

УДК 614.84

В. В. Олійник, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-5193-1775)
О. Є. Басманов, д.т.н., професор, голов. н.с. відділу (ORCID 0000-0002-6434-6575)
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

МОДЕЛЬ ВИПРОМІНЮЮЧОЇ ПОВЕРХНІ ПОЛУМ'Я НАД РОЗЛИВОМ ГОРЮЧОЇ РІДИНИ В УМОВАХ ВІТРУ

Об'єктом дослідження є процес горіння рідини в розливі, а предметом дослідження – геометричні характеристики полум'я, зокрема, його довжина і кут нахилу. Визначено геометрію випромінюючої поверхні полум'я над розливом горючої рідини за умови довільної форми розливу і з урахуванням вітрового впливу на форму полум'я. Побудовано модель випромінюючої поверхні полум'я над розливом рідини довільної форми, що горить. Суть підходу полягає в тому, що довжина полум'я у заданій точці дорівнює довжині полум'я у точці кругового розливу, розташованій на тій самій відстані від межі розливу. Це дозволяє узагальнити відомі вигорання рідини. Для врахування впливу вітру на форму факела використовується емпіричні залежності на випадок розливу довільної форми. При цьому довжина полум'я є степеневою функцією відносно відстані до межі розливу і питомої масової швидкості емпірична залежність довжини і кута нахилу полум'я від швидкості вітру. Припускається, що вітер деформує полум'я таким чином, що всі точки поверхні полум'я відхиляються на однаковий кут від вертикалі. Чим меншими є розміри розливу та питома масова швидкість вигорання рідини, тим сильніше вітер відхиляє полум'я від вертикальної осі. Це пов'язано із формуванням більш потужних висхідних потоків над осередком горіння при збільшенні його розмірів і інтенсивності вигорання рідини. Побудовано модель випромінюючої поверхні факела в параметричній формі. Отримані з моделі результати добре узгоджуються з експериментальними. Відносна похибка для кута відхилення полум'я вітром від вертикальної осі не перевищує 9 %. На практиці це відкриває можливості для розрахунку теплового впливу на сусідні технологічні об'єкти, а також визначення безпечних зон для розташування особового складу та техніки, задіяних у ліквідації пожежі. Модель може бути використана для уточнення теплового впливу пожежі на сталеві і бетонні конструкції.

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

1. Вступ

Підприємства хімічної промисловості мають тенденцію до укрупнення, що ще більше підвищує концентрацію небезпечних хімічних речовин на відносно невеликій площі. Незважаючи на заходи безпеки, що вживаються у виробництві, зберіганні та транспортуванні, великі аварії все одно трапляються. Однією з важливих причин великих аварій є «ефект доміно» [1]. Згідно зі статистичними даними [2], де були досліджено аварії за понад 50 років, «ефект доміно» найчастіше траплявся із скрапленим газом, нафтою і нафтопродуктами. Аварії відбувалися на технологічних установках (38,5 %), складах (33 %), при транспортуванні (10,6 %). Пожежі горючих рідин є одним із домінуючих сценаріїв розвитку (42 %) при аваріях на промисловості. Крім того, серед надзвичайних ситуацій, пов'язаних з пожежами, близько 60 % займають пожежі горючих рідин [3]. Особливу небезпеку являє тепловий потік на сусідні технологічні об'єкти. Нагрів сталевих конструкцій резервуарів до температури самоспалахування горючої рідини, що в них зберігається, здатен призвести до вибуху парів рідини в газовому просторі резервуара або до горіння парів на виході з дихальних пристроїв. Перший випадок має місце, якщо концентрація парів в газовому просторі резервуара знаходиться між нижньою і верхньою концентраційними межами розповсюдження полум'я. Другий випадок – якщо концентрація парів в газовому просторі резервуара перевищує верхню концентраційну межу роз-

повсюдження полум'я. Такий ланцюжок подій здатен призвести до каскадного розповсюдження пожежі на підприємствах хімічної та переробної промисловості [4]. В [5] відзначається, що 44 % аварій, для яких мав місце «ефект доміно», починалися з пожежі рідини. Такі пожежі можуть відбуватися як в резервуарах, так і на поверхні землі внаслідок розливу рідини. При цьому значна кількість аварій починається саме з розливу рідини [6]. Вплив пожежі рідини на обладнання та персонал, що знаходиться поблизу, залежить від низки факторів, зокрема, властивостей рідини, що горить, розмірів дзеркала рідини, відстані до сусідніх об'єктів тощо. Для планування заходів, які б дозволили локалізувати аварію і запобігти її каскадному розповсюдженню, необхідно оцінити час, протягом якого температура сусідніх з пожежею об'єктів може досягти небезпечних значень.

Отже, проблемою є каскадне розповсюдження пожежі, викликане її тепловим впливом на сусідні технологічні об'єкти.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В [7] наведено огляд масштабних аварій, пов'язаних з розливом горючих рідин. Розглянуто емпіричні і напівемпіричні моделі розтікання рідини на воді і на твердій поверхні. Але моделі горіння рідини і тепловий вплив пожежі на сусідні об'єкти залишено поза увагою.

В [8] розглянуто залежність висоти полум'я в циліндричному резервуарі від його діаметру та висоти стінок над рівнем нафтопродукту. Досліджено з'єднання полум'я при горінні в двох сусідніх резервуарах. При цьому горіння розливу горючої рідини залишено поза увагою. В [9] досліджується взаємодія «полум'я-полум'я» для двох прямокутних осередків горіння. Отримано емпіричні залежності для висоти об'єднаного полум'я, але форма факела і вплив вітру на нього не розглянуто.

В [10] експериментально досліджено геометрію полум'я лінійного осередку горіння та променевого теплового потоку від нього на похилу поверхню. Але інші форми осередку горіння і вплив вітру на процес горіння залишаються нерозглянутими. В [11] наведено огляд моделей, що описують горіння нафтопродуктів у резервуарах зі стінками певної висоти над поверхнею рідини. Розглянуто граничні умови, які суттєво впливають на процес теплообміну та швидкість горіння, наприклад, розміри басейна, швидкість вітру тощо. Але горіння рідини в розливі довільної форми залишається не дослідженим. В [12] наведено огляд досліджень стосовно горіння нафтопродуктів в басейнах. Розглянуто пульсації полум'я, питому масову швидкість вигорання, висоту полум'я, теплопередачу випромінюванням. Але суттєвим обмеженням цих досліджень є умова відсутності вітру.

В [13] досліджується вплив вітру на питому масову швидкість вигорання на відкритому просторі і в тунелях. Відзначено, що залежність питомої масової швидкості вигорання від діаметра осередку горіння і швидкості вітру носить складний характер. Наприклад, можливі ситуації, коли збільшення швидкості вітру призводить до зменшення питомої масової швидкості вигорання. Але вплив вітру на висоту і кут нахилу полум'я в роботі не розглядаються. В [14] за допомогою FDS (Fire Dynamics Simulator) моделювався вплив швидкості вітру на питому масову швидкість вигорання гептану. Показано, що при невеликих розмірах осередку горіння (менше 1 м) наявність вітру збільшує питому масову швидкість вигорання в кілька разів. При збільшенні розмірів осередку горіння вплив швидкості

ті вітру зменшується, і при розмірах осередку горіння більше 1,5 м питома масова швидкість вигорання гептану збільшується не більше ніж на 30 %. Але вплив швидкості вітру на геометрію полум'я не досліджено. В [15] на основі експериментальних досліджень побудовано кореляційну залежність швидкості вигорання палива від діаметру басейну, теплота кипіння рідини, ступеня чорноти полум'я. Втім, геометричну форму факела в роботі не розглянуто.

В [16] проаналізовано низку досліджень, в яких було отримано залежність довжини полум'я від діаметра осередку горіння у вигляді:

$$L = aD \left(\frac{\eta}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^n, \quad (1)$$

де L – довжина факела; D – діаметр осередку горіння; η – питома масова швидкість вигорання; ρ_a – густина повітря; g – прискорення вільного падіння; $a > 0$, $n > 0$ – сталі, які залежать від особливостей проведення експерименту. Формула (1) може бути застосована до розливів рідини, що мають форму наближену до кола, але у випадку, коли форма розливу суттєво відрізняється від кола, використання (1) є ускладненим.

В [17] побудовано модель горіння і гасіння рідини, що розтікається на горизонтальній поверхні і має форму кола. Але така ситуація є ідеалізованою: навіть незначний нахил поверхні призводить до витягування області розливу вздовж напрямку нахилу [18]. В [18] також враховано просочення рідини вглиб ґрунту, а в [19] наведено процедуру експериментального визначення параметрів просочення. Але параметри полум'я над рідиною, що горить і розтікається не розглянуто. В [20] побудовано модель конвекційної складової теплового потоку від пожежі розливу довільної форми, але променева складова теплового потоку, яка є переважаючою, в роботі не розглянута.

В [21] розглянуто тепловий вплив пожежі на сталеві конструкції, але поза увагою залишено параметри осередку горіння та динаміку їх зміни. В [22] побудовано модель теплового впливу пожежі розливу горючої рідини на сусідній резервуар з нафтопродуктом. Модель враховує теплопередачу випромінюванням та конвекцією. При цьому для визначення теплового потоку шляхом випромінювання критично важливою є інформація про форму і висоту полум'я над розливом. Те саме стосується і [23], де розглянуто охолодження водними струменями резервуара, що нагрівається під тепловим впливом пожежі, але і тут випромінююча поверхня полум'я припускається заданою априорі.

Таким чином, розрахунок теплового потоку від пожежі розливу горючої рідини потребує визначення геометричної форми факела. При цьому форма факела залежить від форми розливу, типу рідини, напряму і швидкості вітру. Все це дає підстави стверджувати, що невирішеною частиною проблеми є створення моделі випромінюючої поверхні факела над розливом горючої рідини довільної форми.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є визначення геометрії випромінюючої поверхні полум'я над розливом горючої рідини за умови довільної форми розливу і з урахуванням вітрового впливу на форму полум'я. На практиці це відкриває можливості для розрахунку теплового впливу на сусідні технологічні об'єкти, а також визначення

безпечних зон для розташування особового складу та техніки, задіяних у ліквідації пожежі.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

- побудувати модель випромінюючої поверхні факела над розливом рідини довільної форми за умови відсутності вітру;
- побудувати модель впливу вітру на форму полум'я;
- побудувати модель випромінюючої поверхні факела в параметричній формі.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес горіння рідини в розливі, а предметом дослідження – геометричні характеристики полум'я, зокрема, його довжина і кут нахилу. Основна гіпотеза дослідження – довжина полум'я над розливом горючої рідини визначається її питомою масовою швидкістю вигорання, формою і площею розливу та швидкістю вітру.

Основними припущеннями є:

- довжина полум'я над певною точкою розливу довільної форми дорівнює довжині полум'я над точкою кругового розливу, яка лежить на тій самій відстані від межі розливу;
- кут нахилу полум'я під впливом вітру над розливом довільної форми дорівнює куту нахилу полум'я над круговим розливом з тією самою площею.

Визначення геометричних параметрів випромінюючої поверхні полум'я спирається на емпіричні формули, що описують залежність довжини та кута нахилу полум'я від питомої масової швидкості вигорання, швидкості вітру і діаметра розливу за умови, що розлив має форму кола. Для побудови моделі випромінюючої поверхні полум'я в параметричній формі використовуються методи диференціальної геометрії. Для проведення розрахунків використовувалося середовище Delphi (Community Edition). Моделювання проводилося на прикладі сирої нафти, бензину, мазуту, трансформаторного масла, що розтікаються на поверхні ґрунту (гідравлічна провідність ґрунту $K=1,68 \cdot 10^{-7}$ м/с; показник капілярності $h_f=0,95$ м; пористість $\phi=0,31$).

5. Результати моделювання випромінюючої поверхні полум'я над розливом горючої рідини

5.1. Побудова моделі випромінюючої поверхні факела за умови відсутності вітру

Аналіз виразу (1) свідчить, що довжина факела збільшується із зростанням величини питомої масової швидкості вигорання і діаметра розливу. Формула (1) має місце для розливів у формі кола або близьких до неї. Якщо ж форма розливу істотно відрізняється від кола (наприклад, має витягнуту форму, як при розтіканні на похилій поверхні), то формула (1) не може бути застосована.

Розглядаючи довільну форму розливу будемо вважати, що довжина полум'я у довільній точці (x, y) розливу описується виразом:

$$L(x, y) = 2br(x, y) \left(\frac{\eta}{\rho_a \sqrt{2gr(x, y)}} \right)^n, \quad (2)$$

де $r(x, y)$ – відстань від точки (x, y) до межі області розливу Ω (рис. 1).

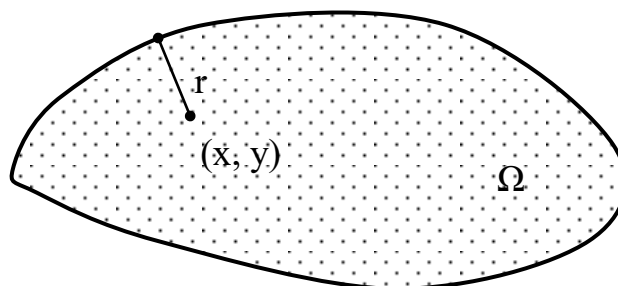


Рис. 1. До визначення довжини полум'я у точці (x, y) розливу як функції відстані до межі розливу

Виносячи $r(x, y)$ і скорочуючи, отримаємо:

$$L(x, y) = 2b \left(\frac{1}{\rho_a \sqrt{2g}} \right)^n r^{1-n/2}(x, y) \eta^n.$$

Підставляючи в останній вираз значення для густини повітря $\rho_a = 1,29 \text{ кг/м}^3$, прискорення вільного падіння $g = 9,8 \text{ м}^2/\text{с}$, отримаємо формулу для довжини полум'я у довільній точці (x, y) розливу:

$$L(x, y) = b 0,175^n r^{1-n/2}(x, y) \eta^n. \quad (3)$$

Для того частинного випадку, коли розлив має форму кола, вертикальний переріз полум'я, що проходить через діаметр розливу, буде мати вигляд, як на рис. 2, де $b = 55$; $n = 0,67$ [24].

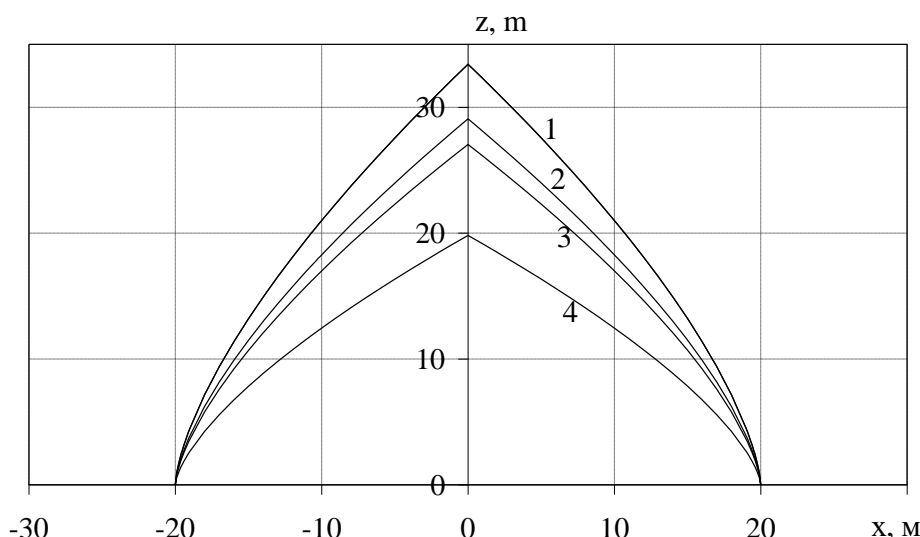


Рис. 2. Вертикальний переріз факела, що проходить через діаметр, над розливом у формі кола: 1 – бензин, $\eta = 0,048 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 2 – трансформаторне масло, $\eta = 0,039 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 3 – ма- зут, $\eta = 0,035 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 4 – нафта, $\eta = 0,022 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

Форма факела над круговим розливом близька до конічної, а довжина полум'я зменшується із зменшенням питомої масової швидкості вигорання.

5.2. Побудова моделі впливу вітру на форму полум'я

Наявність вітру призводить до нахилу факела. Залежність довжини факела L і

кута нахилу α (відхилення від вертикальної осі) від швидкості вітру має вигляд [24]:

$$L = bD \left(\frac{\eta}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^n (w^*)^{-0,21}; \quad (4)$$

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

де w^* – безрозмірна швидкість вітру:

$$w^* = \max \left\{ 1, w \left(\frac{g\eta D}{\rho_a} \right)^{-1/3} \right\}. \quad (6)$$

На рис. 3 проілюстровано залежність безрозмірної швидкості вітру w^* від діаметра розливу D для різних типів горючих рідин (бензин, $\eta=0,048$ кг/(м²·с); мазут, $\eta=0,035$ кг/(м²·с); нафта, $\eta=0,022$ кг/(м²·с)) і різних значень швидкості вітру w .

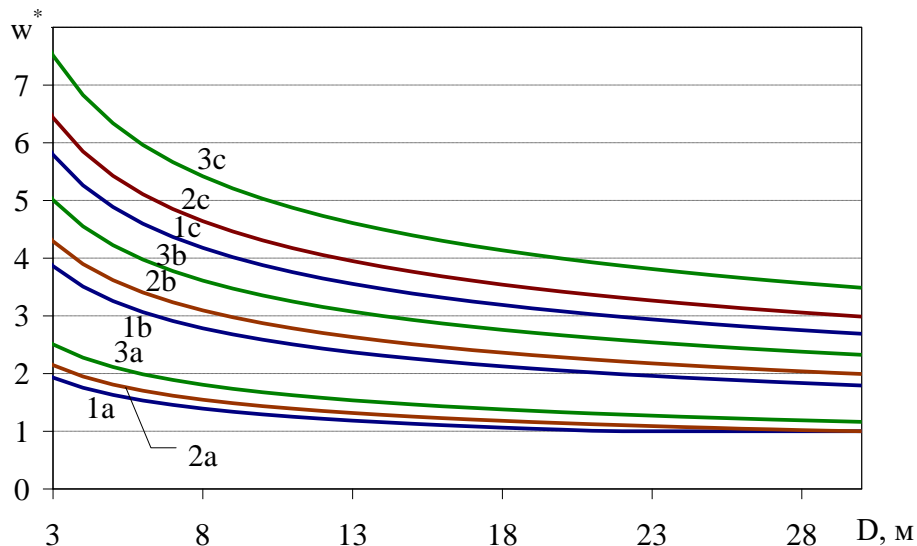


Рис. 3. Залежність безрозмірної швидкості вітру від діаметра розливу: 1 – бензин; 2 – мазут; 3 – нафта; а – $w=2$ м/с; б – $w=4$ м/с; с – $w=6$ м/с

Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 3 свідчить, що безрозмірна швидкість вітру зменшується із збільшенням діаметру розливу і інтенсивності вигорання рідини. Безрозмірна швидкість вітру монотонно спадає із ростом добутку цих параметрів, прямуючи до свого мінімально можливого значення $w^*_{\min}=1$. Це значення досягається при:

$$\eta D \geq \frac{\rho_a w^3}{g}.$$

На рис. 4 проілюстровано вплив діаметра розливу, типу рідини і швидкості вітру на кут нахилу полум'я.

На рис. 5 показано залежність відносної довжини факела від діаметра розливу, типу рідини і швидкості вітру. Відносною довжина – відношення довжини фа-

кела L при даному значенні швидкості вітру до довжини факела L_0 при тих самих умовах, але без вітру: L/L_0 .

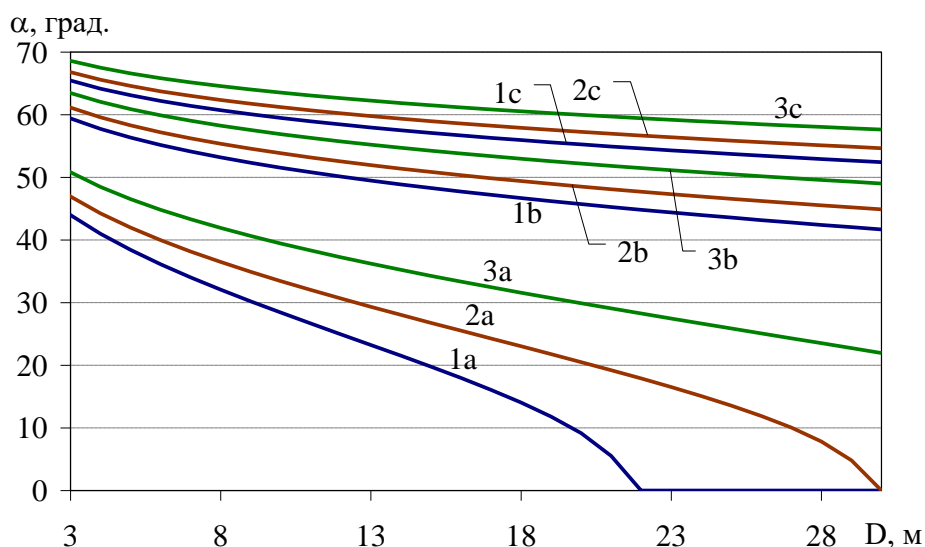


Рис. 4. Залежність кута нахилу від діаметра розливу: 1 – бензин; 2 – мазут; 3 – нафта; а – $w=2$ м/с; б – $w=4$ м/с; с – $w=6$ м/с

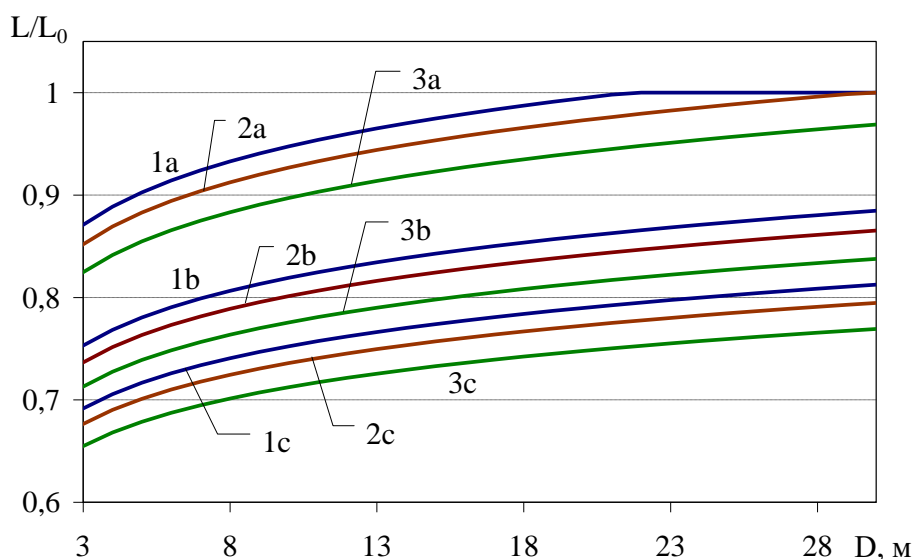


Рис. 5. Залежність відносної довжини факела від діаметра розливу: 1 – бензин; 2 – мазут; 3 – нафта; а – $w=2$ м/с; б – $w=4$ м/с; с – $w=6$ м/с

Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 4, 5 свідчить про зменшення впливу швидкості вітру на геометричні параметри факела (довжину полум'я і кут його нахилу) із збільшенням діаметру розливу і питомої масової швидкості вигорання.

Для розливу довільної форми будемо вважати, що мають місце залежності (4)–(6), де ефективний діаметр розливу D обчислюється за допомогою:

$$D = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}},$$

де S – площа розливу.

Тоді вираз (3) для довжини полум'я в довільній точці (x, y) розливу трансформується у:

$$L(x, y) = b_0,175^n r^{1-n/2} (x, y) \eta^n (w^*)^{-0,21}, \quad (7)$$

де безрозмірна швидкість вітру обчислюється за формулою:

$$w^* = \max \left\{ 1, w \left(\frac{2g\eta\sqrt{S}}{\rho_a \sqrt{\pi}} \right)^{-1/3} \right\} \approx \max \left\{ 1, w (8,57\eta\sqrt{S})^{-1/3} \right\} \quad (8)$$

де проведено підстановку значень для прискорення вільного падіння і густини повітря. Із формули (8) випливає, що вітер буде відхиляти полум'я від вертикалі, якщо для його швидкості виконано нерівність:

$$w > (8,57\eta\sqrt{S})^{1/3}. \quad (9)$$

Підстановка значень $b=55$; $n=0,67$ [24] в (7) дає:

$$L(x, y) = 17r^{0,67} (x, y) \eta^{0,67} (w^*)^{-0,21}. \quad (10)$$

Отже, залежність (10) описує довжину факела над розливом у довільній точці (x, y) в умовах вітру.

5.3. Побудова моделі випромінюючої поверхні факела в параметричній формі

За умови відсутності вітру довжина полум'я над точкою (u, v) розливу Ω визначається формулою (3). Тоді точці (u, v) на поверхні розливу відповідає точка (x, y, z) на випромінюючій поверхні полум'я:

$$\begin{cases} x = u, \\ y = v, \\ z = z_0, \end{cases}$$

де z_0 – довжина полум'я над точкою (u, v) . Скорочення довжини полум'я і його нахил вітром (формули (4), (5) відповідно) призводить до того, що точці (u, v) на поверхні розливу відповідає точка (x, y, z) :

$$\begin{cases} x = u + z_0 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi, \\ y = v + z_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi, \\ z = z_0 \cdot \cos \alpha, \end{cases} \quad (11)$$

де φ – кут напрямку вітру.

Об'єднуючи (5), (11), отримаємо:

$$\begin{cases} x = u + L(u, v)\sqrt{1 - (w^*)^{-1}} \cdot \cos \varphi, \\ y = v + L(u, v)\sqrt{1 - (w^*)^{-1}} \cdot \sin \varphi, \\ z = L(u, v) \cdot (w^*)^{-0,5}, \end{cases}$$

що після підстановки (10) дає:

$$\begin{cases} x = u + a_1 r^{0,67}(u, v)\sqrt{1 - (w^*)^{-1}} \cdot \cos \varphi, \\ y = v + a_1 r^{0,67}(u, v)\sqrt{1 - (w^*)^{-1}} \cdot \sin \varphi, \\ z = a_1 r^{0,67}(u, v)(w^*)^{-0,5}, \end{cases} \quad (12)$$

де

$$a_1 = 17\eta^{0,67}(w^*)^{-0,21}.$$

Відзначимо, що одиничний нормальний вектор до поверхні факела у точці $(x, y, z) \in S$, де S – поверхня факела, буде мати 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

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

На рис. 6 зображена поверхня факела у випадку горіння розливу нафти (кінематична в'язкість $\nu=40$ мм²/с; густина $\rho=850$ кг/м³; питома масова швидкість вигорання $\eta=0,034$ кг/(м²·с)) за умови відсутності вітру.

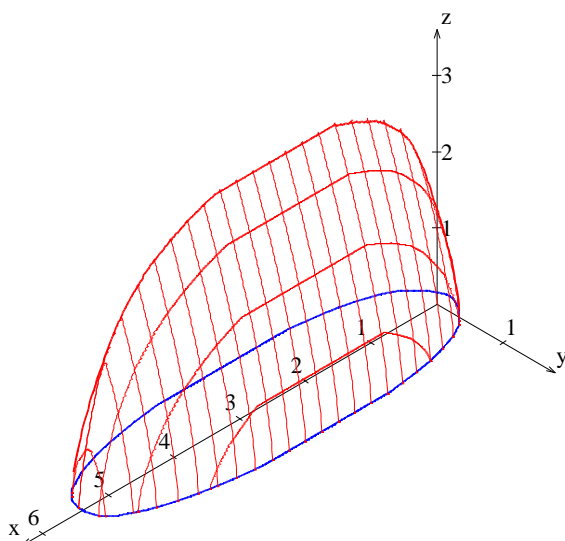


Рис. 6. Поверхня факела над розливом нафти за умови відсутності вітру

При цьому форма розливу відповідає випадку витікання з інтенсивністю 2 л/с на поверхні з кутом нахилу 3° в напрямку осі X через 100 с після початку витікання. Середню глибину нерівностей поверхні прийнято 1,7 см; гідравлічна провідність ґрунту $K=1,68 \cdot 10^{-7}$ м/с; показник капілярності $h_f=0,95$ м; пористість ґрунту $\phi=0,31$. Площа розливу складає $S=7,6$ м² [18].

Із нерівності (9) випливає, що вітер буде відхиляти полум'я від вертикальної осі, якщо $w>0,93$ м/с. На рис. 7 для тих самих умов, що і на рис. 6, показано нахил факела під впливом вітру швидкістю $w=1,5$ м/с та напрямом, що збігається з напрямом осі X. При цьому кут відхилення полум'я від вертикальної осі склав 38° .

На рис. 8 проілюстровано зміну кута нахилу полум'я при збільшенні площі розливу при розтіканні нафти на горизонтальній поверхні.

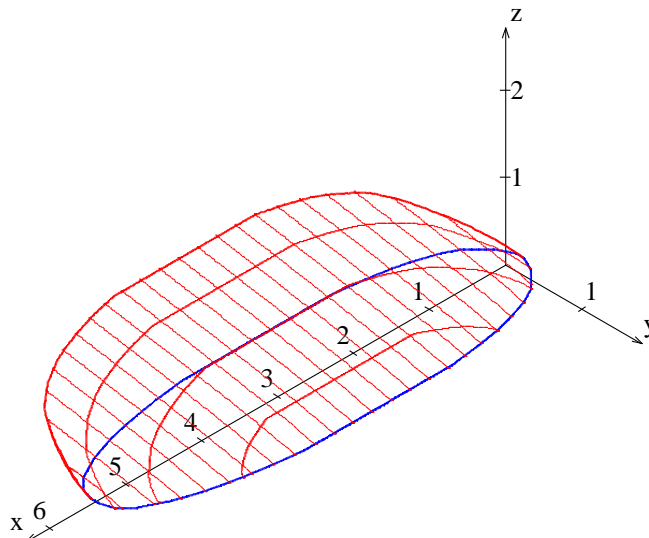


Рис. 7. Поверхня факела над розливом нафти при швидкості вітру $w=1,5$ м/с, направленою вздовж осі X

Із збільшенням площі розливу кут нахилу полум'я дещо зменшується: з $46,6^\circ$ (рис. 8, а) до $41,1^\circ$ (рис. 8, г).

6. Обговорення результатів моделювання випромінюючої поверхні полум'я над розливом горючої рідини

Запропонований підхід до визначення довжини полум'я у певній точці розливу рідини, що горить, спирається на емпіричну залежність, яка притаманна широкому класу твердих і рідких речовин, і в загальному випадку описується формулою (1). Суть підходу полягає в тому, що довжина полум'я у заданій точці дорівнює довжині полум'я у точці кругового розливу, розташованій на тій самій відстані від межі розливу. Це дозволяє узагальнити (1) на випадок розливу довільної форми і отримати залежність (2). Її спрощення шляхом підстановки в нього значень для густини повітря і прискорення вільного падіння призводить до виразу (3). Із його аналізу випливає, що довжина полум'я має степеневу залежність від відстані до межі розливу і від питомої масової швидкості вигорання речовини. Зокрема, для горючих рідин показник степені для цих параметрів дорівнює 0,67 [24]. Отже, збільшення питомої масової швидкості вигорання призводить до збільшення довжини полум'я. Так, для бензину ($\eta=0,048$ кг/(м²·с)) довжина полум'я майже в 1,7 рази перевищує довжину полум'я для нафти ($\eta=0,022$ кг/(м²·с)) – рис. 2.

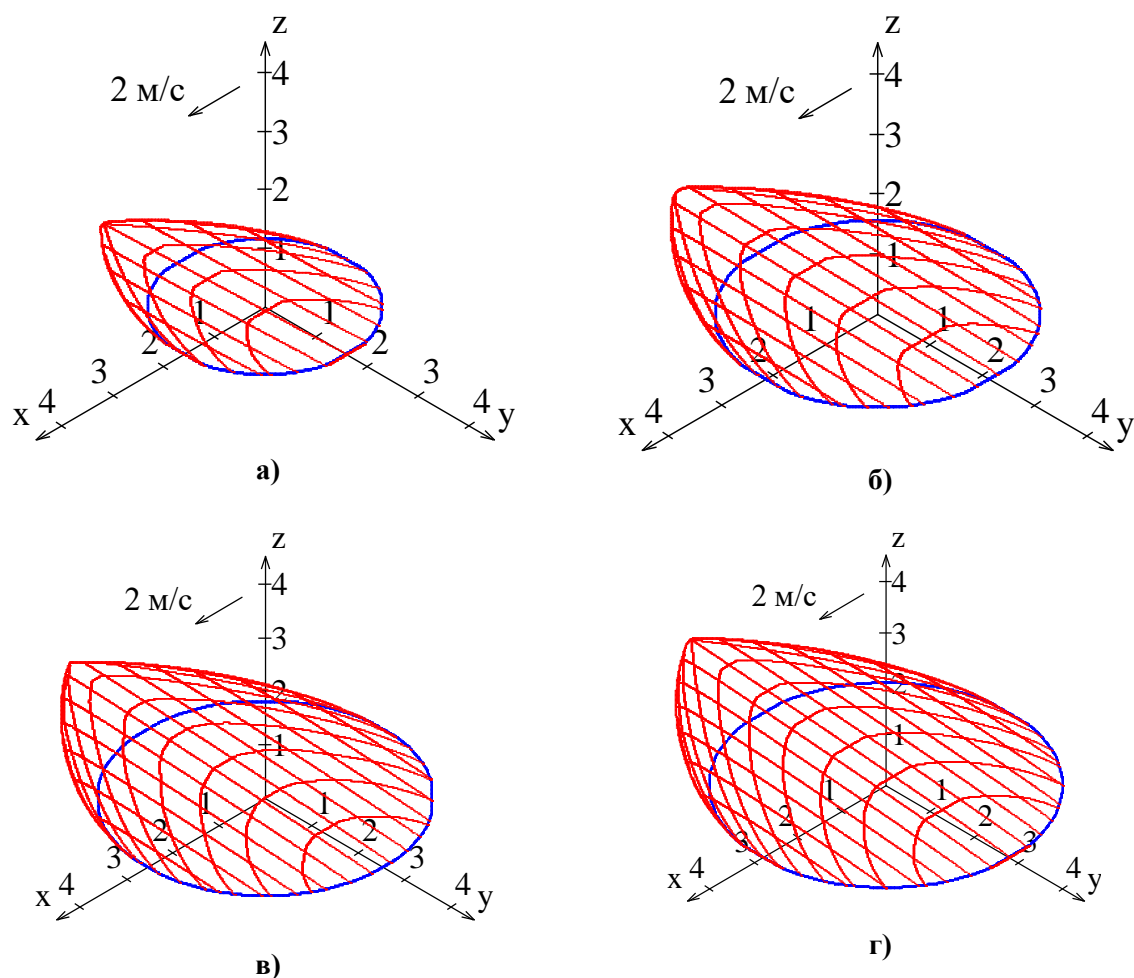


Рис. 8. Вплив вітру на форму полум'я над розливом нафти: а – $t=2$ хв; $S=8,3$ м²; б – $t=4$ хв; $S=15,1$ м²; в – $t=6$ хв; $S=20,6$ м²; г – $t=8$ хв; $S=25,1$ м²

Під впливом вітру полум'я відхиляється від вертикальної осі, а його довжина скорочується. Припускається, що вітер деформує полум'я таким чином, що всі точки поверхні полум'я відхиляються на однаковий кут від вертикалі. Довжина полум'я і кут його нахилу описуються формулами (4) і (5) відповідно. Їх особливістю є залежність від такого параметра як безрозмірна швидкість вітру w^* – формула (6). Це призводить до того, що існує деяке значення швидкості вітру, починаючи з якого полум'я над розливом рідини, що горить, змінює свою форму. Отже, для того, щоб вітер впливав на форму полум'я, необхідно, щоб його швидкість задовольняла умові (9). Із її аналізу випливає, що чим меншими є розміри розливу і питома масова швидкість вигорання рідини, тим сильніше вітер відхиляє полум'я від вертикальної осі. Це пов'язано із формуванням більш потужних висхідних потоків над осередком горіння при збільшенні його розмірів і інтенсивності вигорання рідини. Наприклад, при швидкості вітру $w=2$ м/с він не впливає на форму полум'я над розливом бензину, діаметр якого $D>22$ м. Для мазуту ця нерівність має вигляд: $D>30$ м (рис. 4, 5).

Розтікання рідини на поверхні землі супроводжується огинанням перешкод і переважним розповсюдженням в напрямку нахилу поверхні [18]. Внаслідок цього, форма розливу відрізняється від кругової. В такому випадку пропонується для розрахунку безрозмірної швидкості вітру w^* в якості характеристики розливу використовувати його площу S замість діаметра D – формула (8). Тоді залежність

для довжини факела в певній точці розливу в умовах вітру набуває вигляду (10).

Параметричний опис поверхні полум'я над розливом рідини в умовах вітру дається формулою (11), що після підстановки в них (10) дає опис поверхні полум'я у вигляді (12). Використання опису поверхні полум'я в параметричній формі дозволяє визначити значення нормального вектору до поверхні – формули (13), (14). Це є необхідною умовою для розрахунку теплового потоку випромінюванням від пожежі.

На рис. 6, 7 проілюстровано вплив швидкості вітру на форму полум'я над одним і тим самим розливом горючої рідини. На рис. 8 показано вплив площі розливу на форму полум'я. Зокрема, кут нахилу полум'я лежить в межах від $41,1^\circ$ (рис. 8, г) до $46,6^\circ$ (рис. 8, а). Це відповідає результатам експериментальних досліджень, наведених в [25], де пропонується при швидкості вітру $w=2$ м/с приймати кут нахилу осі факела рівним 45° . При цьому відносна похибка не перевищує 9 %.

Особливістю побудованої моделі випромінюючої поверхні полум'я над розливом горючої рідини є можливість її використання для розливу довільної форми, а не лише кругової. На відміну від [25] запропонована модель враховує інтенсивність вигорання рідини, а не використовує спрощену класифікацію горюча рідина/легкозаймиста рідина.

Перевагою моделі є те, що вона спирається на низку експериментальних досліджень залежності довжини факела від розмірів осередку горіння, а також впливу вітру на кут відхилення полум'я від вертикальної осі.

До обмежень моделі слід віднести неможливість її застосування за межами експериментальних даних, що лежать від її основи.

Недоліком побудованої моделі є те, що вона виходить із сталої форми полум'я і не враховує його турбулентного характеру. Це призводить до похибки в оцінці величини теплового потоку випромінюванням від пожежі. Таким чином, перспективи подальших досліджень пов'язані із врахуванням випадкових пульсацій полум'я.

Запропонована модель може бути використана для уточнення теплового впливу пожежі на сталеві і бетонні конструкції [26]. Результати також можуть бути використані при проектуванні пожежних сповіщувачів [27].

7. Висновки

1. Побудовано модель випромінюючої поверхні факела над розливом рідини довільної форми за умови відсутності вітру. Модель спирається на припущення про те, що довжина полум'я над певною точкою розливу дорівнює довжині полум'я над точкою кругового розливу, що лежить на тій самій відстані від межі розливу. Запропонований підхід дозволяє розширити існуючий клас емпіричних моделей, заснованих на експериментах з осередками горіння, що мають кругову або близьку до кругової форму, на розливи довільної форми. Довжина полум'я пропорційна питомій масовій швидкості вигорання у степені 0,67. Внаслідок цього рідини з більшим значенням цього параметра мають більшу довжину полум'я. Зокрема, довжина полум'я над розливом бензину майже в 1,7 рази перевищує довжину полум'я над таким самим розливом нафти.

2. Побудовано модель впливу вітру на форму полум'я над розливом довільної форми. Модель базується на емпіричній залежності впливу швидкості вітру на довжину полум'я і кут його відхилення від вертикальної осі. Чим меншими є розміри розливу і питома масова швидкість вигорання рідини, тим більшим є кут ві-

дхилення полум'я і скорочення довжини полум'я. Це пов'язано із формуванням більш потужних висхідних потоків над осередком горіння при збільшенні його розмірів і інтенсивності вигорання рідини. При цьому існує мінімальне значення швидкості вітру, при якій вітер змінює форму полум'я. Зокрема, при швидкості вітру 2 м/с він не впливає на форму полум'я над розливом бензину, діаметр якого перевищує 22 м. Для мазуту ця величина складає 30 м.

3. Побудовано модель випромінюючої поверхні факела в параметричній формі в умовах вітру. Модель спирається на емпіричні залежності довжини полум'я і кута його нахилу від характеристик осередку горіння і швидкості вітру. Отримані з моделі результати добре узгоджуються з експериментальними. Відносна похибка для кута відхилення полум'я вітром від вертикальної осі не перевищує 9 %. З практичної точки зору, це дозволяє використовувати модель для розрахунку теплового потоку випромінюванням на сусідні об'єкти.

Література

1. Huang K., Chen G., Khan F., Yang Y. Dynamic analysis for fire-induced domino effects in chemical process industries. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 148. P. 686–697. doi: 10.1016/j.psep.2021.01.042
2. Hemmatian B., Abdolhamidzadeh B., Darbra R., Casal J. The significance of domino effect in chemical accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014. Vol. 29. P. 30–38. doi: 10.1016/j.jlp.2014.01.003
3. Fabiano B., Caviglione C., Reverberi A., Palazzi E. Multicomponent Hydrocarbon Pool Fire: Analytical Modelling and Field Application. *Chemical Engineering Transactions*. 2016. Vol. 48. P. 187–192. doi: 10.3303/CET1648032
4. Yang R., Khan F., Neto E., Rusli R., Ji J. Could pool fire alone cause a domino effect? *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 202. P. 106976. doi: 10.1016/j.ress.2020.106976
5. Reniers G., Cozzani V. Features of Escalation Scenarios. *Domino Effects in the Process Industries*. Elsevier. 2013. P. 30–42. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8
6. Raja S., Tauseef S., Abbasi T. Risk of Fuel Spills and the Transient Models of Spill Area Forecasting // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2018. Vol. 18. P. 445–455. doi: 10.1007/s11668-018-0429-1
7. Liu J., Li D., Wang Z., Chai X. A state-of-the-art research progress and prospect of liquid fuel spill fires. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 28. 101421. doi: 10.1016/j.csite.2021.101421
8. Zhang Zh., Zong R., Tao Ch., Ren J., Lu Sh. Experimental study on flame height of two oil tank fires under different lip heights and distances. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. Vol. 139. P. 182–190. doi: 10.1016/j.psep.2020.04.019
9. He P., Wang P., Wang K., Liu X., Wang C., Tao C., Liu Y. The evolution of flame height and air flow for double rectangular pool fires. *Fuel*. 2019. Vol. 237. P. 486–493. doi: 10.1016/j.fuel.2018.10.027
10. Miao Y., Chen Y., Tang F., Zhang X., Hu L. An experimental study on flame geometry and radiation flux of line-source fire over inclined surface. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2023. Vol. 39(3). P. 3795–3803. doi: 10.1016/j.proci.2022.07.109
11. Chen Y., Fang J., Zhang X., Miao Y., Lin Y., Tu R., Hu L. Pool fire dynamics: Principles, models and recent advances. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2023. Vol. 95. P. 101070. doi: 10.1016/j.pecs.2022.101070

12. Guo Y., Xiao G., Wang L., Chen C., Deng H., Mi H., Tu C., Li Y. Pool fire burning characteristics and risks under wind-free conditions: State-of-the-art. *Fire Safety Journal*. 2023. Vol. 136. P. 103755. doi: 10.1016/j.firesaf.2023.103755
13. Yao Y., Li Y. Z., Ingason H., Cheng X. Scale effect of mass loss rates for pool fires in an open environment and in tunnels with wind // *Fire Safety Journal*. 2019. Vol. 105. P. 41–50. doi: 10.1016/j.firesaf.2019.02.004
14. Yao Y., Li Y. Z., Ingason H., Cheng X., Zhang H. Theoretical and numerical study on influence of wind on mass loss rates of heptane pool fires at different scales. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 120. P. 103048. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103048
15. Ditch B. D., Ris J. L., Blanchat T. K., Chaos M., Bill R. G., Dorofeev S. B. Pool fires – An empirical correlation. *Combustion and Flame*. 2013. Vol. 160(12). P. 2964–2974. doi: 10.1016/j.combustflame.2013.06.020
16. Drysdale D. *An Introduction to Fire Dynamics*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Ltd., New York. 2011. doi: 10.1002/9781119975465
17. Abramov Y., Basmanov O., Krivtsova V., Salamov J. Modeling of spilling and extinguishing of burning fuel on horizontal surface. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2019. Vol. 4. P. 86–90. doi: 10.29202/nvngu/2019-4/16
18. Олійник В. В., Басманов О. Є. Модель розтікання і горіння рідини на ґрунті. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2023. Вип. 1(37). С. 18–30. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-2
19. Abramov Y., Basmanov O., Khmyrov I., Oliinik V. Justifying the experimental method for determining the parameters of liquid infiltration in bulk material. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 4/10(118). P. 24–29. doi: 10.15587/1729-4061.2022.262249
20. Abramov Y., Basmanov O., Oliinik V., Khmyrov I., Khmyrova A. Modeling the convective component of the heat flow from a spill fire at railway accident. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2022. Vol. 6. P. 128–138. doi: 10.21303/2461-4262.2022.002702
21. Kovalov A., Otrosh Y., Rybka E., Kovalevska T., Togobytska V., Rolin I. Treatment of Determination Method for Strength Characteristics of Reinforcing Steel by Using Thread Cutting Method after Temperature Influence. In *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd. 2020. Vol. 1006. P. 179–184. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.179
22. Abramov Y. A., Basmanov O. E., Mikhayluk A. A., Salamov J. Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. Vol. 2. P. 95–100. doi: 10.29202/nvngu/2018-2/12
23. Abramov Y., Basmanov O., Salamov J., Mikhayluk A., Yashchenko O. Developing a model of tank cooling by water jets from hydraulic monitors under conditions of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1/10(97). P. 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154669
24. Lees F. P. *Loss prevention in the process industries*. 4th Edition. 2012. Vol. 2. doi: 10.1016/C2009-0-24104-3
25. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою і нафтопродуктами. НАПБ 05.035–2004: Офіц. вид. – К.: М-во з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи, 2004. 79 с. (нормативний документ МНС України. Інструкція). URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/instrukciya_schodo_gasinnya_pozh_ezh_u_rezervuarakh_iz_naftoyu.pdf

26. Otrosh Yu., Semkiv O., Rybka E., Kovalov A. About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 708, 012065. doi: 10.1088/1757-899X/708/1/012065

27. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Skliarov S. Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 4(9). P. 53–59. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108448

*V. Oliinyk, PhD, Associated Professor, Head of Department
O. Basmanov, Dsc, Professor, Chief Researcher of the Department
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

DEVELOPING A MODEL OF THE RADIATING SURFACE OF A FLAME OVER A FLAMMABLE LIQUID SPILL IN THE PRESENCE OF WIND

The object of the study is a spill fire. The subject of the study is the geometric characteristics of the flame, in particular, the length and angle of inclination. The model of the radiating surface of a flame over a burning liquid spill of an arbitrary shape is constructed. The essence of the approach is that the length of the flame at a given point is equal to the length of the flame at the point of the circular spill located at the same distance from the boundary of the spill. It allows generalizing the known empirical dependences for the case of spills of arbitrary shape. The flame length is a power-law function of the distance to the spill boundary and the mass loss rate per unit area. To take into account the effect of wind on the shape of the flame, the empirical dependence of the length and angle of inclination of the flame on the wind speed is used. It is assumed that the wind deforms the flame in such a way that all points of the flame surface deviate by the same angle from the vertical. Wind inclines the flame from the vertical axis more significantly for the smaller size of the spill and smaller mass loss rate per unit area. This is due to the formation of more powerful upward currents over the combustion center when its size and intensity of liquid combustion increase. A model of the radiating surface of the flame was constructed in a parametric form. The results obtained from the model are in good agreement with the experimental ones. The relative error for the angle of deviation of the flame by the wind from the vertical axis does not exceed 9%. In practice, this opens up opportunities for calculating the thermal impact on nearby technological objects, as well as determining safe zones for the location of personnel and equipment involved in fire suppression. The model can be used to specify the thermal effect of fire on steel and concrete structures.

Keywords: flammable liquid spill, spill fire, radiating flame surface, heat flow

References

1. Huang, K., Chen, G., Khan, F., Yang, Y. (2021). Dynamic analysis for fire-induced domino effects in chemical process industries. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 686–697. doi: 10.1016/j.psep.2021.01.042
2. Hemmatian, B., Abdolhamidzadeh, B., Darbra, R., Casal, J. (2014). The significance of domino effect in chemical accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 29, 30–38. doi: 10.1016/j.jlp.2014.01.003
3. Fabiano, B., Caviglione, C., Reverberi, A. P., Palazzi, E. (2016). Multicomponent Hydrocarbon Pool Fire: Analytical Modelling and Field Application. *Chemical Engineering Transactions*, 48, 187–192. doi: 10.3303/CET1648032
4. Yang, R., Khan, F., Neto, E., Rusli, R., Ji, J. (2020). Could pool fire alone cause a domino effect? *Reliability Engineering & System Safety*, 202, 106976. doi: 10.1016/j.ress.2020.106976
5. Reniers G., Cozzani V. (2013). Features of Escalation Scenarios. *Domino Effects in the Process Industries*. Elsevier. 30–42. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8

6. Raja, S., Tauseef, S. M., Abbasi, T. (2018). Risk of Fuel Spills and the Transient Models of Spill Area Forecasting. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 18, 445–455. doi: 10.1007/s11668-018-0429-1
7. Liu, J., Li, D., Wang, Z., Chai, X. (2021). A state-of-the-art research progress and prospect of liquid fuel spill fires. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101421. doi: 10.1016/j.csite.2021.101421
8. Zhang, Zh., Zong, R., Tao, Ch., Ren, J., Lu, Sh. (2020). Experimental study on flame height of two oil tank fires under different lip heights and distances. *Process Safety and Environmental Protection*, 139, 182–190. doi: 10.1016/j.psep.2020.04.019
9. He, P., Wang, P., Wang, K., Liu, X., Wang, C., Tao, C., Liu, Y. (2019). The evolution of flame height and air flow for double rectangular pool fires, *Fuel*, 237, 486–493. doi: 10.1016/j.fuel.2018.10.027
10. Miao, Y., Chen, Y., Tang, F., Zhang, X., Hu, L. (2023). An experimental study on flame geometry and radiation flux of line-source fire over inclined surface. *Proceedings of the Combustion Institute*, 39(3), 3795–3803. doi: 10.1016/j.proci.2022.07.109
11. Chen, Y., Fang, J., Zhang, X., Miao, Y., Lin, Y., Tu, R., Hu, L. (2023). Pool fire dynamics: Principles, models and recent advances, *Progress in Energy and Combustion Science*, 95, 101070. doi: 10.1016/j.pecs.2022.101070
12. Guo, Y., Xiao, G., Wang, L., Chen, C., Deng, H., Mi, H., Tu, C., Li, Y. (2023). Pool fire burning characteristics and risks under wind-free conditions: State-of-the-art, *Fire Safety Journal*, 136, 103755. doi: 10.1016/j.firesaf.2023.103755
13. Yao, Y., Li, Y., Ingason, H., Cheng, X. (2019). Scale effect of mass loss rates for pool fires in an open environment and in tunnels with wind, *Fire Safety Journal*, 105, 41–50. doi: 10.1016/j.firesaf.2019.02.004
14. Yao, Y., Li, Y., Ingason, H., Cheng, X., Zhang, H. (2021). Theoretical and numerical study on influence of wind on mass loss rates of heptane pool fires at different scales, *Fire Safety Journal*, 120, 103048. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103048
15. Ditch, B. D., Ris, J. L., Blanchat, T. K., Chaos, M., Bill, R. G., Dorofeev, S. B. (2013). Pool fires – An empirical correlation, *Combustion and Flame*, 160 (12), 2964–2974. doi: 10.1016/j.combustflame.2013.06.020
16. Drysdale, D. *An Introduction to Fire Dynamics*. (2011). 3rd Edition, John Wiley & Sons, Ltd., New York. doi: 10.1002/9781119975465
17. Abramov, Y., Basmanov, O., Krivtsova, V., Salamov, J. (2019). Modeling of spilling and extinguishing of burning fuel on horizontal surface, *Naukovyi Visnyk NHU*, 4, 86–90. doi: 10.29202/nvngu/2019-4/16
18. Oliinik, V., Basmanov, O. (2023). Model of spreading and burning the liquid on the soil, *Problems of emergency situations*, 1(37), 18–30. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-2
19. Abramov, Y., Basmanov, O., Khmyrov, I., Oliinik, V. (2022). Justifying the experimental method for determining the parameters of liquid infiltration in bulk material, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/10(118), 24–29. doi: 10.15587/1729-4061.2022.262249
20. Abramov, Y., Basmanov, O., Oliinik, V., Khmyrov, I., Khmyrova, A. (2022). Modeling the convective component of the heat flow from a spill fire at railway accident. *EUREKA: Physics and Engineering*, 6, 128–138. doi: 10.21303/2461-4262.2022.002702
21. Kovalov, A., Otrosh, Y., Rybka, E., Kovalevska, T., Togobytska, V., Rolin, I.

(2020). Treatment of Determination Method for Strength Characteristics of Reinforcing Steel by Using Thread Cutting Method after Temperature Influence. In *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 1006, 179–184. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.179

22. Abramov, Y. A., Basmanov, O. E., Mikhayluk, A. A., Salamov, J. (2018). Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank. *Naukovyi Visnyk NHU*, 2, 95–100. doi: 10.29202/nvngu/2018-2/12

23. Abramov, Y., Basmanov, O., Salamov, J., Mikhayluk, A., Yashchenko, O. (2019). Developing a model of tank cooling by water jets from hydraulic monitors under conditions of fire, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/10(97), 14–20 doi: 10.15587/1729-4061.2019.154669

24. Lees, F. P. (2012). *Loss prevention in the process industries*, 4th Edition. doi: 10.1016/C2009-0-24104-3

25. Instructions for extinguishing fires in tanks with oil and oil products. Normative act on fire safety 05.035–2004, 79. Available at: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/instrukciya_schodo_gasinnya_pozhezh_u_rezervuarakh_iz_naftoyu.pdf

26. Otrosh, Yu., Semkiv, O., Rybka, E., Kovalov, A. (2019). About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 012065. doi: 10.1088/1757-899X/708/1/012065

27. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(9), 53–59. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108448

Надійшла до редколегії: 19.09.2023

Прийнята до друку: 10.11.2023