

УДК 519.6

О. Є. Басманов¹, д.т.н., професор, пров. н.с. відділу (ORCID 0000-0002-6434-6575)

Д. І. Карпова¹, викл. каф. (ORCID 0000-0002-1692-3630)

Є. В. Морщ², д.т.н., завідувач відділу експертизи (ORCID 0000-0003-0131-2332)

С. В. Гарбуз¹, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-6345-6214)

В. С. Бенедюк¹, ст. н.с. відділу (ORCID 0000-0002-5109-5295)

О. В. Зазимко¹, н.с. відділу (ORCID 0000-0001-7496-0248)

¹Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

²Державний НДІ технологій кібербезпеки та захисту інформації, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ ВІД РЕЗЕРВУАРІВ З НАФТОПРОДУКТАМИ, ЩО ГОРЯТЬ

Побудовано модель для визначення щільності теплового потоку випромінюванням від пожежі в вертикальному сталевому резервуарі з нафтопродуктом. Модель враховує деформацію полум'я під впливом вітру: нахил осі полум'я та розширення його основи в підвітряний бік. Запропонований підхід спирається на відомі емпіричні залежності довжини полум'я та кута його відхилення від вертикальної осі в залежності від швидкості вітру, питомої масової швидкості вигорання рідини та діаметра резервуара. Ці залежності використано для визначення довжини полум'я в довільній точці, що лежить на основі полум'я. Це дозволило побудувати рівняння випромінюючої поверхні полум'я в параметричному вигляді. Отримана поверхня має конусоподібну форму з еліптичною основою, витягнутої за межі резервуара з підвітряного боку. Відносне розширення основи полум'я за межі резервуара збільшується із зростанням швидкості вітру і зменшується із зростанням діаметру резервуара. Розроблено алгоритм розрахунку щільності теплового потоку випромінюванням від полум'я до довільної площадки, заданої просторовими координатами і нормальним вектором. В алгоритмі використано покриття основи полум'я регулярною сіткою з подальшим застосуванням методів чисельного диференціювання для визначення нормального вектору до випромінюючої поверхні полум'я і методів чисельного інтегрування для оцінки коефіцієнта взаємного опромінення між полум'ям і площадкою, що нагрівається під впливом пожежі. Показано, що розширення основи резервуара призводить до істотного збільшення щільності теплового потоку з підвітряного боку резервуара. Отримані результати можуть бути використані для визначення наслідків теплового впливу пожежі на сусідні резервуари з нафтопродуктами та інше технологічне обладнання, а також для визначення зон безпечного розташування техніки та особового складу, задіяних у локалізації і ліквідації пожежі.

Ключові слова: пожежа горючої рідини, випромінююча поверхня полум'я, тепловий потік випромінюванням

1. Вступ

Склади нафти і нафтопродуктів є основним місцем їх зберігання в процесі їх переробки і транспортування. З початком повномасштабної російської агресії ціклади стали однією з пріоритетних цілей при ударах по об'єктах критичної інфраструктури. В залежності від їх розташування для ударів застосовувалися артилерія, ракети, безпілотні літальні апарати. Наслідком таких атак майже завжди ставали пожежі або руйнування резервуарів. На відміну від пожеж, які трапляються в мирний час внаслідок відмови обладнання або помилки оператора, така пожежа може починатися з горіння відразу кількох резервуарів одночасно. Це означає збільшення щільності теплового потоку на сусідні технологічні об'єкти та особовий склад, задіяний у локалізації і ліквідації пожежі. При цьому існуючі рекомендації щодо гасіння пожеж в резервуарних парках [1] виходять з припущення про горіння в одному резервуарі, або в обвалуванні резервуара. Згідно з оцінкою [2] у випадку пожеж горючих рідин в резервуарах або розливах на випромінювання припадає близько 92 % теплового потоку. В зв'язку з цим виникає необхідність визначення теплового потоку від осередку горіння складної форми, яким, наприклад, є одночасне горіння в кількох резервуарах.

Вибухи та пожежі, викликані тепловим впливом, можуть мати серйозні наслідки для життєдіяльності населення, ускладнити роботу рятувальних служб і техніки, а також заважати проведенню заходів з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій [3]. Внаслідок атаки безпілотними літальними апаратами по нафтобазі пожежа охопила всі дев'ять наземних резервуарів. При цьому 3 резервуари по 900 м³ та 1 резервуар об'ємом 400 м³ були повністю зруйновані. Інші 5 пошкоджені уламками з подальшим витоком палива за межі обвалування. Витікання і потрапляння рідини, що горить в приватний сектор призвело до загибелі 7 осіб, ще 3 було травмовано [4].

Таким чином, актуальною проблемою є розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового потоку до них.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [5] розглянуто основні аспекти пожежної безпеки резервуарних парків для зберігання нафтопродуктів, зокрема, можливі загрози та методи зниження ризиків виникнення пожеж. Але в роботі не розглянуто специфічні ризики, які можуть виникнути у випадку воєнних дій. В [6] використовуються математичні моделі для оцінки потенційних ризиків та обґрунтування заходів безпеки, у статті розглядаються основні механізми аварій, такі як розливи, вибухи пароповітряних сумішей та можливість доміно-ефекту. Але вплив типу рідини в резервуарі, що горить, на довжину факела, температуру його випромінюючої поверхні і ступінь чорноти залишено поза увагою. В [7] розглянуто проблему поширення теплового випромінювання від осередків пожеж та його впливу на прилеглі конструкції та об'єкти, проаналізовано основні механізми передачі тепла, а також наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень щодо ступеня впливу теплового випромінювання на матеріали та будівельні конструкції. Недоліком є те, що робота зосереджена переважно на лабораторних дослідженнях, що ускладнює перенесення отриманих результатів на випадки реальних пожеж. В [8] досліджено різні види аварій, серед яких розгерметизація резервуарів, займання парів нафти, вибухи, витоки та пожежі. Але і тут поза увагою залишається визначення теплового потоку від пожежі в резервуарі з горючою рідиною. В [9] проаналізовано основні фактори займання, механізми розвитку пожеж та методи їхнього запобігання, у тому числі системи виявлення, гасіння та протипожежного захисту. Проте можливість каскадного розповсюдження пожежі внаслідок теплового впливу пожежі на сусідні резервуари не розглянуто. Основні причини витоків (корозія резервуарів, порушення технологічних процесів, аварії) та оцінка їх впливу на довкілля, зокрема на забруднення ґрунтів, водних ресурсів та повітря розглядається в [10]. Однак, і тут не приділено уваги методам запобігання каскадному розповсюдженню пожеж. В [11] розглянуто ключові фактори ризику виникнення аварій в резервуарних парках, але основна увага приділена лише оцінці ймовірності виникнення надзвичайних ситуацій, тоді як тепловий вплив пожежі на сусідні резервуари залишено поза увагою.

В [12] аналізуються фактори підвищеного ризику, зокрема можливі атаки на об'єкти критичної інфраструктури, наслідки бойових дій, а також обмеженість ресурсів для ліквідації пожеж у таких умовах. Запропоновано заходи для мінімізації ризиків, включаючи підвищення стійкості конструкцій резервуарів, застосування спеціалізованих засобів пожежогасіння та організаційні аспекти реагування на надзвичайні ситуації. Але не приділено належної уваги тепловому впливу від

пожежі в резервуарі, що горить, на техніку і особовий склад, залучені до локалізації і ліквідації пожежі.

В [13] розглянуто експериментальні дослідження впливу висоти вільного простору над поверхнею рідини на характеристики полум'я при пожежах в резервуарах з горючими рідинами. Експерименти проводилися у лабораторних умовах на ємностях (10÷20) см, але відомо, що горіння в ємностях діаметром менше 1 м істотно відрізняється від горіння в резервуарах діаметром понад кілька метрів внаслідок турбулентного характеру процесу горіння. В [14] дослідження присвячене розробці універсальної математичної моделі форми полум'я та аналітичних моделей для розрахунку геометричного коефіцієнта випромінювання на поверхні, що піддається впливу пожежі. У роботі представлено новий підхід до визначення розподілу теплового випромінювання на основі геометричних параметрів полум'я, що дозволяє більш точно оцінити рівень теплового навантаження на оточуючі об'єкти. Увагу приділено загальним параметрам полум'я та теплового випромінювання, але не враховано особливостей горіння таких рідин, таких як нафтопродукти, що мають суттєво відмінні характеристики горіння. В [15] використано модель точкового джерела випромінювання, але недоліком такого підходу є неможливість врахування геометрії полум'я, особливо в умовах вітрового впливу на нього. В [16] аналітично розраховано коефіцієнт взаємного опромінення між елементарною площадкою та полум'ям у вигляді сфери або еліпсоїду. Але спостереження за горінням рідин у резервуарах свідчать, що форма факела близька до конічної або циліндричної.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового потоку на них є визначення форми полум'я над резервуаром і щільності теплового потоку випромінюванням від нього.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є побудова моделі теплового потоку випромінюванням від резервуарів з нафтопродуктами, що горять, в умовах вітру.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити характеристики полум'я над резервуаром в умовах вітрового впливу;
- побудувати рівняння випромінюючої поверхні полум'я у параметричній формі;
- розробити алгоритм визначення щільності теплового потоку випромінюванням.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес горіння рідини у вертикальному сталевому резервуарі (РВС), предметом – щільність теплового потоку від пожежі. Гіпотезою дослідження є можливість представлення випромінюючої поверхні полум'я певною геометричною фігурою. Припускається, що резервуар повністю заповнений нафтопродуктом. Для знаходження щільності теплового потоку випромінюванням використано закон Стефана–Больцмана. Для побудови випромінюючої поверхні полум'я і визначення нормального вектора до неї застосовано методи математичного аналізу і чисельного диференціювання. Розрахунок коефіцієнта взаємного опромінення проведено із використанням методів чисельного інтегрування у припущенні про відсутність додаткових перешкод між полум'ям і поверхнею, що

нагрівається. Програмну реалізацію алгоритму розрахунку щільності теплового потоку випромінюванням виконано в середовищі програмування Delphi 12.

5. Моделювання теплового потоку випромінюванням від резервуарів з нафтопродуктами, що горять

5.1. Визначення характеристик полум'я над резервуаром в умовах вітрового впливу

Спостереження за полум'ям над горючою рідиною в умовах вітрового впливу свідчать про

- нахил факелу в напрямку вітру;
- розширення основи полум'я з підвітряного боку (рис. 1).

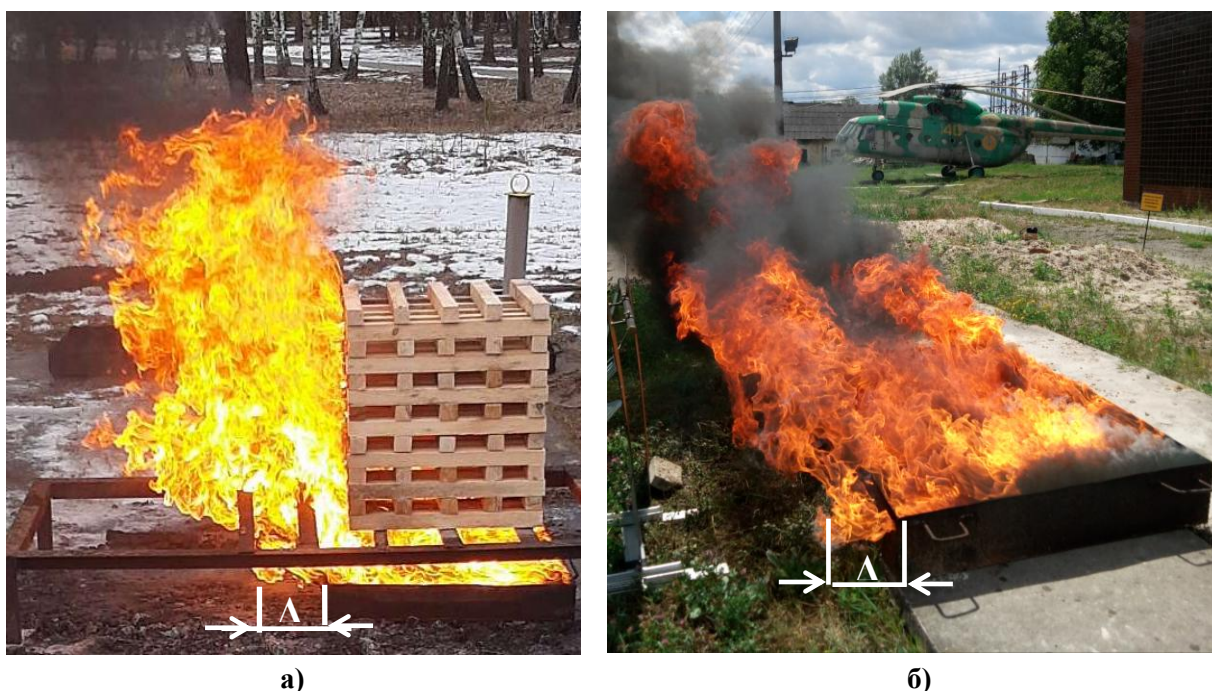


Рис. 1. Розширення основи полум'я на величину Δ з підвітряного боку: а – горіння бензину; б – горіння відпрацьованого мастила

У випадку горіння рідини у вертикальному сталевому резервуарі або круговому розливі розширення основи полум'я з підвітряного боку призводить до того, що основа полум'я приймає форму еліпса (рис. 3а), менша вісь якого дорівнює діаметру резервуара D , а більша [17]

$$D' = D + \Delta = 2,506D \cdot Fr^{0,067} Re^{-0,03} \left(\frac{\rho_v}{\rho_a} \right)^{0,145},$$

де Fr , Re – число Фруда і Рейнольдса відповідно:

$$Fr = \frac{w^2}{gD};$$

$$Re = \frac{wD}{\nu_a};$$

w – швидкість вітру; g – прискорення сили тяжіння; v_a – кінематична в'язкість повітря; ρ_a – густина повітря; ρ_v – густина парів горючої рідини при температурі кипіння.

На рис. 2 показано відносне розширення полум'я для деяких вертикальних сталевих резервуарів в залежності від швидкості вітру.

$$\delta = \frac{D' - D}{D} 100\% = \frac{\Delta}{D} 100\%$$

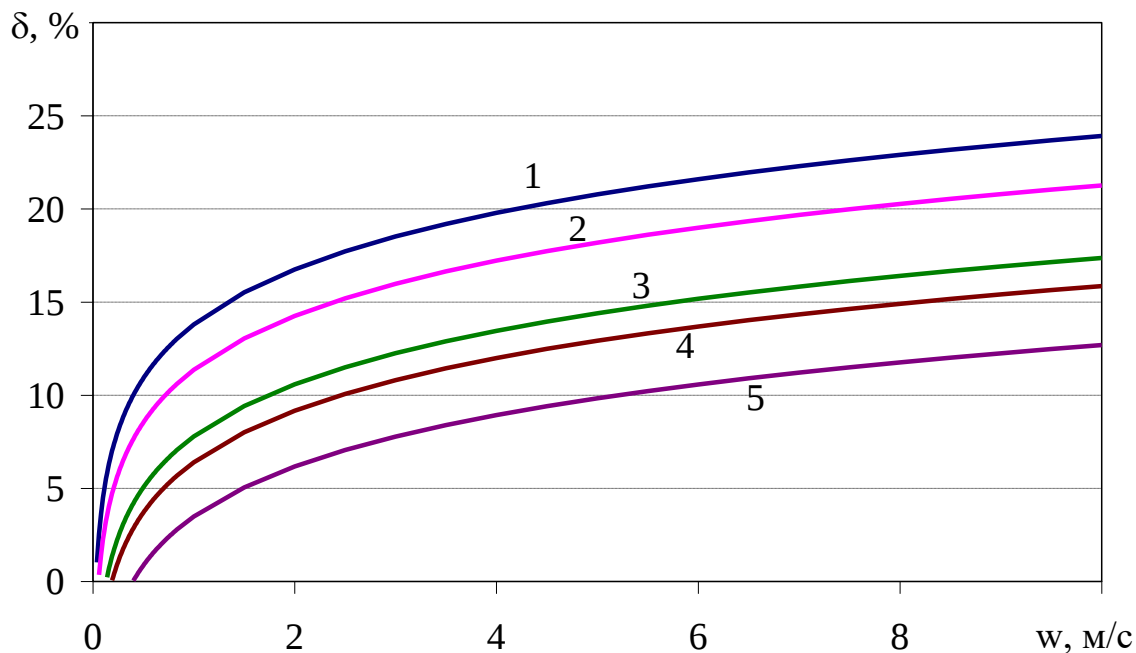


Рис. 2. Відносне розширення основи полум'я під впливом вітру для різних резервуарів: 1 – RBC-5000; 2 – RBC-10000; 3 – RBC-20000; 4 – RBC-30000; 5 – RBC-50000

В [17] запропоновано розглядати вісь полум'я такою, що виходить з центру еліпсу (рис. 3б). При цьому під впливом вітру нижня частини осі відхиляється від вертикальної осі на кут φ , а верхня – на кут $\varphi/2$. Загальна довжина осі полум'я і кут його нахилу описуються емпіричними залежностями

$$L = L_1 + L_2 = 10,615D \left(\frac{\eta}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,305} (w^*)^{-0,03}; \quad (1)$$

$$\cos \varphi = (w^*)^{-0,5}, \quad (2)$$

де L_1 , L_2 – відрізки на вісі полум'я, що відповідають половині його висоти h (рис. 3); η – питома масова швидкість вигорання рідини; w^* – безрозмірна швидкість вітру:

$$w^* = \max \left\{ 1, w \left(\frac{\rho_a}{g\eta D} \right)^{1/3} \right\}; \quad (3)$$

w – швидкість вітру.

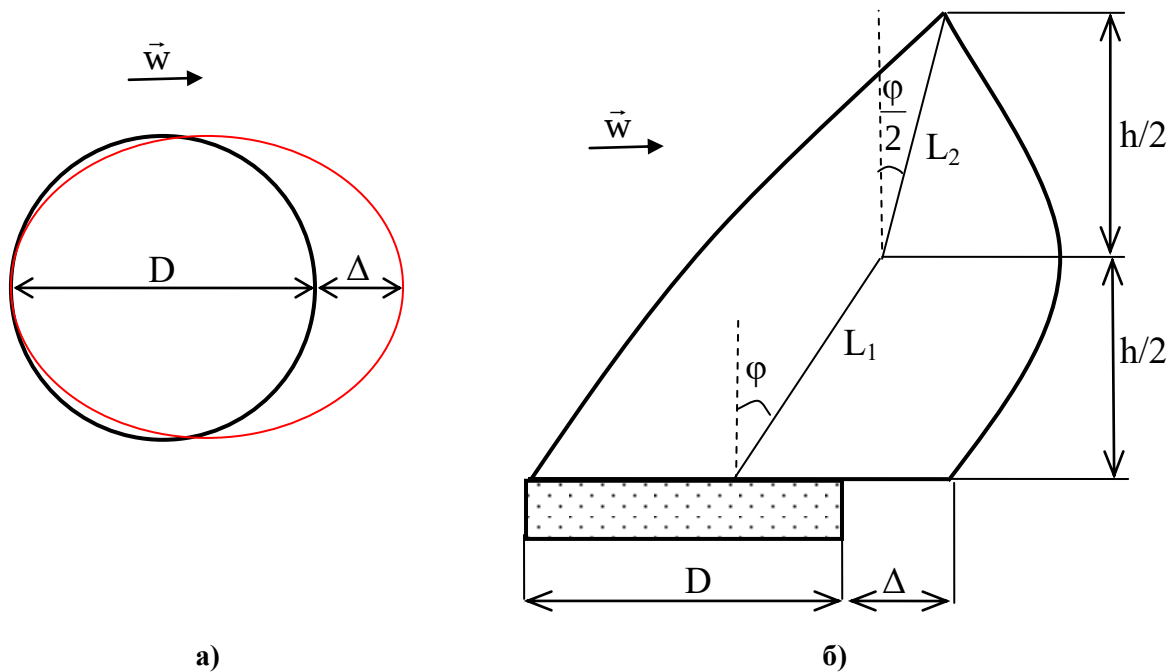


Рис. 3. Вплив вітру на полум'я над круговим розливом рідини: а – представлення основи полум'я еліпсом; б – нахил і розширення основи полум'я

Висота полум'я h може бути знайдена із співвідношень

$$L_1 + L_2 = L;$$

$$\frac{h}{2 \cos \varphi} + \frac{h}{2 \cos \frac{\varphi}{2}} = L;$$

$$h = 2L \left[\frac{1}{\cos \varphi} + \frac{1}{\cos \varphi/2} \right]^{-1}. \quad (4)$$

Із залежностей (2), (3) випливає, що вітер відхиляє полум'я за умови

$$w \left(\frac{\rho_a}{g \eta D} \right)^{1/3} > 1;$$

$$w > \left(\frac{g \eta D}{\rho_a} \right)^{1/3}. \quad (5)$$

Із аналізу нерівності (5) випливає, що мінімальна швидкість вітру $w_{\min}$, при якій полум'я починає відхилятися від вертикальної вісі, залежить від питомої масової швидкості вигорання рідини і діаметра резервуара. Цю залежність проілюстровано на рис. 4.

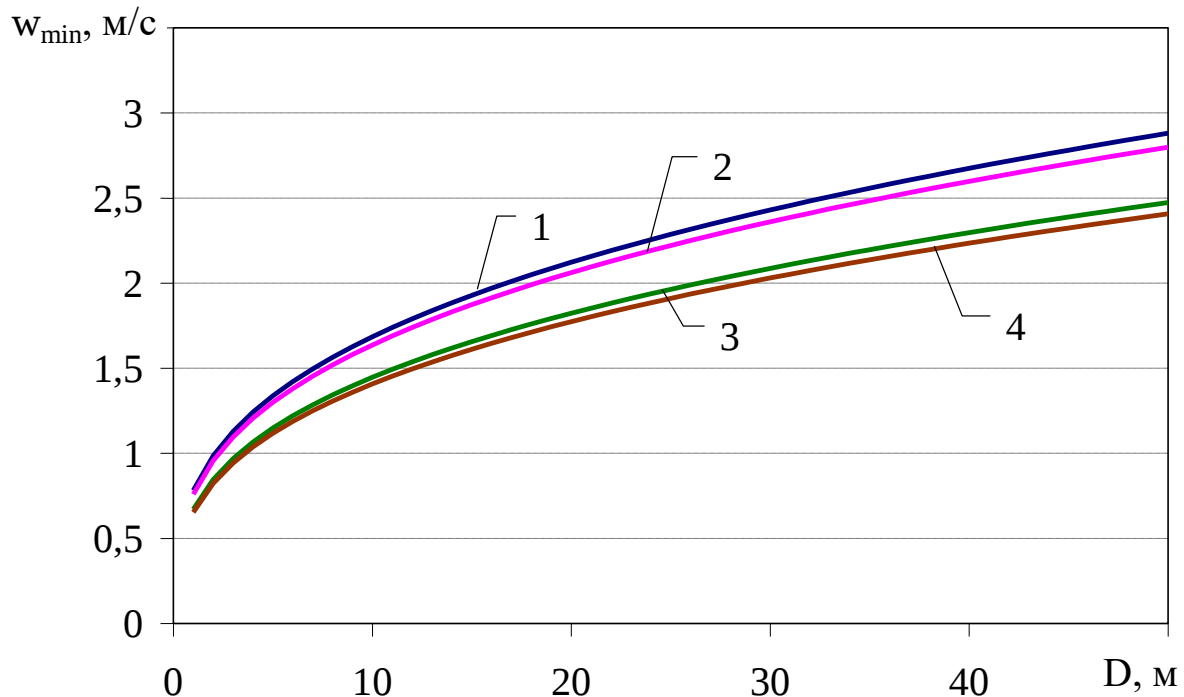


Рис. 4. Залежність мінімальної швидкості вітру, яка відхиляє полум'я, від діаметра резервуара для різних рідин: 1 – бензин ($\eta=0,06$ кг/(м²·с)); 2 – дизельне паливе ($\eta=0,055$ кг/(м²·с)); 3 – керосин ($\eta=0,038$ кг/(м²·с)); 4 – мазут ($\eta=0,035$ кг/(м²·с))

При значеннях швидкості вітру, менших ніж наведені на рис. 4, вісь полум'я залишається практично вертикальною.

5.2. Побудова рівняння випромінюючої поверхні полум'я у параметричній формі

Систему координат було обрано таким чином, що вертикальна вісь z співпадає з вертикальною віссю резервуара, а початок координат знаходиться в центрі його основи (рис. 5). Для побудови рівняння випромінюючої поверхні було прийнято, що довжина полум'я в довільній точці його основи $M(u, v, H)$ визначається відстанню r до межі основи

$$L(u, v) = 10,615 \cdot 2r \cdot \left(\frac{\eta}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,305} (w^*)^{-0,03};$$

$$L(u, v) = 21,23r \cdot \left(\frac{\eta}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,305} (w^*)^{-0,03}. \quad (6)$$

Тоді рівняння поверхні полум'я має вигляд

$$\begin{cases} x = u + L \sin \varphi \cos \alpha; \\ y = v + L \sin \varphi \sin \alpha; \\ z = h + L \cos \varphi, \end{cases} \text{ якщо } L \leq \frac{h}{2 \cos \varphi}; \quad (7)$$

$$\begin{cases} x = u + \left(\frac{h}{2} \operatorname{tg} \varphi + \left(L - \frac{h}{2 \cos \varphi} \right) \sin \frac{\varphi}{2} \right) \cos \alpha; \\ y = v + \left(\frac{h}{2} \operatorname{tg} \varphi + \left(L - \frac{h}{2 \cos \varphi} \right) \sin \frac{\varphi}{2} \right) \sin \alpha; \text{ якщо } L > \frac{h}{2 \cos \varphi}; \\ z = H + \frac{h}{2} + \left(L - \frac{h}{2 \cos \varphi} \right) \cos \frac{\varphi}{2}, \end{cases} \quad (8)$$

де H – висота резервуара; величина L розраховується за виразом (6); кут α визначається напрямком вітру (рис. 5).

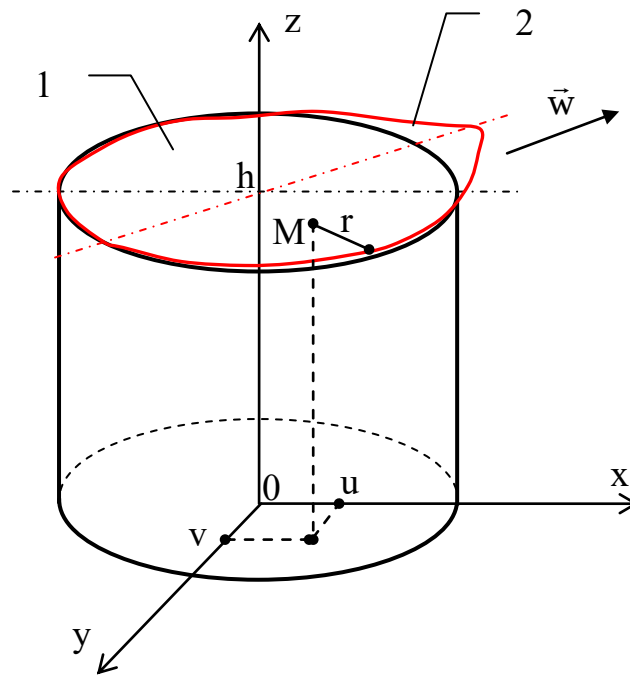


Рис. 5. Вибір системи координат: 1 – поверхня рідини в резервуарі, що горить; 2 – розширення основи полум'я в напрямку вітру

При горінні нафтопродуктів в резервуарах конвекційні потоки продуктів горіння і розігрітого повітря здійснюються вгору. Тому нагрів сусідніх об'єктів відбувається виключно за рахунок теплового випромінювання від пожежі. У випадку, що розглядається, тепловий потік випромінюванням буде мати 2 складові:

$$q = q_1 + q_2, \quad (9)$$

де q_1 – щільність теплового потоку випромінюванням від верхньої частини поверхні полум'я; q_2 – щільність теплового потоку випромінюванням від нижньої частини поверхні полум'я (рис. 3).

Щільність теплового потоку випромінюванням на елементарну площадку визначається законом Стефана–Больцмана

$$q_k = c_0 \varepsilon_f \varepsilon \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \psi_k; \quad k = 1, 2, \quad (10)$$

де $c_0=5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; ε_f – ступінь чорноти випромінюючої поверхні факела; ε – ступінь чорноти елементарної площадки, що нагрівається під тепловим впливом пожежі; T_f – температура випромінюючої поверхні факела; T – температура елементарної площадки; ψ_1, ψ_2 – коефіцієнти взаємного опромінення між елементарною площадкою і верхньою та нижньою частинами поверхні полум'я відповідно. Ці коефіцієнти залежить від форми полум'я і розташування елементарної площадки, що нагрівається:

$$\psi = \frac{1}{\pi} \iint_S \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} dS, \quad (11)$$

де S – випромінююча поверхня полум'я; $\vec{r}$ – радіус вектор, що з'єднує точку на поверхні полум'я і елементарну площадку; φ_1 – кут між радіус-вектором $\vec{r}$ і нормальним вектором $\vec{n}_1$ до поверхні полум'я в даній точці; φ_2 – кут між радіус-вектором $\vec{r}$ і нормальним вектором $\vec{n}_2$ до елементарної площадки. Інтегрування у (11) відбувається лише по тих точках поверхні S , де нормальні вектори $\vec{n}_1, \vec{n}_2$ утворюють гострі кути з вектором $\vec{r}$, тобто обидва множники в чисельнику підінтегральної функції (11) є додатними.

Косинуси кутів φ_1, φ_2 можуть бути представлені через скалярні добутки векторів

$$\cos \varphi_1 = \frac{(\vec{n}_1, \vec{r})}{|\vec{n}_1| \cdot |\vec{r}|}; \quad \cos \varphi_2 = \frac{(\vec{n}_2, \vec{r})}{|\vec{n}_2| \cdot |\vec{r}|}, \quad (12)$$

Одиничний нормальний вектор до поверхні факела у точці (x, y, z) випромінюючої поверхні S факела має вигляд

$$\vec{n}_1 = \left(\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \right), \quad (13)$$

де

$$A = \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial z}{\partial v} - \frac{\partial z}{\partial u} \frac{\partial y}{\partial v}; \quad B = \frac{\partial z}{\partial u} \frac{\partial x}{\partial v} - \frac{\partial x}{\partial u} \frac{\partial z}{\partial v}; \quad C = \frac{\partial x}{\partial u} \frac{\partial y}{\partial v} - \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial x}{\partial v}, \quad (14)$$

Якщо елементарна площадка, що піддається тепловому опроміненню від факела, знаходиться в точці (x_0, y_0, z_0) і має одиничний нормальний вектор

$$\vec{n}_2 = (n_x, n_y, n_z),$$

то вираз (11) з урахуванням (12) набуде вигляду

$$\psi = \frac{1}{\pi} \iint_S \frac{(\vec{r}, \vec{n}_1)(\vec{r}, \vec{n}_2)}{r^4} dS;$$

$$\psi = \frac{1}{\pi} \iint_S \frac{[A(x_0 - x) + B(y_0 - y) + C(z_0 - z)]}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \times \\ \times [n_x(x - x_0) + n_y(y - y_0) + n_z(z - z_0)] dS.$$

Виконавши заміну змінних (8), (10) і врахувавши, що

$$dS = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} du dv,$$

Отримаємо

$$\psi = \frac{1}{\pi} \iint_{\Omega} \frac{[A(x_0 - x) + B(y_0 - y) + C(z_0 - z)]}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \times \\ \times [n_x(x - x_0) + n_y(y - y_0) + n_z(z - z_0)] du dv, \quad (15)$$

де (x_0, y_0, z_0) – точка, в якій знаходиться елементарна площадка; Ω – основа полум'я; інтегрування проводиться лише по тих точках (u, v) з області Ω , для яких обидва множники в квадратних дужках чисельника (15) є додатними.

Для нижньої частини поверхні полум'я (рис. 3) нормальний вектор має вигляд

$$\vec{n}_1 = (0, 0, -1).$$

Тоді вираз для коефіцієнта взаємного опромінення набуде вигляду

$$\psi_2 = \frac{H - z_0}{\pi} \iint_{\Omega'} \frac{[n_x(u - x_0) + n_y(v - y_0) + n_z(H - z_0)]}{[(u - x_0)^2 + (v - y_0)^2 + (H - z_0)^2]^{\frac{3}{2}}} du dv, \quad (16)$$

де Ω' – основа полум'я за виключенням поверхні рідини.

5.3 Розробка алгоритму визначення щільності теплового потоку випромінюванням

Для обчислення частинних похідних (14) нескінченно малий приріст аргументу замінено скінченим приростом:

$$\frac{\partial f}{\partial u} \approx \frac{f(u + \Delta s, v) - f(u - \Delta s, v)}{2\Delta s}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial f}{\partial v} \approx \frac{f(u, v + \Delta s) - f(u, v - \Delta s)}{2\Delta s}, \quad (18)$$

де Δs – достатньо малий крок.

Тоді розрахунок щільності теплового потоку випромінюванням може бути проведений із використанням наступного алгоритму.

1. Обрати прямокутну область W , яка повністю містить в собі основу полум'я, наприклад, квадрат

$$W = \{(u, v): -F \leq u \leq F, -F \leq v \leq F\},$$

де

$$F = D' - \frac{D}{2}.$$

2. Обрати кількість вузлів N по кожній змінній і покрити область W регулярно сіткою (u_i, v_j) , $0 \leq i, j \leq N-1$, з кроком

$$\Delta w = \frac{2F}{N-1}.$$

3. Покласти $S = 0$; $i = 0$.

4. Покласти $j = 0$.

5. Якщо точка (u_i, v_j) не належить основі полум'я то перейти до кроку 14.

6. Обчислити (x, y, z) за формулами (6–8).

7. Із використанням співвідношень (13), (14) і формул чисельного диференціювання (17), (18), знайти нормальний вектор (A, B, C) до поверхні полум'я.

8. Обчислити ваговий коефіцієнт

$$k = \begin{cases} 0,25, & (i = 0 \vee i = N-1) \wedge (j = 0 \vee j = N-1); \\ 1, & i \neq 0 \wedge i \neq N-1 \wedge j \neq 0 \wedge j \neq N-1; \\ 0,5, & \text{other.} \end{cases}$$

9. Обчислити

$$\begin{aligned} m_1 &= A(x_0 - x) + B(y_0 - y) + C(z_0 - z); \\ m_2 &= n_x(x - x_0) + n_y(y - y_0) + n_z(z - z_0). \end{aligned}$$

10. Якщо $m_1 > 0$ та $m_2 > 0$, то

$$S := S + k \frac{m_1 m_2}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)]^{\frac{p}{2}}}.$$

11. Якщо точка (u_i, v_j) лежить всередині резервуара (на поверхні рідини), то перейти до кроку 14.

12. Обчислити

$$m_3 = n_x(u - x_0) + n_y(v - y_0) + n_z(H - z_0).$$

13. Якщо $m_3 > 0$, то

$$S := S + k \frac{m_3(H - z_0)}{\left[(u - x_0)^2 + (v - y_0)^2 + (H - z_0)\right]^{\frac{1}{2}}}.$$

14. Якщо $j < N-1$, то покласти $j := j+1$ та перейти до кроку 5.
15. Якщо $i < N-1$, то покласти $i := i+1$ та перейти до кроку 4.
16. Обчислити коефіцієнт взаємного опромінення:

$$\psi = \frac{1}{\pi} S \Delta w^2.$$

17. Обчислити щільність теплового потоку за формулою (10).

Застосування наведеного алгоритму дозволяє знайти щільність теплового потоку випромінюванням на довільно розташовану елементарну площадку. В якості прикладу на рис. 6 наведено розподіл щільності теплового потоку випромінюванням від пожежі в резервуарі РВС-10000 з дизельним паливом при швидкості вітру 3 м/с, направленою як показано на рис. 6.

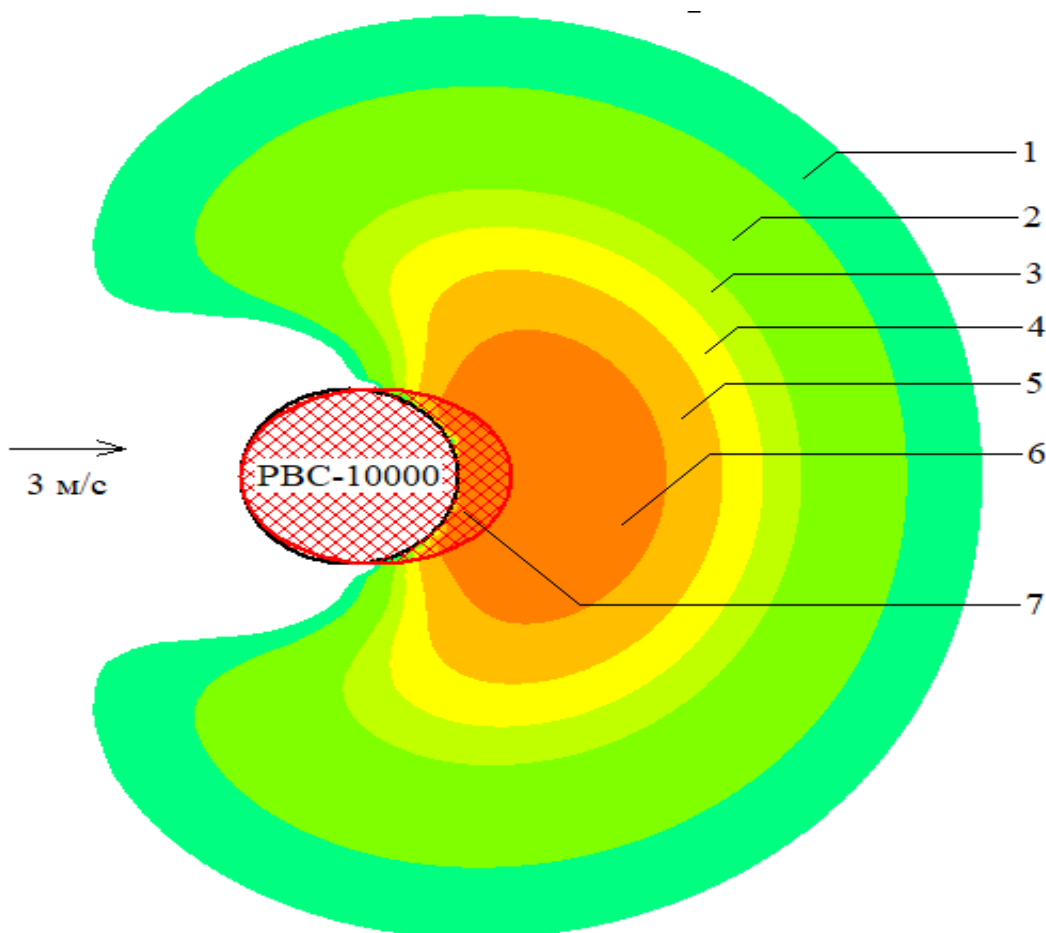


Рис. 6. Розподіл щільності теплового потоку випромінюванням на горизонтальну поверхню при пожежі в резервуарі РВС-10000 з дизельним паливом і швидкості вітру 3 м/с: 1 – $(3,0 \div 4,2)$ кВт/м² (бойовий одяг); 2 – $(4,2 \div 7,0)$ кВт/м² (бойовий одяг, до 5 хв); 3 – $(7,0 \div 8,5)$ кВт/м² (бойовий одяг змочений водою, до 5 хв); 4 – $(8,5 \div 10,5)$ кВт/м² (те саме, під захистом водяної завіси); 5 – $(10,5 \div 14,0)$ кВт/м² (тепловідбиваючий костюм, під захистом водяної завіси, до 5 хв); 6 – понад 14,0 кВт/м² (перебування неможливе); 7 – розширення основи полум'я в підвітряний бік

Аналіз розподілу на рис. 6 свідчить, що внаслідок вітрового впливу з підвітряного боку резервуара утворюється зона довжиною близько 70 м, щільність теплового потоку випромінюванням в якій становить $(3,0 \div 24,0)$ кВт/м². Це потребує відповідних засобів захисту особового складу, що приймає участь у локалізації і ліквідації пожежі.

6. Обговорення результатів моделювання теплового потоку від резервуарів з нафтопродуктами, що горять

Основним способом передачі тепла від пожежі в резервуарі до сусідніх об'єктів є теплопередача випромінюванням. Одним із способів оцінки щільності теплового потоку випромінюванням є апроксимація полум'я деякою 3-вимірною фігурою. Наявність вітру деформує полум'я, нахиляючи його і розширюючи його основу з підвітряного боку (рис. 1).

Аналіз залежності відносного розширення основи полум'я під впливом вітру (рис. 2) свідчить, що відносне розширення основи збільшується із зростанням швидкості вітру і зменшується із зростанням діаметру резервуара. Наприклад, при швидкості вітру 4 м/с відносне розширення складає від 8 % (для резервуара РВС-50000) до 20 % (резервуар РВС-5000). Враховуючи, що нормативна відстань між резервуарами в резервуарній групі складає $0,75D$ (D – діаметр резервуара), то в найгіршому випадку відстань між полум'ям і сусіднім резервуаром може скоротитися до $0,55D$.

Внаслідок турбулентності, притаманній процесу горіння рідини, факел не має чіткої геометричної форми, для нього характерні постійні пульсації. Довжина полум'я і кут його нахилу можуть бути описані емпіричними залежностями (1–3). Із них випливає, що із збільшенням діаметра резервуара і питомої масової швидкості вигорання рідини довжина полум'я зростає, в кут нахилу зменшується. При цьому відхилення полум'я має місце лише за виконання умови (5), тобто існує таке граничне значення швидкості вітру, що при швидкостях вітру менше цього значення відхилення полум'я не відбувається (рис. 4).

Для апроксимації випромінюючої поверхні факела запропоновано використовувати емпіричні залежності (1–4) для оцінки довжини полум'я в довільній точці його основи (формула (6)), а не тільки в центрі. В цьому випадку рівняння випромінюючої поверхні полум'я може бути подано у вигляді (7), (8), де система координат пов'язана з резервуаром, в якому відбувається пожежа (рис. 5).

Одним із наслідків розширення основи полум'я з підвітряного боку за межі резервуара є те, що джерелом теплового випромінювання є як верхня (конусоподібна) частина поверхні полум'я, так і нижня – поверхня основи, що виходить за межі резервуара – формула (9). Щільність теплового потоку випромінюванням від деякої поверхні до даної елементарної площадки, що характеризується положенням в просторі і напрямом нормального вектора, описується законом Стефана–Больцмана (10). Основну складність для його застосування являє необхідність обчислення коефіцієнта взаємного опромінення, який визначається співвідношенням (11). Застосування формул (13), (14) до рівняння випромінюючої поверхні полум'я, поданої в параметричному вигляді (7), (8), дозволяє знайти нормальний вектор до поверхні полум'я в довільній точці і отримати вираз для коефіцієнта взаємного опромінення у вигляді (15). Для частини основи полум'я, що виходить за межі резервуара, вираз для коефіцієнта взаємного опромінення спрощується – формула (16).

За відсутності вітру резервуар і випромінююча поверхня полум'я утворюють опуклу тривимірну фігуру, внаслідок цього радіус-вектор від точки на поверхні полум'я до поверхні, що нагрівається, не може перетинати резервуар. Розширення основи полум'я і нахил його вісі під впливом вітру призводять до того, що зазначена фігура вже не буде опуклою, і буде виникати «тінь» від резервуара. Це означає при обчисленні інтегралів (15) і (16) необхідно додатково врахувати, що радіус-вектор від полум'я до площадки, що опромінюється, може перетинати поверхню резервуара.

Основну складність при розрахунку щільності теплового потоку випромінюванням являє обчислення коефіцієнта взаємного опромінення ψ . Через складний вигляд функцій (6–8) аналітичне обчислення похідних (14) та інтеграла (15) є неможливим. Тому для їх обчислення є доцільним використання чисельних методів диференціювання та інтегрування.

Алгоритм розрахунку щільності теплового потоку випромінюванням спирається на застосування методу трапецій при обчисленні інтегралів (15) і (16). Для цього квадратна область, що містить в собі основу полум'я, покривається регулярною сіткою (кроки 1, 2). Далі відбувається інтегрування (15), (16) за змінними u , v (кроки 3–15). При цьому компоненти нормального вектора до поверхні полум'я обчислюються шляхом апроксимації частинних похідних у вигляді (17), (18).

Застосування розробленого алгоритму до розрахунку щільності теплового потоку випромінюванням на горизонтальну площадку на рівні землі від пожежі в резервуарі РВС-10000 з дизельним паливом (рис. 6) свідчить про утворення небезпечної зони з підвітряного боку резервуара. Отриманий розподіл щільності теплового потоку дозволяє провести зонування прилеглої місцевості і визначити необхідні засоби захисту особового складу, задіяного в локалізації і ліквідації пожежі (ДСТУ EN ISO 6942:2018). Аналіз розподілу на рис. 6 показує також утворення зони з особливо небезпечною величиною щільності теплового потоку (понад 14 кВт/м^2), знаходження особового складу у якій є неможливим. Виникнення такої зони є наслідком, як розширення основи полум'я в підвітряний бік, так і нахилу осі полум'я.

Перевагою запропонованого підходу є врахування особливостей деформації полум'я під впливом вітру при розрахунку щільності теплового потоку випромінюванням.

Обмеженням запропонованого підходу є те, що він може бути застосований лише у випадку, коли відсутні перешкоди між полум'ям і поверхнею, що нагрівається внаслідок теплового опромінення.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з визначенням теплового впливу пожежі в резервуарі на сусідні об'єкти.

7. Висновки

1. Під впливом вітру відбуваються нахил вісі полум'я і розширення його основи за межі резервуара. Кут відхилення факела від вертикальної вісі зростає із збільшенням швидкості вітру і спадає із зростанням діаметра резервуара і питомої масової швидкості вигорання. При цьому існує таке граничне значення швидкості вітру, що при значеннях швидкості менше нього відхилення полум'я практично не відбувається. Для резервуара РВС-5000 це граничне значення складає близько $2,2 \text{ м/с}$ для бензину і дизельного палива і $1,9 \text{ м/с}$ для мазуту та керосину. Для резервуара РВС-1000 – $2,4 \text{ м/с}$ і $2,0 \text{ м/с}$ відповідно.

2. Побудовано рівняння випромінюючої поверхні полум'я над резервуаром з нафтопродуктом, що горить. Запропонований підхід спирається на емпіричні залежності довжини полум'я від діаметру резервуара, питомої масової швидкості вигорання рідини, напрямку і швидкості вітру. Випромінююча поверхня є конусоподібною з основою у формі еліпса, витягнутого за межі резервуара з підвітряного боку. Відносне розширення основи полум'я за межі резервуара збільшується із зростанням швидкості вітру і зменшується із зростанням діаметру резервуара. Зокрема, при швидкості вітру 4 м/с відносне розширення складає від 8 % (для резервуара РВС-50000) до 20 % (резервуар РВС-5000).

3. Розроблено алгоритм визначення щільності теплового потоку випромінюванням від пожежі в резервуарі. В основі алгоритму лежить покриття основи полум'я регулярною сіткою з подальшим застосуванням методів чисельного диференціювання для визначення нормального вектору до випромінюючої поверхні полум'я і методів чисельного інтегрування для оцінки коефіцієнта взаємного опромінення між полум'ям і площадкою, що нагрівається. Показано, що внаслідок розширення основи полум'я з підвітряного боку щільність теплового потоку сягає до 24 кВт/м² (при швидкості вітру 3 м/с), що обумовлює підвищену небезпеку як для сусідніх резервуарів, так і для особового складу, задіяного в локалізації і ліквідації пожежі.

Література

1. НАПБ 05.035 – 2004. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами.
2. Landucci G., Salzano E., Taveau J., Spadoni G., Cozzani V. Detailed Studies of Domino Scenarios. Domino Effects in the Process Industries. 2013. P. 229–243. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00011-7
3. Ніжник В. В., Климась Р. В., Одинець А. В. Гасіння пожеж на складах нафти та нафтопродуктів в умовах ведення бойових дій. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції. С. 30–32.
4. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 2 місяці 2024 року. URL: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/2/0/6/1/9/6/1/analitichna-dovidka-pro-pojeji-022024.pdf>
5. Гуліда Е. М., Козак Я. Я. Забезпечення пожежної безпеки в резервуарних парках зберігання нафти та нафтопродуктів. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2020. № 6(271–272). С. 69–75. doi: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.69.700
6. Ференц Н. О., Вовк С. Я., Міллер О. В. Аналіз аварійних ситуацій і аварій в резервуарних парках складів нафти та нафтопродуктів. Пожежна безпека. 2017. № 31. С. 125–129. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pb_2017_31_20
7. Домінік А. М., Нагірняк Ю. М., Фреюк Д. В. Аналіз досліджень негативного впливу теплового потоку від осередку пожежі на навколишні об'єкти. Пожежна безпека. 2024. Т. 45. С. 39–45. doi: 10.32447/20786662.45.2024.05
8. Бабаджанова О. Ф. Аналіз розвитку аварій на нафтобазі. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. 2019. С. 173–174. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/6503/1/3.pdf>
9. Бойченко С. В., Калмикова Н. Г. Причинно-наслідковий взаємозв'язок

емісії вуглеводнів і втрат бензинів у горизонтальних резервуарах. Причини, фактори, джерела. Наукоємні технології. 2020. № 2. С. 218–235. doi: 10.18372/2310-5461.46.14810

10. Серікова О. М. Підвищення рівня екологічної безпеки території, прилеглої до місць розташування резервуарів рідких вуглеводнів. Техногенно-екологічна безпека. 2023. № 14(2). С. 50–57. doi: 10.52363/2522-1892.2023.2.6

11. Хаткова Л., Дагіль В., Дагіль І. Кількісна оцінка ризику виникнення пожеж на резервуарах з нафтою і нафтопродуктами від самозаймання пірофорних відкладень. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2022. Т. 6. № 2. С. 101–108. doi: 10.31731/2524.2636.2022.6.2.101-107

12. Савіновська В. І., Федоряк Н. В., Лялюк-Вітер Г. Д. До питання забезпечення пожежної безпеки об'єктів підвищеної небезпеки в умовах війни. Матеріали V Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. С. 197–200.

13. Liu C., Ding L., Jangi M., Ji J., Yu L., Wan H. Experimental study of the effect of ullage height on flame characteristics of pool fires. Combustion and Flame. 2020. Vol. 216. P. 245–255. doi: 10.1016/j.combustflame.2020.03.009

14. Xu L., Lu Y., Ding C., Guo H., Liu J., Zhao Y. A generic flame shape model and analytical models for geometric view factor calculation on the fire exposure surface. International Journal of Thermal Sciences. 2022. Vol. 173. P. 107392. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107392

15. Fleury R. Evaluation of Thermal Radiation Models for Fire Spread Between Objects. Proceedings, Fire and Evacuation Modeling Technical Conference. 2011. doi: 10.26021/1472

16. Sasaki K. View factor of a spheroid and an ellipse from a plate element. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2024. Vol. 326. P. 109102. doi: 10.1016/j.jqsrt.2024.109102

17. Pritchard M. J., Binding T. M. FIRE2: A New Approach for Predicting Thermal Radiation Levels from Hydrocarbon Pool Fires. IChemE Symposium. 1992. 130. P. 491–505.

O. Basmanov¹, DSc, Professor, Leading Researcher of the Department

D. Karpova¹, Lecturer of the Department

Ye. Morshch², DSc, Head of the Department of Scientific and Technical Expertise

S. Harbuz¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

V. Benediuk¹, Senior Researcher of the Department

O. Zazymko¹, Researcher of the Department

¹National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

²State Research Institute of Cybersecurity and Information Protection Technologies, Kyiv, Ukraine

MODELING OF HEAT FLOW FROM BURNING OIL TANKS

A model was developed to determine the density of heat flux by radiation from a fire in a vertical steel tank with an oil product. The model takes into account the deformation of the flame under the influence of wind: the tilt of the flame axis and the expansion of its base to leeward. The proposed approach is based on the known empirical dependencies of the flame length and the angle of its deviation from the vertical axis depending on wind speed, specific mass burn rate of the liquid, and tank diameter. These dependencies are used to determine the flame length at an arbitrary point on the flame base. This makes it possible to construct the equation of the radiating surface of the flame in a parametric form. The resulting surface has a conical shape with an elliptical base extended beyond the tank from the leeward side. The relative expansion of the flame base outside the tank increases with the wind speed and decreases with the diameter of the tank. An algorithm for calculating the heat flux density by radiation

from a flame to an arbitrary site given by spatial coordinates and a normal vector has been developed. The algorithm uses the coverage of the flame base with a regular grid, followed by the application of numerical differentiation methods to determine the normal vector to the radiating surface of the flame and numerical integration methods to estimate the view factor between the flame and the site heated by the fire. It is shown that the expansion of the tank base leads to a significant increase in the heat flux density on the leeward side of the tank. The results obtained can be used to determine the consequences of the thermal impact of the fire on neighboring oil tanks and other process equipment, as well as to determine the safe location zones for equipment and personnel involved in localizing and eliminating the fire.

Keywords: fire of flammable liquid, radiating surface of the flame, thermal radiation flux

References

1. NAPB 05.035 – 2004. Instruction on extinguishing fires in tanks with oil and oil products.
2. Landucci, G., Salzano, E., Taveau, J., Spadoni, G., Cozzani, V. (2013). Detailed studies of domino scenarios. Domino effects in the process industries, 229–243. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00011-7
3. Nizhnyk, V. V., Klymas, R. V., Odynets, A. V. (2022). Extinguishing fires at oil and oil product warehouses under combat conditions. Theory and practice of fire extinguishing and emergency situations: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference, 30–32.
4. Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 2 months of 2024. Available at: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/2/0/6/1/9/6/1/analitchna-dovidka-pro-pojeji-022024.pdf>
5. Hulida, E. M., Kozak, Y. Y. (2020). Ensuring fire safety in oil and oil products storage tank parks. Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 6, 69. doi: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.69.700
6. Ferents, N. O., Vovk, S. Ya., Miller, O. V. (2017). Analysis of emergency situations and accidents in oil and oil product storage tank parks. In Y. Ya. Kozak (Ed.), Fire safety, 31, 125–129. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pb_2017_31_20
7. Dominik, A. M., Nahirniak, Yu. M., Freyuk, D. V. (2024). Analysis of studies of the negative impact of thermal flow from the fire source on surrounding objects. Fire Safety, 45, 39–45. doi: 10.32447/20786662.45.2024.05
8. Babadjanova, O. F. (2019). Analysis of the development of accidents at the oil depot. In Theory and practice of firefighting and emergency situation liquidation: Materials of the 10th International Scientific and Practical Conference, 173–174. Available at: <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/6503/1/3.pdf>
9. Boichenko, S. V., Kalmykova, N. G. (2020). Causal relationship between hydrocarbon emissions and gasoline losses in horizontal tanks. Science-Intensive Technologies, 2, 218–235. doi: 10.18372/2310-5461.46.14810
10. Serikova, O. M. (2023). Improving the level of environmental safety in areas adjacent to liquid hydrocarbon storage tanks. Technogenic and Environmental Safety, 14(2), 50–57. doi: 10.52363/2522-1892.2023.2.6
11. Khatkova, L., Dagil, V., Dagil, I. (2022). Quantitative risk assessment of fire occurrence in oil and oil product tanks due to the spontaneous ignition of pyrophoric deposits. Emergencies: Prevention and Elimination, 6(2), 101–108. doi: 10.31731/2524.2636.2022.6.2.101-107
12. Savinovska, V. I., Fedolyak, N. V., Lialyuk-Viter, H. D. (2024). On the issue of ensuring fire safety of high-risk objects in wartime conditions. In Proceedings of the

V International Scientific and Practical Internet Conference, 197–200.

13. Liu, C., Ding, L., Jangi, M., Ji, J., Yu, L., Wan, H. (2020). Experimental study of the effect of ullage height on flame characteristics of pool fires. *Combustion and Flame*, 216, 245–255. doi: 10.1016/j.combustflame.2020.03.009

14. Xu, L., Lu, Y., Ding, C., Guo, H., Liu, J., Zhao, Y. (2022). A generic flame shape model and analytical models for geometric view factor calculation on the fire exposure surface. *International Journal of Thermal Sciences*, 173, 107392. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107392

15. Fleury, R. (2011). Evaluation of Thermal Radiation Models for Fire Spread Between Objects. *Proceedings, Fire and Evacuation Modeling Technical Conference*. doi: 10.26021/1472

16. Sasaki, K. (2024). View factor of a spheroid and an ellipse from a plate element. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 326, 109102. doi: 10.1016/j.jqsrt.2024.109102

17. Pritchard, M. J., Binding, T. M. (1992). FIRE2: A New Approach for Predicting Thermal Radiation Levels from Hydrocarbon Pool Fires. *ICHEME Symposium*, 130, 491–505.

Надійшла до редколегії: 20.02.2025

Прийнята до друку: 15.04.2025