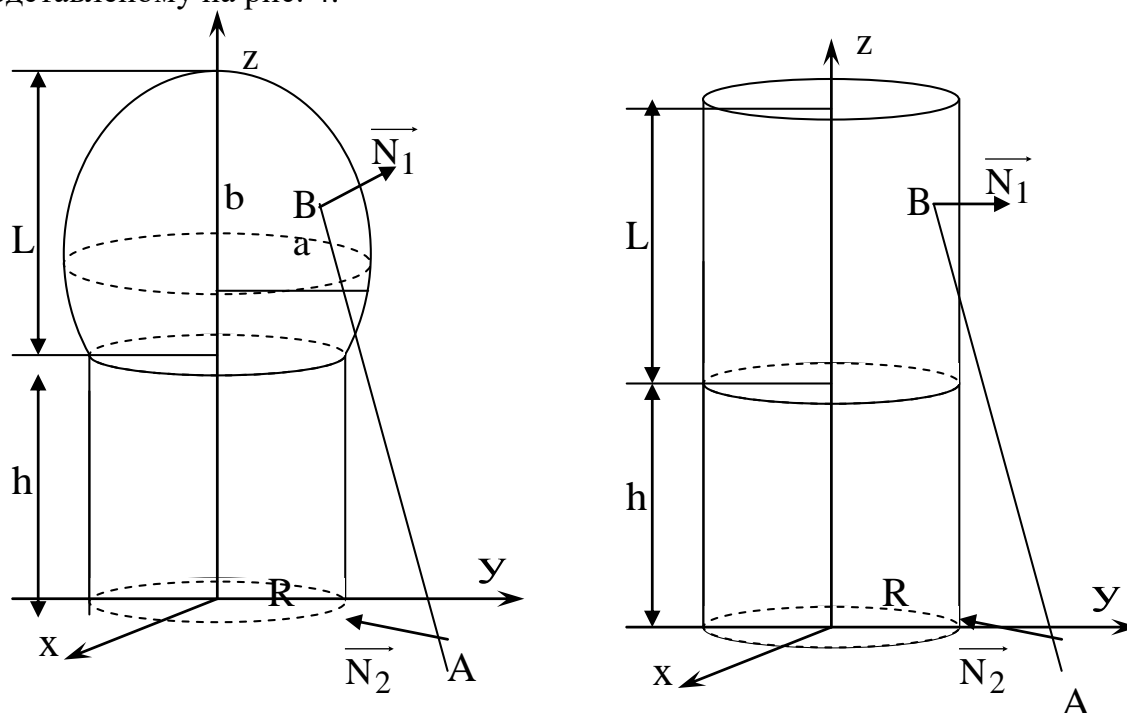


Рис. 4. Еліпсоїдна і циліндрична форми факела. Висота резервуара  $h$ , довжина полум'я  $L$ , радіус резервуара  $R$ , вертикальна піввісь еліпсоїда  $b$ , горизонтальна піввісь  $a$  (всі величини в метрах)

Обчислимо значення коефіцієнта випромінювання  $\psi$  для точки  $A(x_0, y_0, 0)$  (або в циліндричній системі координат  $A(r_0, \chi, 0)$ ), що належить вертикальній площадці, яка звернена в бік факела, де  $r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ ,  $\text{tg} \chi = \frac{y_0}{x_0}$ . У загальному випадку  $\psi$  знаходиться як інтеграл по поверхні  $S$  факела, видимої з точки  $A$ :

$$\psi = \frac{1}{\pi} \iint_S \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} ds, \quad (9)$$

де  $\varphi_1$  – кут між нормальним вектором  $\vec{N}_1$  до поверхні факела и вектором  $\vec{BA}$ ;  $\varphi_2$  – кут між нормальним вектором  $\vec{N}_2$  до поверхні випромінювання і вектором  $\vec{AB}$ ;  $r$  – довжина вектора  $\vec{AB}$ ; т. В (x, y, z) лежить на поверхні S.

Якщо для еліпсоїда задана довжина полум'я  $L$ , радіус резервуара  $R$  и горизонтальна піввісь  $a$ , то вертикальна піввісь  $b$  може бути найдена наступним чином.

Якщо центр еліпсоїда знаходиться на висоті в  $G = h + L - b$ , тоді його рівняння має вид:

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{(z - h - L + b)^2}{b^2} = 1.$$

При  $z = h$  маємо  $x^2 + y^2 = R^2$ . Тоді

$$\frac{R^2}{a^2} + \frac{(L - b)^2}{b^2} = 1.$$

Відносно  $b$ , знайдемо два рішення:

$$b_1 = L \frac{a^2 - a\sqrt{a^2 - R^2}}{R^2}, \quad a > R, \quad b_2 = L \frac{a^2 + a\sqrt{a^2 - R^2}}{R^2}, \quad a > R.$$

Перше рішення ( $b < L$ ) відповідає еліпсоїду на рис. 4, друге рішення ( $b > L$ ) відповідає еліпсоїду, центр якого знаходиться всередині резервуару або нижче його.

Маємо:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{(z - G)^2}{b^2} = 1, \quad \text{для еліпсоїда,}$$

$$\frac{x^2}{R^2} + \frac{y^2}{R^2} = 1, \quad \text{для циліндра.}$$

Для циліндричної системи координат  $\begin{cases} x = \rho \cos \varphi, \\ y = \rho \sin \varphi, \end{cases}$

будемо мати

$$\frac{\rho^2}{a^2} + \frac{(z - H)^2}{b^2} = 1, \quad \text{для еліпсоїда,}$$

$$\rho = R, \quad \text{для циліндра.}$$

Порівняння, значень коефіцієнта випромінювання  $\psi$  для різних моделей факелів представлено на рис. 5 а), б).

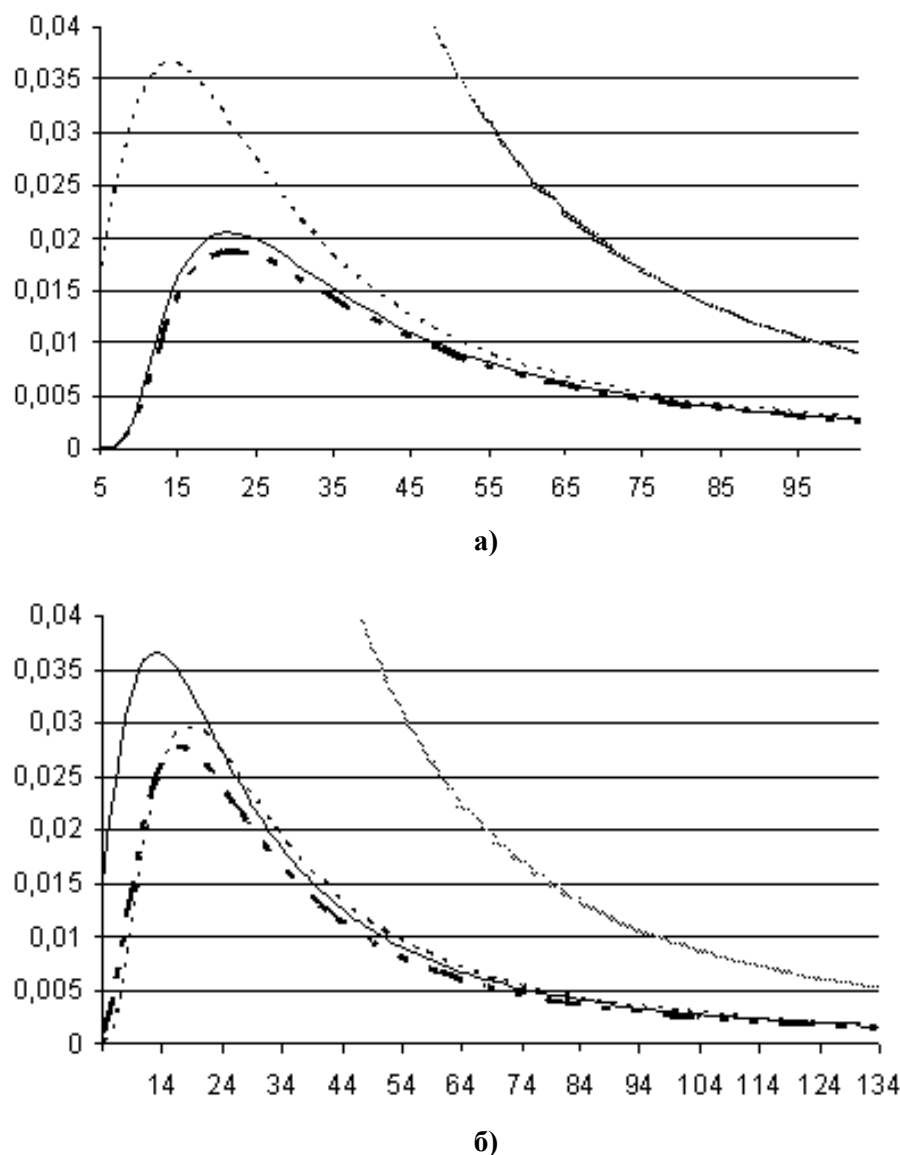


Рис. 5. Порівняння коефіцієнта випромінювання для факелів різної форми: а) 1 – конус; 2 – усічений конус; 3 – прямокутник; 4 – точкове джерело; б) циліндр; 2 – еліпсоїд; прямокутник; 4 – точкове джерело

### 5. Результати досліджень

З отриманих результатів можемо зробити наступні висновки. При формі факела в формі конуса (усіченого конуса), поблизу стінок резервуара є «мертва» зона близько 2 м. Залежність випромінювання від відстані для конуса і усіченого конуса незначно відрізняються один від одного. На відстанях до 30 метрів наближена заміна факелу прямокутником призводить до великих похибок. Однак на великих відстанях (більше 40 метрів) криві для прямокутника, конуса і усіченого конуса відрізняються незначно. Відзначимо також, що для обраної геометрії резервуара модель факелу у вигляді прямокутника призводить до максимального випромінювання, яке знаходиться приблизно на 5 метрів ближче до резервуару, ніж дають моделі конуса і усіченого конуса, для яких максимум випромінювання відповідає одному віддалі. Цей факт вказує на те, що останні дві моделі в цьому сенсі близькі одна до одної. Слід також зазначити, що модель точкового джерела призводить до великих похибок на великих відстанях, та до ще більших похибок на малих відстанях. Тому використанню такої моделі доцільно уникати.

Для визначення впливу форми і розміру факелу горіння на величини вражаючих факторів при пожежі резервуарів доцільно досліджувати нахилені фігури, які б моделювали форму факелу при наявності вітру.

Таким чином, на невеликих відстанях (до 30 метрів) коефіцієнт випромінювання істотно залежить від форми факела. Всі криві, виключаючи точкове джерело, мають яскраво виражений максимум на відстані 15–20 метрів від центру резервуару (на відстані 1–1,5 діаметра від стінок).

Нами були проведені чисельні розрахунки локального кутового коефіцієнта випромінювання для всіх розглянутих вище форм факела для пожежі в резервуарі, що має висоту  $h = 10\text{ м}$  і радіус  $R = 5\text{ м}$ . Щоб можна було зіставити результати розрахунків, було прийнято, що у всіх випадках площа вертикального поперечного перерізу факелу, що проходить через початок координат, становить  $P = 100\text{ м}^2$ . Тоді для циліндра і прямокутника довжина факела  $L = 10\text{ м}$ . Для еліпсоїда:  $a = 6,0\text{ м}$ ,  $b = 6,4\text{ м}$ ,  $L = 6,3\text{ м}$  ( $b < L$ ) и  $a = 6,0\text{ м}$ ,  $b = 31,8\text{ м}$ ,  $L = 14,2\text{ м}$  ( $b > L$ ). Для конуса:  $L = 20,0\text{ м}$ . Для усіченого конуса що звужується вгору:  $L = 14,3\text{ м}$ ,  $R_1 = 2\text{ м}$ , для усіченого конуса, що розширюється вгору:  $L = 8,5\text{ м}$ ,  $R_1 = 6,8\text{ м}$ . Останні значення обрані так, щоб кут  $\delta$  був по абсолютній величині однаковий для обох усічених конусів.

Розрахунки з використанням інших моделей факелу випромінювання призводять до значень  $\Psi$ , які мають яскраво виражений максимум на відстанях  $r$  від 13 метрів для прямокутника, та до 21 метра для конуса, а на відстанях більше 55 метрів всі моделі форми факелу (за винятком точкового джерела) призводять до приблизно однакових значень  $\Psi$ . При менших відстанях розбіжність між значеннями  $\Psi$  в різних моделях факелу стають значними (в максимумі майже в два рази).

## 6. Обговорення результатів

Залежності, отримані для коефіцієнта випромінювання  $\Psi$ , можна умовно розбити на три групи, в кожній з яких значення  $\Psi$  близькі між собою.

До першої групи належать криві для факелів в формі конуса, конуса що звужується вгору і еліпсоїда ( $b > L$ ), значення  $\Psi$  для яких в максимумі  $\approx 0,02$ . До другої групи належать криві для циліндра, і еліпсоїда ( $b > L$ ), максимальне значення  $\Psi \approx 0,03$ . До третьої групи належать криві для моделей прямокутника і конуса, що розширюється вгору, для яких відносно близькі між собою криві  $\Psi$ , причому остання модель дає найбільше значення  $\Psi \approx 0,04$  в максимумі.

Таким чином, отримані результати показують, що значення коефіцієнта  $\Psi$ , а значить і величини теплового потоку  $q$ , істотно залежать від форм факелу полум'я, причому саме на відстанях, що є найнебезпечнішими, з точки зору безпечного розміщення сил і засобів при організації гасіння пожеж нафти і нафтопродуктів в резервуарних парках. Спостереження пожеж в вертикальних резервуарах показують, що найбільш можливими моделями для опису форми факелів є або моделі конуса, або моделі еліпсоїда ( $b > L$ ).

Відзначимо, що значення  $\Psi$  для кожної даної форми факелу істотно залежить від довжини факела  $L$ . Вирішальний вплив на значення температур і часу нагріву сусідніх резервуарів має коефіцієнт взаємного випромінювання  $\Psi$ .

Значення  $\Psi$  в свою чергу залежать від форми і висоти факелу полум'я в палаючому резервуарі, кута його нахилу (тобто від напрямку і швидкості вітру), ді-

аметрів резервуарів і відстані між ними. Отже, цей коефіцієнт повністю враховує геометричні параметри факелу, резервуарів, а також їх взаємне розташування.

Для оперативних розрахунків критичних температур і часу для спрощення обчислення величини  $\psi$  в [10] запропонована модель у вигляді полінома другого порядку при вказаній фіксованій відстані між резервуарами для однотипних резервуарів. Коефіцієнт взаємного випромінювання  $\psi$  залежить від діаметру резервуарів, форми і довжини факелу і кута його нахилу.

Таким чином, при невеликих діаметрах ( $D < 20$  м) довжина факела менше впливає на коефіцієнт випромінювання  $\psi$ , ніж при великих діаметрах ( $D > 50$  м). Це означає, що випадкові фактори мають більший вплив на резервуарні групи з великими резервуарами.

## 7. Висновки

1. Спостереження пожеж в вертикальних резервуарах показують, що найбільш можливими моделями для опису форми факелів є або модель конуса, що розширюється вгору, або моделі еліпсоїда.

2. Отримані результати показують, що значення локального кутового коефіцієнта випромінювання, а значить і величини теплового потоку, істотно залежать від форми факела саме на відстанях найважливіших, з точки зору безпечного розміщення сил і засобів при організації гасіння пожеж нафти і нафтопродуктів в резервуарних парках.

3. Залежності, отримані для коефіцієнта випромінювання  $\psi$ , можна умовно розбити на три групи, в кожній з яких значення  $\psi$  близькі між собою. До першої групи належать криві для факелів у формі конуса, що звужується вгору і еліпсоїда ( $b > L$ ), значення  $\psi$  для яких в максимумі  $\approx 0,02$ . До другої групи належать криві для циліндра і еліпсоїда ( $b > L$ ), максимальне значення  $\psi \approx 0,03$ . Відносно близькі між собою криві  $\psi$  для моделей прямокутника і конуса, що розширюється вгору, причому остання модель дає найбільше значення  $\psi \approx 0,04$  в максимумі.

## Література

1. Бордовский А. М., Медник Б. М., Фомин В.И., Цвигун А. А. Предупреждение аварий на объектах магистрального транспорта нефти (зарубежный опыт): Аналитический обзор. К.: Основа, 2000. 220 с.
2. Бабенко Ю. В., Дудченко В. Г., Басаєв А. М., Савельєв І. В., Деревинський Д. М., Боровиков В. О., Антонов А. В. Протипожежний захист складів нафти і нафтопродуктів. Оглядова інформація. К.: УкрНДПБ, 2002. 142 с.
3. Андриенко В. Н., Говаленков С. В., Созник А. П. Математическая модель теплового излучения от факелов, имеющих форму конуса. Проблемы пожарной безопасности. Х.: Фолио, 2003. Вып. 14. С. 24–28.
4. Иванников В. П., Ключ П. П. Справочник руководителя тушения пожара. М.: Стройиздат, 1987. 288 с.
5. Barrett J. Tank farm blast was biggest single incident for Anstralian brigade. Fire, 1993. V. 86. № 1062. P. 18–24.
6. Волков О. М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. М.: Недра, 1984. – 152 с.
7. Драздейл Д. Введение в динамику пожаров. М.: Стройиздат, 1990. 424 с.

8. Говаленков С. В., Сознік О. П., Андрієнко В. М. Геометричне моделювання випромінювання полум'я при пожежі нафти в резервуарі. Праці ТДАТА. Вип. 4. Т. 27. Мелітополь. 2004. С.20–25.

9. Андриенко В. Н., Басманов А. Е., Говаленков С. В., Созник А. П. Геометрическая модель тепловых потоков при пожаре в резервуаре с учетом ветрового воздействия. Современные проблемы геометрического моделирования // Материалы Україно-росийської научно-практичної конференції. Харьков. 2005. С. 171–177.

10. Горбенко Н. А., Говаленков С. В., Безуглов О. Е. Оцінка факторів факела полум'я, що впливають на випромінювання при горінні резервуарів з нафтою та нафтопродуктами. Вісник Міжнародного Слов'янського університету. Серія «Технічні науки». № 2. Т. 7. Харків: Яна. 2004. С.50–55.

*S. Govalenkov, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*

*O. Semkiv, DSc, Professor, Vice Rector*

*K. Karpets, PhD, Associate Professor, Leading Researcher*

*Y. Bezuhla, PhD, Lecturer of the Department*

## IDENTIFICATION OF PARAMETER MODELS OF THE INSULATING FLAME FIELD IN THE BURNING OF PETROLEUM PRODUCTS IN THE TANK

Existing models of the processes of occurrence and development of fires of oil and petroleum reservoirs do not take into account the dependence of the heat flow occurring on the tank parameters, the shape of the flame, wind, and therefore the angle of torch, temperature. The mathematical models of geometrical forms of torches of combustion of oil and oil reservoirs and their influence on the value of heat flow are investigated. The dependence of the heat flux on the shape and height of the flame torch, the angle of inclination, the diameters of the tanks and the distance between them are investigated. It is shown that in the form of a torch in the form of a cone (truncated cone), near the walls of the tank there is a "dead" zone of about 2 m. The dependence of the radiation on the distance for the cone and the truncated cone are slightly different from each other. The rectangle torch model results in maximum radiation, which is approximately 5 meters closer to the tank than the cone and truncated cone models. The point source model leads to large errors over long distances and even larger errors over short distances. Therefore, it is advisable to avoid using such a model. To determine the effect of the shape and size of the combustion torch on the magnitude of the factors affecting the fire of the tanks, it is advisable to investigate inclined figures that would simulate the shape of the torch in the presence of wind. The results obtained show that the values of the local angular coefficient of radiation, and therefore the magnitude of the heat flux, significantly depend on the shape of the torch at the distances of the most important, from the point of view of the safe placement of forces and means in the organization of fire extinguishing oil and oil products in reservoir parks. The dependences obtained for the radiation factor can be divided into three groups, each of which values are close to each other. The first group includes curves for torches in the form of a cone, a tapering upward cone and an ellipsoid ( $b > L$ ), the values of which are at a maximum of 0,02. The second group contains curves for the cylinder and ellipsoid ( $b > L$ ), with a maximum value of 0,03. The curves for the rectangle and the expanding cone models are relatively close together, with the latter model giving a maximum value of 0.04 at maximum.

**Keywords:** tank, fire, and torch, cone, cylinder, ellipse, thermal radiation

### References

1. Bordovskij, A. M., Mednik, B. M., Fomin, V. I., Cvigun, A. A. Predupre-zhdenie avarij na obektah magistral'nogo transporta nefi (zarubezhnyj opyt): Analiticheskij obzor. K.: Osnova, 2000, 220.

2. Babenko, Y. V., Dudchenko, V. H., Basayev, A. M., Savyel'yev, I. V., Derevyns'kyu, D. M., Borovykov, V. O., Antonov, A. V. Protypozhezhnyy zakhyst skladiv nafty i naftoproduktiv. Ohlyadova informatsiya. K.: UkrNDIPB, 2002, 142.

3. Andriyenko, V. N., Govalenkov, S. V., Sozник, A. P. Matematicheskaya model' teplovogo izlucheniya ot fakelov, imeyushchikh formu konusa. Problemy pozharnoy bezopasnosti. KH.: Folio, 2003, 14, 24–28.
4. Ivannikov, V. P., Klyus, P. P. Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara. M.: Stroyizdat, 1987, 288.
5. Barrett J. Tank farm blast was biggest single incident for Anstralian brigade. Fire, 1993, 86, 1062, 18–24.
6. Volkov, O. M. Pozharnaya bezopasnost' rezervuarov s nefteproduktami. M.: Nedra, 1984, 152.
7. Drazdeyl, D. Vvedeniye v dinamiku pozharov. M.: Stroyizdat, 1990, 424.
8. Hovalenkov, S. V., Sozник, O. P., Andriyenko, V. M. Heometrychne modelyuvannya vyprominyuvannya polum"ya pry pozhezhi nafty v rezervuari. Pratsi TDATA, 4, 27, Melitopol', 20–25.
9. Andriyenko, V. N., Basmanov, A. Ye., Govalenkov, S. V., Sozник, A. P. Geometricheskaya model' teplovykh potokov pri pozhare v rezervuare s uchetom vetrovogo vozdeystviya. Sovremennyye problemy geometricheskogo modelirovaniya // Materi-aly Ukraino-rossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Khar'kov, 2005, 171–177.
10. Horbenko, N. A., Hovalenkov, S. V., Bezuhlov, O. E. Otsinka faktoriv fakela polum"ya, shcho vplyvayut' na vyprominyuvannya pry horinni rezervuariv z naftoyu ta naftoproduktamy. Visnyk Mizhnarodnoho Slov"yans'koho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky», 2, 7, Kharkiv: Yana, 2004, 50–55.

Надійшла до редколегії: 28.09.2019

Прийнята до друку: 08.10.2019