

## УДК 519.6

*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, Черкаси, Україна*

## МОДЕЛЬ ФОРМИ І РОЗМІРІВ РОЗЛИВУ ПРИ ВИТІКАННІ І ГОРІННІ РІДИНИ

Побудовано модель для визначення максимальної довжини і ширини розливу горючої рідини, що горить і стікає по похилій площині, за умови сталої швидкості її витікання. Модель спирається на диференціальне рівняння параболічного типу, що описує товщину шару рідини на поверхні ґрунту. Показано, що максимальні довжина та ширина розливу досягаються в усталеному режимі, який має місце внаслідок встановлення балансу між кількістю рідини, що поступає в розлив внаслідок витікання, і кількістю рідини, що витрачається внаслідок вигорання. Із збільшенням кута нахилу форма розливу стає все більш витягнутою вздовж напрямку нахилу поверхні. Такий саме ефект має зменшення лінійної швидкості вигорання або збільшення об'ємної швидкості витікання. Навпаки, зменшення кута нахилу поверхні і збільшення лінійної швидкості вигорання або зменшення об'ємної швидкості витікання призводить до того, що форма розливу наближається до кола. Показано, що для кутів нахилу поверхні не більше  $20^\circ$ , має місце подібність процесів розтікання рідини. Це означає, що збільшення об'ємної швидкості витікання еквівалентно лінійному перетворенню часової і просторових координат з одночасним зменшенням кута нахилу і лінійної швидкості вигорання. Побудовано алгоритм розрахунку максимальної довжини і максимальної ширини розливу для довільної горючої рідини при заданій об'ємній швидкості витікання на похилій поверхні, який спирається на подібність процесів розтікання рідини і використовує діаграми залежності максимальної довжини і ширини розливу від кута нахилу поверхні і лінійної швидкості вигорання для еталонної об'ємної швидкості витікання 10 л/с. Отримані результати можуть бути використані для визначення висоти полум'я і щільності теплового потоку від пожежі до сусідніх технологічних об'єктів.

**Ключові слова:** розлив горючої рідини, пожежа розливу, форма розливу, усталений режим

### 1. Вступ

Аварійні витіки нафти та нафтопродуктів, що трапляються під час їх переробки і транспортування, часто супроводжуються пожежами, особливістю яких є динамічна зміна їх площі [1]. Скупчення легкозаймистих і горючих рідин, що характерне для об'єктів переробки і зберігання нафтопродуктів, призводить до небезпеки виникнення «ефекту доміно», коли одна аварійна подія створює передумови для наступної. У випадку пожежі на переробних підприємствах або на об'єктах зберігання нафтопродуктів, «ефект доміно» виникає внаслідок теплового впливу пожежі на металічні конструкції сусідніх технологічних об'єктів. Їх нагрів до температури самоспалахування парів нафтопродукту може призвести до вибуху парів або їх займання. Ще однією небезпекою є розгерметизація фланцевих з'єднань і витікання горючої рідини в зону горіння або втрата міцності сталевими конструкціями [2]. В [3] проаналізовано 224 великих аварій і відзначено, що багатьом з них був притаманний «ефект доміно». В [4] показано, що пожежі спричиняють майже 43 % усіх «ефектів доміно», причому найбільш поширеним сценарієм є пожежа в резервуарі або розливу горючої рідини. Згідно з [5] близько 44 % масштабних пожеж, в яких спостерігався ефект «доміно», починалися саме з пожежі в резервуарі або з пожежі розливу.

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

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [6] проаналізовано аварії на залізничному транспорті в США і Канаді, які супроводжувалися розливом горючої рідини. Окремо виділено випадки, коли відбувалося займання розливу. На підставі історичних даних побудовано оцінки частоти майбутніх аварій, об'єму розливої рідини, ймовірності пожежі тощо. Недоліком такого підходу є те, що він не дає можливостей розрахувати параметри розливу в конкретному випадку. Аналогічний підхід застосовано в [7], де досліджуються виливи небезпечних рідин при аваріях на трубопроводах у США в 1986–2019 роках. Відзначається, що в середньому під час аварій щороку виливається близько 10 тис. тонн. Не всі аварії рівнозначні за наслідками, тому серед всіх аварій виділено найбільш істотні аварії. Наприклад, ліквідація розливу сирої нафти в Мічигані тривала чотири роки і коштувала 1,2 мільярда доларів. Саме прогнозуванню частоти таких аварій присвячено роботу. Запропонований підхід дозволяє прогнозувати загальну кількість аварій, але не дозволяє визначити наслідки аварій за конкретних обставин.

В [8] методами чисельного моделювання досліджується розтікання і горіння рідини в похилому тунелі за умови неперервного витоку. Зроблено висновок про збільшення ширини потоку із збільшенням інтенсивності витікання. Але вихід на усталений режим внаслідок вигорання рідини залишено поза увагою. В [9] розглянуто витікання легкозаймистої рідини із резервуара внаслідок пошкодження його стінки на певній висоті. Визначено горизонтальну протяжність струменя рідини, але геометрична форма і розміри розливу, що утворився га ґрунті, не досліджено.

В [10] експериментально досліджено розтікання і горіння горючої рідини на похилій поверхні. Показано, що час розтікання і площа розливу залежать від кута нахилу поверхні. Однак розтікання досліджувалося на скляній поверхні, яка виключає можливість впливу нерівностей, притаманних реальній поверхні. В [11] експериментально досліджується товщина шару горючої рідини і швидкість її вигорання при неперервному витіканні на горизонтальну та похилу поверхні. Але і в цій роботі форму і розміри розливу залишено поза увагою.

В [12] експериментально досліджено розтікання горючою рідини по горизонтальній піщаній поверхні. Об'ємна швидкість витікання складала  $(0,04 \div 0,4)$  л/хв. Зроблено висновок про уповільнення розповсюдження розливу, а також про зменшення його радіусу порівняно з випадком розтікання на гладкій поверхні. Недоліком таких досліджень є складність розповсюдження отриманих результатів на інші умови: швидкість витікання рідини, іншу поверхню. В [13] побудовано модель розтікання рідини на ґрунті. Модель являє собою систему двох рівнянь, перше з яких є диференціальним рівнянням параболічного типу, яке описує розтікання рідини по поверхні, а друге – звичайним диференціальним рівнянням, яке враховує витрати рідини внаслідок просочення вглиб ґрунту. Але питання про вихід процесу на усталений режим внаслідок вигорання рідини в роботі не розглянуто. В [14] на прикладі сирої нафти і піску експериментально визначаються параметри просочення рідини (коефіцієнт пористості ґрунту, показник капілярності), але і тут розміри розливу в усталеному режимі залишені поза увагою.

В [15] експериментально досліджується розтікання етанолу, гасу і бензину по похилим поверхням, покритим піском і розташованих під кутами  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ . Швидкість витікання знаходилася в діапазоні  $(200 \div 400)$  мл/хв. Але витрати рідини внаслідок її вигорання не розглядалися. В [16] за допомогою методів машинного навчання побудовано модель для визначення характеристик пожежі

розливу. Модель враховує кут нахилу поверхні, швидкість витіку рідини, тип поверхні і тип рідини. Але недоліком такого підходу є неможливість застосування отриманих результатів для умов, що відрізняються від навчальної вибірки.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового потоку на них є визначення форми і розмірів розливу.

### 3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є побудова моделі форми і розмірів розливу горючої рідини на похилій в умовах неперервного витікання рідини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- побудувати модель розтікання рідини на похилій поверхні;
- проаналізувати подібність процесів розтікання для різних значень параметрів;
- розробити алгоритм визначення максимальної довжини і ширини розливу.

### 4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес розтікання і горіння рідини на похилій поверхні при її аварійному виливі. Припускається, що витікання рідини відбувається неперервно зі сталою об'ємною швидкістю і сталою лінійною швидкістю вигорання. Для знаходження форми і розмірів розливу використано рівняння балансу маси рідини на поверхні ґрунту. При аналізі подібності процесів розливу при різних значеннях параметрів використано розв'язання в ряд Тейлора. Для чисельного розв'язання рівняння балансу використано метод скінчених різниць. Програмна реалізація методу виконувалася в середовищі програмування Delphi 11.

## 5. Моделювання форми і розмірів розливу при аварійному витіканні і горінні рідини

### 5.1. Модель розтікання рідини на похилій поверхні

В [18] побудовано модель розтікання рідини на ґрунті, яка враховує як приток рідини внаслідок її витікання, так і витрати на її просочення і вигорання. Наявність нахилу у поверхні, на якій відбувається розтікання рідини, призводить до того, що розлив має форму овалу, більша вісь якого співпадає з напрямом нахилу поверхні. При цьому довжина цієї осі буде тим більшою, чим більшим є кут нахилу поверхні.

Максимальна площа розливу  $S_{\max}$  визначається об'ємною швидкістю витікання рідини  $v$  і витратами на її вигорання і просочування:

$$v = S_{\max} (\eta_v + \eta_{\text{inf}}), \quad (1)$$

де  $\eta_{\text{inf}}$  – лінійна швидкість просочування, м/с,  $\eta_v$  – лінійна швидкість вигорання, м/с:

$$\eta_v = \frac{\eta}{\rho};$$

$\eta$  – питома масова швидкість вигорання рідини;  $\rho$  – густина рідини.

З точки зору пожежної небезпеки найгіршим є випадок, коли просочення рідини в ґрунт відсутнє ( $\eta_{\text{inf}} = 0$ ), оскільки в цьому випадку площа розливу досягає максимального значення. За цієї умови рівняння розтікання і горіння рідини [18] набуде вигляду:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = R \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \tilde{h}^3 \left( \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \tilde{h}^3 \left( \frac{\partial \tilde{h}}{\partial y} \right) \right] - \gamma \frac{\partial}{\partial x} \tilde{h}^3 \right] - \eta_v + v(t) \delta(x - x_0) \delta(y - y_0); \quad (2)$$

$$\tilde{h} = \begin{cases} h - h_{\text{дп}}, h - h_{\text{дп}} > 0; \\ 0, h - h_{\text{дп}} \leq 0; \end{cases} \quad (3)$$

де  $h(x,y)$  – висота рідини у точці  $(x,y)$ , обчислена вздовж нормалі до поверхні;  $\delta(x)$  –  $\delta$ -функція Дірака;  $\gamma = \text{tg}\theta$ ;  $\theta$  – кут нахилу поверхні;  $R$  – ефективний коефіцієнт дифузії:

$$R = \frac{g}{3\nu} \cos \theta; \quad (4)$$

$g$  – прискорення сили тяжіння;  $\nu$  – кінематична в'язкість рідини. При цьому розташування системи координат обрано таким чином, щоб напрямок нахилу поверхні співпадав з віссю  $OX$ ;  $h_{\text{дп}}$  – середня глибина нерівностей поверхні.

## 5.2. Подібність процесів розтікання для різних значень параметрів

Для випадку неперервного витікання зі сталою швидкістю  $v(t) = v_0 = \text{const}$ . Це дозволяє перейти до нових змінних  $x'$ ,  $y'$ ,  $t'$ :

$$x = \frac{x'}{\sqrt{v_0}}; \quad y = \frac{y'}{\sqrt{v_0}}; \quad t = \frac{t'}{v_0}. \quad (5)$$

Тоді рівняння (2) трансформується до вигляду

$$v_0 \frac{\partial h}{\partial t'} = v_0 R \left[ \frac{\partial}{\partial x'} \left[ \tilde{h}^3 \left( \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x'} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y'} \left[ \tilde{h}^3 \left( \frac{\partial \tilde{h}}{\partial y'} \right) \right] - \frac{\gamma}{\sqrt{v_0}} \frac{\partial}{\partial x'} \tilde{h}^3 \right] - \eta_v + v_0 \delta(x' - x_0 \sqrt{v_0}) \delta(y' - y_0 \sqrt{v_0}). \quad (6)$$

Розділивши на  $v_0$  ліву і праву частину рівняння, отримаємо

$$\frac{\partial h}{\partial t'} = R \left[ \frac{\partial}{\partial x'} \left[ \tilde{h}^3 \left( \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x'} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y'} \left[ \tilde{h}^3 \left( \frac{\partial \tilde{h}}{\partial y'} \right) \right] - \gamma' \frac{\partial}{\partial x'} \tilde{h}^3 \right] - \eta'_v 1_{\Omega_b}(t) + \delta(x' - x_0 \sqrt{v_0}) \delta(y' - y_0 \sqrt{v_0}), \quad (7)$$

де

$$\gamma' = \frac{\gamma}{\sqrt{v_0}} = \frac{\operatorname{tg}\theta}{\sqrt{v_0}}; \quad (8)$$

$$\eta'_v = \frac{\eta_v}{v_0}. \quad (9)$$

Аналіз рівняння (7) свідчить, що збільшення об'ємної швидкості витікання рідини в  $v_0$  разів ( $v_0 > 1$ ) еквівалентно лінійному перетворенню просторових і часової координат

$$x' = x\sqrt{v_0}; \quad y' = y\sqrt{v_0}; \quad t' = tv_0, \quad (10)$$

зменшенню кута нахилу поверхні у відповідності до (8) і зменшенню лінійної швидкості вигорання в  $v_0$  разів (9).

Відзначимо, що для малих кутів нахилу поверхні  $\theta$  мають місце співвідношення:

$$\operatorname{tg}\theta \approx \theta; \quad \cos\theta \approx 1. \quad (11)$$

Зокрема, для  $\theta = 10^\circ = 10\pi/180 \approx 0,175$

$$\operatorname{tg}\theta \approx 0,176; \quad \cos\theta \approx 0,985,$$

а для  $\theta = 20^\circ = 20\pi/180 \approx 0,35$

$$\operatorname{tg}\theta \approx 0,365; \quad \cos\theta \approx 0,94.$$

Отже для малих кутів нахилу поверхні ( $\theta \leq 20^\circ$ ) збільшення швидкості витікання рідини в  $v_0$  разів еквівалентно перетворенню координат (10), зменшенню кута нахилу поверхні в  $\sqrt{v_0}$  разів

$$\theta' = \frac{\theta}{\sqrt{v_0}}, \quad (12)$$

зменшенню лінійної швидкості вигорання в  $v_0$  разів. При цьому ефективний коефіцієнт дифузії  $R$  буде залишатися незмінним.

З аналізу рівняння (7) випливає, що в усталеному режимі:

$$0 = R \left[ \frac{\partial}{\partial x'} \left[ \tilde{h}^3 \left( \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x'} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y'} \left[ \tilde{h}^3 \left( \frac{\partial \tilde{h}}{\partial y'} \right) \right] - \gamma' \frac{\partial}{\partial x'} \tilde{h}^3 \right] - \eta'_v 1_{\Omega_b}(t) + \delta(x' - x_0\sqrt{v_0})\delta(y' - y_0\sqrt{v_0}), \quad (13)$$

форма розливу буде визначатися двома параметрами: кутом нахилу  $\gamma'$  і лінійною швидкістю вигорання  $\eta'_v$ .

На рис. 1 і рис. 2 показано залежність максимальної довжини  $a_{\max}$  і максимальної ширини  $b_{\max}$  розливу від кута нахилу поверхні  $\theta$  та лінійної швидкості вигорання  $\eta_v$  для швидкості витікання рідини 10 л/с, де вісі  $\theta$  і  $\eta_v$  подано в логарифмічних координатах.

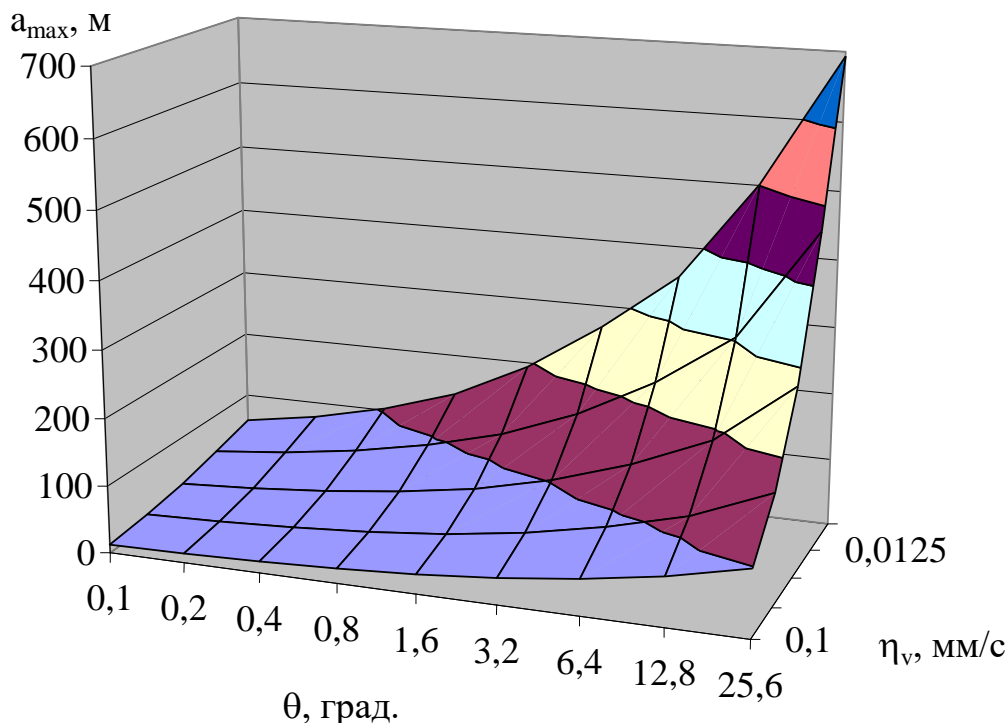


Рис. 1. Залежність максимальної довжини розливу від кута нахилу поверхні  $\theta$  та лінійної швидкості вигорання  $\eta_v$  при швидкості витікання рідини 10 л/с

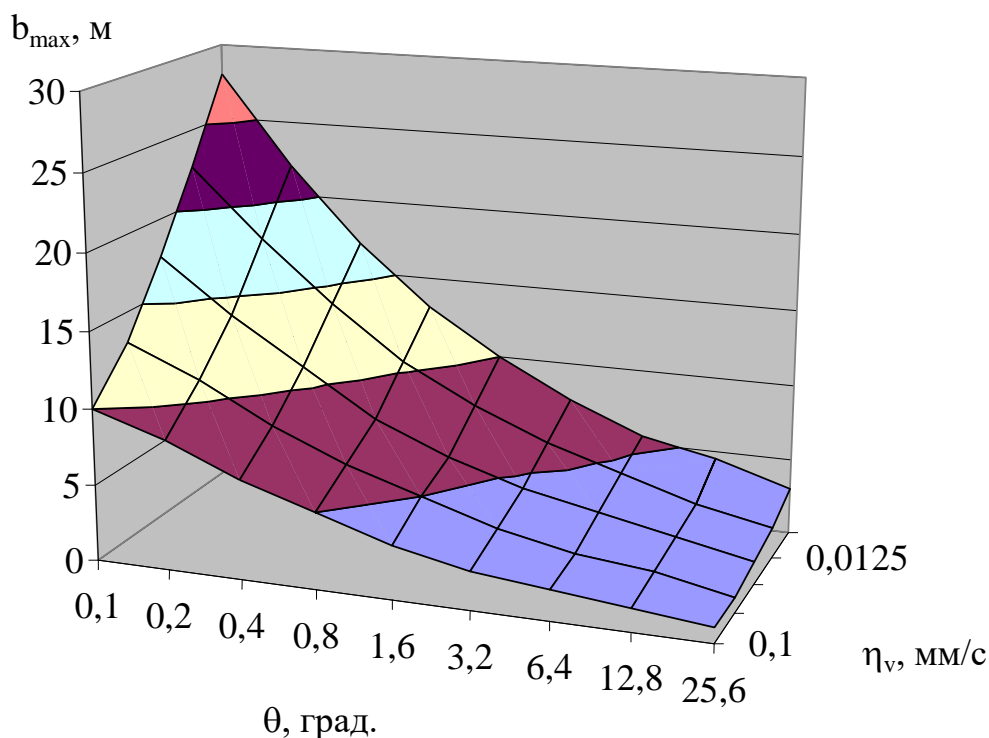


Рис. 2. Залежність максимальної ширини розливу від кута нахилу поверхні  $\theta$  та лінійної швидкості вигорання  $\eta_v$  при швидкості витікання рідини 10 л/с

На рис. 3 наведено відношення ширини розливу до його довжини, що характеризує ступінь відхилення його форми від кола.

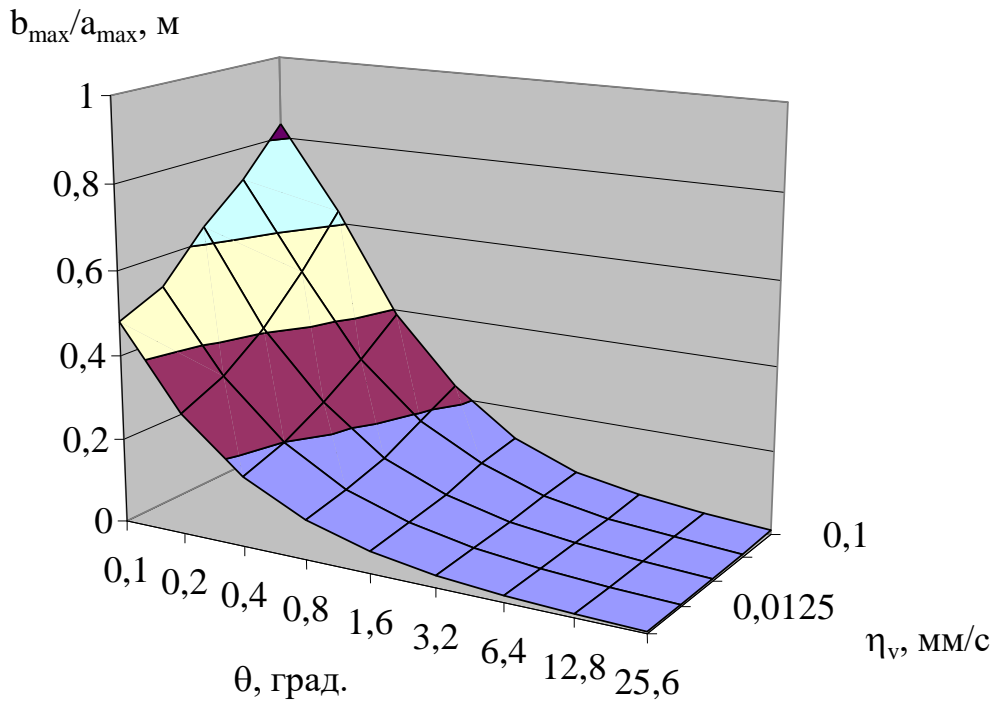


Рис. 3. Відношення довжини розливу до його ширини в залежності розливу від кута нахилу поверхні  $\theta$  та лінійної швидкості вигорання  $\eta_v$  при швидкості витікання рідини 10 л/с

Аналіз графічної залежності на рис. 3 свідчить, що збільшення кута нахилу і зменшення питомої масової швидкості вигорання призводить до зменшення відношення ширини розливу до його довжини, тобто форма розливу стає більш витягнутою в напрямку нахилу поверхні. Навпаки, при зменшенні кута нахилу і збільшенні питомої масової швидкості вигорання форма розливу наближається до кола.

### 5.3. Алгоритм визначення максимальної довжини і ширини розливу

Діаграми на рис. 1 і рис. 2 дозволяють визначити максимальні довжину і ширину розливу на похилій поверхні з кутом  $\theta$  довільної горючої рідини з лінійною швидкістю вигорання  $\eta_v$  (мм/с) і об'ємною швидкістю витікання  $v_0$  (л/с). Для цього необхідно виконати наступні дії.

1. Розраховуємо коефіцієнт пропорційності

$$k = \frac{v_0}{10}, \quad (14)$$

який показує у скільки разів об'ємна швидкість витікання перевищує еталонну швидкість 10 л/с, для якої були побудовані діаграми на рис. 1 і рис. 2.

2. Розраховуємо наведений кут нахилу

$$\theta' = \frac{\theta}{\sqrt{k}} \quad (15)$$

і наведену лінійну швидкість вигорання

$$\eta'_v = \frac{\eta_v}{k}. \quad (16)$$

3. За діаграмою на рис. 1 визначаємо довжину розливу  $\tilde{a}_{\max}$ , виходячи з кута нахилу  $\theta'$ , лінійної швидкості вигорання  $\eta'_v$  і об'ємної швидкості витікання 10 л/с.

4. За діаграмою на рис. 2 визначаємо ширину розливу  $\tilde{b}_{\max}$ , виходячи з кута нахилу  $\theta'$ , лінійної швидкості вигорання  $\eta'_v$  і об'ємної швидкості витікання 10 л/с.

5. Обчислюючи

$$a_{\max} = \tilde{a}_{\max} \sqrt{k}; \quad (17)$$

$$b_{\max} = \tilde{b}_{\max} \sqrt{k}, \quad (18)$$

знаходимо максимальну довжину  $a_{\max}$  і  $b_{\max}$  ширину розливу.

## 6. Обговорення результатів моделювання форми і розмірів розливу при витіканні і горінні рідини

При розтіканні рідини на горизонтальній поверхні розлив має форму близьку до кола. Якщо розтікання відбувається на похилій поверхні, то розлив має форму овалу, витягнутого в напрямку нахилу поверхні. Динаміка розтікання рідини залежить від кута нахилу поверхні, в'язкості рідини, середньої глибини нерівностей тощо. Але максимальна площа розливу визначається лише надходженням рідини в розлив та її витратами внаслідок просочення і вигорання. При цьому витрати рідини є пропорційними площі розливу. Цим пояснюється існування граничної площі розливу за умови сталої швидкості витікання рідини.

Типова швидкість просочення рідини в ґрунт є приблизно на порядок меншою порівняно зі швидкістю її вигорання. Наприклад, експеримент з просоченням сирою нафти в сухий пісок [17] дав оцінку швидкості просочення 0,003 мм/с, в той час, як лінійна швидкість вигорання складає близько 0,04 мм/с. Це дозволяє при оцінці максимальної площі розливу не враховувати витрати рідини на просочення вглиб ґрунту. Внаслідок цього рівняння розтікання і горіння рідини набуває вигляду (2–3). Вказане рівняння є нелінійним диференціальним рівнянням другого порядку параболічного типу, що описує товщину шару рідини над поверхнею ґрунту.

У випадку неперервного витікання рідини зі сталою швидкістю лінійне перетворення просторових і часової координат (5) трансформує рівняння (2) до вигляду (6), а потім (7). На відміну від (5) рівняння (7) замість трьох параметрів (кут нахилу, об'ємна швидкість витікання і лінійна швидкість вигорання) містить лише два параметри, які виражаються через них – формули (8) і (9). Із аналізу залежностей (7–9) випливає, що збільшення об'ємної швидкості витікання еквівалентно лінійному перетворенню просторових і часової координати (10) з одночасним зменшенням кута нахилу (8) і лінійної швидкості вигорання (9).

Розвинення функцій  $\operatorname{tg}\theta$  і  $\cos\theta$  в ряд Тейлора в околі точки  $\theta=0$  свідчить, що для малих значень кута  $\theta$  мають місце наближені рівності (11), причому для  $\operatorname{tg}\theta$  похибка такого наближення має порядок  $O(\theta^3)$ , а для  $\cos\theta$  – порядок  $O(\theta^2)$ . Внаслідок цього для кутів нахилу поверхні  $\theta \leq 20^\circ$  відносна похибка наближення (11) не перевищує 4,2 % для тангенса і 6,5 % для косинуса. Це дозволяє вважати ефек-



тивний коефіцієнт дифузії  $R$  таким, що практично не залежить від кута нахилу поверхні.

Максимальні розміри розливу досягаються в усталеному режимі (13), коли надходження рідини за рахунок витікання будуть дорівнювати її витратам внаслідок вигорання. В цьому випадку розміри розливу і товщина шару рідини залишаються незмінними. Аналіз зображень на рис. 1 і рис. 2 підтверджує, що із збільшенням кута нахилу форма розливу стає все більш витягнутою вздовж напрямку нахилу поверхні. Такий саме ефект має зменшення лінійної швидкості вигорання. Це відбувається внаслідок того, що збільшується об'єм рідини, який встигає стекти вниз перш, ніж вигорить. Навпаки, зменшення кута нахилу поверхні і збільшення лінійної швидкості вигорання призводить до того, що форма розливу наближається до кола (рис. 3).

Подібність процесів розтікання рідин, що задається перетвореннями (9), (10), (12), дозволяє використовувати діаграми на рис. 1 і рис. 2 для оцінки максимальних розмірів розливу для довільного значення об'ємної швидкості витікання. Наведений алгоритм зводиться до визначення коефіцієнта пропорційності (14), який показує, у скільки разів об'ємна швидкість витікання більша ніж 10 л/с. Виходячи з нього розраховуються наведений кут нахилу (15) і наведена лінійна швидкість вигорання (16). Ці параметри є вихідними для діаграм на рис. 1 і рис. 2. Отримані з них значення за допомогою перетворень (17), (18) дозволяють визначити довжину і ширину розливу.

Перевагою даного підходу є можливість знаходження довжини і ширини розливу без розв'язання диференціального рівняння в частинних похідних [18], що описує динаміку розтікання рідини.

Обмеженням запропонованого підходу є те, що він може бути застосований лише у випадку, коли відсутні істотні перешкоди для розтікання рідини.

Недоліком зазначеного підходу є те, що він не дозволяє точно визначити межі овалу, що відповідає розливу, а лише його довжину і ширину.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з визначенням теплового потоку від пожежі розливу горючої рідини до сусідніх об'єктів.

## 6. Висновки

1. При розтіканні і горінні рідини на похилій поверхні розлив має форму овалу. Показано, що розлив досягає максимальних розмірів в усталеному режимі. Причиною є те, що витрати рідини внаслідок вигорання пропорційні площі розливу, а швидкість витікання рідини є сталою. В цьому режимі форма розливу буде визначатися диференціальним рівнянням другого порядку еліптичного типу. Параметрами рівняння є кут нахилу поверхні, лінійна швидкість вигорання рідини та її об'ємна швидкість витікання. Із збільшенням кута нахилу форма розливу стає все більш витягнутою вздовж напрямку нахилу поверхні. Такий саме ефект має зменшення лінійної швидкості вигорання або збільшення об'ємної швидкості витікання. Навпаки, зменшення кута нахилу поверхні і збільшення лінійної швидкості вигорання або зменшення об'ємної швидкості витікання призводить до того, що форма розливу наближається до кола.

2. Показано, що для практично значущих кутів нахилу поверхні ( $\theta \leq 20^\circ$ ) має місце приблизна подібність процесів розтікання рідини. Це стає можливим внаслідок розвинення в ряд Тейлора функцій  $\cos\theta$  і  $\operatorname{tg}\theta$  в околі точки 0 і залишення лише перших членів рядів. Збільшення швидкості витікання рідини в  $k$  разів екві-

валентно масштабуванню просторових координат в  $\sqrt{k}$  разів, часової координати в  $k$  разів, зменшенню кута нахилу поверхні в  $\sqrt{k}$  разів, зменшенню лінійної швидкості вигорання в  $k$  разів. Похибка такого наближення не перевищує 6,5 %.

3. Побудовано алгоритм розрахунку максимальної довжини і максимальної ширини розливу для довільної горючої рідини при заданій об'ємній інтенсивності витікання на похилій поверхні. Алгоритм спирається на подібність процесів розтікання рідини на похилій поверхні і використовує діаграми залежності максимальної довжини і ширини розливу від кута нахилу поверхні і лінійної швидкості вигорання для еталонної об'ємної швидкості витікання 10 л/с. Перевагою алгоритму є можливість знаходження максимальної довжини і максимальної ширини розливу без розв'язання диференціального рівняння в частинних похідних, що описує динаміку розтікання рідини.

### Література

1. 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. P. 101421. doi: 10.1016/j.csite.2021.101421
2. Vasilchenko A., Otrosh Y., Adamenko N., Doronin E., Kovalov A. Feature of fire resistance calculation of steel structures with intumescent coating. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. P. 02036. doi: 10.1051/mateconf/201823002036
3. Abdolhamidzadeh B., Abbasi T., Rashtchian D., Abbasi S. A. Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2011. Vol. 24(5). P. 575–593. doi: 10.1016/j.jlp.2010.06.013
4. Amin M. T., Scarponi G. E., Cozzani V., Khan F. Improved pool fire-initiated domino effect assessment in atmospheric tank farms using structural response. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 242. P. 109751. doi: 10.1016/j.ress.2023.109751
5. Reniers G., Cozzani V. Features of Escalation Scenarios. *Domino Effects in the Process Industries*. 2013. P. 30–42. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8
6. Etkin D., Horn M., Wolford A. CBR-Spill RISK: Model to Calculate Crude-by-Rail Probabilities and Spill Volumes. *International Oil Spill Conference Proceedings*. 2017. Vol. 2017(1). P. 3189–3210. doi: 10.7901/2169-3358-2017.1.3189
7. Liu S., Liang Y. Statistics of catastrophic hazardous liquid pipeline accidents. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 208. P. 107389. doi: 10.1016/j.ress.2020.107389
8. Guo Q., Li Y. Z., Ingason H., Yan Z., Zhu H. Study on spilled liquid from a continuous leakage in sloped tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022. Vol. 120. P. 104290. doi: 10.1016/j.tust.2021.104290
9. He J., Yang L., Ma Y., Yang D., Li A., Huang L., Zhan Y. Simulation and application of a detecting rapid response model for the leakage of flammable liquid storage tank. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. Vol. 141. P. 390–401. doi: 10.1016/j.psep.2020.04.053
10. Zhao J., Zhu H., Zhang J., Huang H., Yang R. Experimental study on the spread and burning behaviors of continuously discharge spill fires under different slopes. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 392. P. 122352. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122352

11. Li Y., Meng D., Yang L., Shuai J. Experimental study on the burning rate of continuously released spill fire on open surface with measurement of burning fuel thickness. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022. Vol. 36. P. 102217. doi: 10.1016/j.csite.2022.102217
12. Li Z., Wang Q., Li H., Tang F. Experimental study on spread radius and burning rate of spill fires on a fine sand substrate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. Vol. 148(21). P. 12109–12118. doi: 10.1007/s10973-023-12535-0
13. Keller J. M., Simmons C. S. The Influence of Selected Liquid and Soil Properties on the Propagation of Spills Over Flat Permeable Surfaces. Pacific Northwest National Laboratory. 2005. URL: [https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-15058.pdf](https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-15058.pdf)
14. 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
15. Abbasi T., Kumar V., Tauseef S. M., Abbasi S. A. Spread rate of flammable liquids over flat and inclined porous surfaces. *Journal of Chemical Health & Safety*. 2018. Vol. 25(5). P. 19–27. doi: 10.1016/j.jchas.2018.02.004
16. Sahin E., Lattimer B. Y., Duarte J. P. Assessing spill fire characteristics through machine learning analysis. *Annals of Nuclear Energy*. 2023. Vol. 192. P. 109961. doi: 10.1016/j.anucene.2023.109961
17. Олійник В. В., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Метод експериментального визначення параметрів просочення рідини в ґрунт. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 2(36). С. 15–25. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-2
18. Олійник В. В., Басманов О. Є. Модель розтікання і горіння рідини на ґрунті. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2023. № 1(37). С. 18–30. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-2

*V. Oliinik, PhD, Associated Professor, Head of Department*  
*O. Basmanov, Dsc, Professor, Chief Researcher of the Department*  
*National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

#### **MODEL OF SPILL SHAPE AND SIZE WHEN LIQUID IS LEAKING AND BURNING**

A model was built to determine the maximum length and width of a spill of a flammable liquid burning and flowing down an inclined plane, under the condition of a constant speed of its outflow. The model is based on a parabolic differential equation that describes the thickness of the liquid layer on the soil surface. It is shown that the maximum spill length and width are achieved in a steady state, which occurs due to the establishment of a balance between the amount of liquid entering the spill due to leakage and the amount of liquid consumed due to burnout. As the angle of inclination increases, the shape of the spill becomes more and more elongated along the direction of the surface inclination. A decrease in the linear burnout rate or an increase in the volume flow rate has the same effect. On the contrary, decreasing the angle of inclination of the surface and increasing the linear speed of burning or decreasing the volumetric flow rate leads to the fact that the shape of the spill approaches a circle. It is shown that for surface inclination angles of no more than 20°, there is a similarity in the processes of liquid spreading. This means that an increase in the volume flow rate is equivalent to a linear transformation of the spatial and temporal coordinates with a simultaneous decrease in the angle of inclination and the linear burnout rate. An algorithm for calculating the maximum length and maximum width of a spill for an arbitrary combustible liquid at a given volume intensity of flow on an inclined surface is built, which is based on the similarity of the processes of liquid spreading on an inclined surface and uses diagrams of the dependence of the maximum length and width of the spill on the angle of inclination of the sur-

face and the linear speed of burning for a reference volumetric flow rate of 10 l/s. The obtained results can be used to determine the height of the flame and the density of the heat flow from the fire to nearby technological objects.

**Keywords:** flammable liquid spill, spill fire, spill form, steady state

## References

1. 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
2. Vasilchenko, A., Otrosh, Y., Adamenko, N., Doronin, E., & Kovalov, A. (2018). Feature of fire resistance calculation of steel structures with intumescent coating. *MATEC Web of Conferences*, 230, 02036. doi: 10.1051/mateconf/201823002036
3. Abdolhamidzadeh, B., Abbasi, T., Rashtchian, D., Abbasi, S. A. (2011). Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(5), 575–593. doi: 10.1016/j.jlp.2010.06.013
4. Amin, M. T., Scarponi, G. E., Cozzani, V., & Khan, F. (2024). Improved pool fire-initiated domino effect assessment in atmospheric tank farms using structural response. *Reliability Engineering & System Safety*, 242, 109751. doi: 10.1016/j.ress.2023.109751
5. Reniers, G., Cozzani, V. (2013). Features of Escalation Scenarios. *Domino Effects in the Process Industries*, 30–42. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8
6. Etkin, D. S., Horn, M., Wolford, A. (2017). CBR-Spill RISK: Model to Calculate Crude-by-Rail Probabilities and Spill Volumes. *International Oil Spill Conference Proceedings*, 2017(1), 3189–3210. doi: 10.7901/2169-3358-2017.1.3189
7. Liu, S., Liang, Y. (2021). Statistics of catastrophic hazardous liquid pipeline accidents. *Reliability Engineering & System Safety*, 208, 107389. doi: 10.1016/j.ress.2020.107389
8. Guo, Q., Li, Y. Z., Ingason, H., Yan, Z., Zhu, H. (2022). Study on spilled liquid from a continuous leakage in sloped tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 120, 104290. doi: 10.1016/j.tust.2021.104290
9. He, J., Yang, L., Ma, Y., Yang, D., Li, A., Huang, L., & Zhan, Y. (2020). Simulation and application of a detecting rapid response model for the leakage of flammable liquid storage tank. *Process Safety and Environmental Protection*, 141, 390–401. doi: 10.1016/j.psep.2020.04.053
10. Zhao, J., Zhu, H., Zhang, J., Huang, H., & Yang, R. (2020). Experimental study on the spread and burning behaviors of continuously discharge spill fires under different slopes. *Journal of Hazardous Materials*, 392, 122352. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122352
11. Li, Y., Meng, D., Yang, L., Shuai, J. (2022). Experimental study on the burning rate of continuously released spill fire on open surface with measurement of burning fuel thickness. *Case Studies in Thermal Engineering*, 36, 102217. doi: 10.1016/j.csite.2022.102217
12. Li, Z., Wang, Q., Li, H., Tang, F. (2023). Experimental study on spread radius and burning rate of spill fires on a fine sand substrate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148 (21), 12109–12118. doi: 10.1007/s10973-023-12535-0
13. Keller, J., Simmons, C. (2005). The Influence of Selected Liquid and Soil Properties on the Propagation of Spills Over Flat Permeable Surfaces. *Pacific North-*

west National Laboratory. Available at: [https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-15058.pdf](https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-15058.pdf)

14. 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

15. Abbasi, T., Kumar, V., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2018). Spread rate of flammable liquids over flat and inclined porous surfaces. *Journal of Chemical Health & Safety*, 25(5), 19–27. doi: 10.1016/j.jchas.2018.02.004

16. Sahin, E., Lattimer, B., Duarte, J. (2023). Assessing spill fire characteristics through machine learning analysis. *Annals of Nuclear Energy*, 192, 109961. doi: 10.1016/j.anucene.2023.109961

17. Oliinik, V., Basmanov, O., Mykhailovska, Yu. (2022). Method of experimental determining the parameters of impregnating a liquid into the soil. *Problems of Emergency Situations*, 2(36), 15–25. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-2

18. Oliinik, V., Basmanov O. (2023). Model of spreading and burning the liquid on the soil, 1(37), 18–30. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-2

Надійшла до редколегії: 11.10.2024

Прийнята до друку: 12.12.2024