

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, Харків, Україна

МОДЕЛЬ РОЗТІКАННЯ І ГОРІННЯ РІДИНИ НА ГРУНТІ

Об'єктом дослідження є процес розтікання і горіння рідини на ґрунті. Побудовано математичну модель розтікання рідини на похилій поверхні. Модель являє собою систему з диференціального рівняння параболічного типу, що описує зміну області розливу і товщини шару рідини в кожній точці області, і звичайного диференціального рівняння, що відповідає глибині просочення рідини в ґрунт. Припускається, що процес просочення рідини в ґрунт описується моделлю Грін-Ампт, особливістю якої є уявлення про чітку межу між вже змоченим і ще сухим ґрунтом. Під впливом тиску рідини на поверхні і капілярних сил відбувається переміщення цієї межі вглиб ґрунту. Швидкість просочення визначається гідравлічною провідністю змоченого ґрунту, його пористістю і показником капілярності. Ці параметри залежать від стану ґрунту і типу рідини і мають визначатися експериментально. Модель розтікання рідини враховує нерівності поверхні шляхом введення в диференціальне рівняння розповсюдження рідини доданку, який містить середню глибину нерівностей поверхні. Необхідність заповнення цих нерівностей при розтіканні рідини визначає площу розливу. Враховано зменшення об'єму рідини в розливі внаслідок її вигорання. Початкові умови визначаються характером розтікання рідини: миттєвим або неперервним. Миттєвий розлив має місце у випадку катастрофічного руйнування ємності, а неперервний – при пошкодженні ємності або трубопроводу, внаслідок чого об'єм розлитої рідини поступово збільшується. У випадку неперервного витікання рідини диференціальне рівняння розтікання рідини містить доданок з δ -функцією. У випадку миттєвого розливу δ -функцію включає в себе початкова умова. Отримані результати можуть бути використані для розрахунку теплового потоку від полум'я над розливом горючої рідини і визначення теплового впливу пожежі на сусідні технологічні об'єкти.

Ключові слова: розтікання рідини, пожежа розливу, просочення рідини, модель Грін-Ампт

1. Вступ

Значна кількість надзвичайних ситуацій, що виникають при транспортуванні, переробці і зберіганні нафти і нафтопродуктів, починається з аварійного розливу рідини [1]. Найбільшу небезпеку при цьому являє спалахування рідини, що не лише призводить до викиду небезпечних речовин в атмосферу [2], а створює загрозу розповсюдження пожежі на сусідні природні ландшафти [3] або технологічні об'єкти. Просочення рідини в ґрунт зменшує товщину шару рідини на поверхні, а, значить, і площу розтікання. Серед надзвичайних ситуацій на транспорті, пов'язаних із розливом горючих і токсичних рідин, можна відзначити наступні: 2023 рік (США, Огайо) – з рейок зійшов потяг з токсичними і горючими рідинами. Внаслідок розгерметизації цистерн стався розлив і спалахування горючої рідини. 2021 рік (США, Техас) – з рейок зійшов потяг з нафтопродуктами і зіткнувся з вантажівкою. Загорілися 3 цистерни, висота полум'я від пожежі становила кілька десятків метрів. Були евакуйовані мешканці найближчих будинків. 2020 рік (США, Аризона) – зійшли з рейок і спалахнули цистерни з легкозаймистими рідинами.

Розробка планів локалізації і ліквідації надзвичайних ситуацій, викликаних аварійним розливом горючої рідини, потребує інформації про форму і розміри розливу, а також про динаміку його зміни. Отже, актуальною проблемою при локалізації надзвичайної ситуації, пов'язаної з розливом і горінням рідини є каскадне розповсюдження пожежі на сусідні технологічні об'єкти.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [4] запропоновано статистичний підхід до розрахунку ймовірностей аварій і об'єму розлитої горючої рідини на залізничному транспорті. З цією метою проаналізовано надзвичайні ситуації, що супроводжувалися розливом рідин. Такий підхід дозволяє узагальнити наслідки аварій, але не дає можливості проаналізувати конкретну ситуацію і спрогнозувати її розвиток. В [5] розглянуто пожежу розливу горючої рідини в залізничному тунелі. Весь простір тунелю поділено на окремі зони і для цих зон знаходиться розподіл температур, але площа розливу приймається сталою і заданою априорі. В [6] досліджено тепловий вплив пожежі на сталеві конструкції, але динаміка зміни площі пожежі в роботі не розглядається. В [7] проаналізовано екологічні характеристики засобів гасіння пожеж горючих рідин, але динаміка розтікання рідини і просочення рідини в ґрунт не розглядаються.

В [8] побудовано модель теплового впливу пожежі розливу на резервуар з нафтопродуктом. Недоліком наведеної моделі є припущення про сталий характер форми і площі розливу. В [9] на прикладі n-бутанола експериментально досліджено розтікання рідини з одночасним розповсюдженням полум'я по її поверхні. Недоліком підходу є неможливість узагальнення результатів внаслідок їх залежності від умов експерименту. Модель розтікання і горіння рідини на поверхні вогнетривкого скла побудовано в [10]. Але, на відміну від реального ґрунту, скло не має нерівностей, просочення вглибину також неможливе. В [11] на основі емпіричних даних побудовано модель розтікання бензину, ізооктану і етанолу на алюмінієвій поверхні. Але і в цій моделі просочення і нерівності поверхні залишаються неврахованими.

Одним із підходів до моделювання розтікання рідини на горизонтальній поверхні розглянуто в [12]. Його суть полягає в розгляді сил гравітації, поверхневого натягу і тертя як визначальних для процесу розтікання. Але такий підхід не враховує гідродинаміки процесу розтікання. В [13] наведено аналіз моделей розтікання рідини на твердій поверхні. На підставі порівняння експериментальних даних з розрахунками за моделлю [14] запропоновано модифікацію моделі. Недолік зазначеного підходу полягає в тому, що запропонована корекція залежить від умов, в яких були проведені експериментальні дослідження. Це ускладнює застосування моделі в інших умовах. Значення параметрів просочення для деяких типів ґрунту і рідин наведено в [15], але вони потребують окремого визначення в кожному випадку, оскільки залежать як від типу рідини, так і від стану ґрунту.

В [16] запропоновано метод визначення параметрів просочення рідини в ґрунт: коефіцієнта гідравлічної провідності, коефіцієнта пористості ґрунту та показника капілярності. Метод базується на розв'язанні задачі мінімізації відхилення розрахункових даних від експериментальних. Але процес розтікання і горіння рідини в роботі не розглядається.

Аналіз моделей розтікання горючих рідин засвідчив, що вони не враховують просочення рідини в підстилаючу поверхню. Це, в свою чергу, призводить до помилок в оцінці розмірів розливу та динаміки його утворення. Тому невирішеною частиною проблеми при розтіканні рідини по поверхні ґрунту є визначення динаміки зміни області розливу.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є побудова моделі розтікання і горіння рідини на ґрунті для

визначення форми і розмірів осередку пожежі. Це дозволить визначити межі поширення пожежі та її тепловий вплив на сусідні об'єкти.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- побудувати рівняння поширення полум'я по поверхні горючої рідини довільної форми;
- побудувати систему рівнянь розтікання рідини по поверхні ґрунту;
- визначити початкові і крайові умови системи рівнянь розтікання і горіння рідини.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес розтікання і горіння рідини на ґрунті. Основною гіпотезою є припущення, що розтікання рідини на ґрунті описується параболічним рівнянням, а її просочення – моделлю Грін-Ампт [17]. Для опису процесу розтікання рідини по поверхні використовуються методи теорії диференціальних рівнянь. Для визначення початкових умов зроблено припущення про характер витікання рідини із ємності – миттєвий або триваючий у часі. Для апроксимації процесу розповсюдження полум'я по поверхні рідини використовується метод скінчених різниць.

5. Результати побудови моделі розтікання і горіння рідини на ґрунті

5.1. Побудова рівняння поширення полум'я по поверхні рідини

Швидкість поширення фронту полум'я по поверхні рідини задається лінійною швидкістю поширення полум'я v_ℓ . Припустимо, що на поверхні ґрунту задано регулярну сітку з кроком h . Тоді область Ω , яку займає рідина, можна представити у вигляді множини вузлів сітки, покритих рідиною (рис. 1).

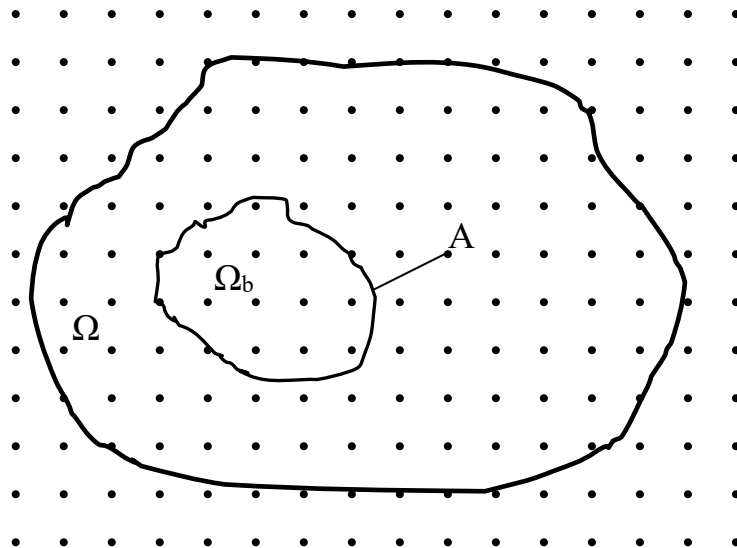


Рис. 1. Моделювання поширення полум'я по поверхні рідини за допомогою сітки

Область рідини, яка горить в момент часу t , позначимо $\Omega_b(t)$. Тоді, умовою поширення полум'я на довільну точку A із області Ω в момент часу $t + \Delta t$ буде:

$$\frac{d_{A, \Omega_b(t)}}{v_\ell} \leq \Delta t, \quad (1)$$

де $d_{A, \Omega_b(t)}$ – відстань від точки A з координатами (x_A, y_A) до області $\Omega_b(t)$, яку для випадку представлення області множиною вузлів сітки (рис. 1) можна записати у вигляді:

$$d_{A, \Omega_b(t)} = \min_{(x,y) \in \Omega_b} \left\{ \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2} \right\}.$$

Умова поширення полум'я (1) на точки, сусідні з областю горіння Ω_b , накладає обмеження на крок сітки h і крок по вісі часу Δt :

$$2h \leq v_\ell \Delta t. \quad (2)$$

В протилежному випадку, якщо крок по вісі часу буде занадто малим, умова (1) не буде виконана для жодної з точок, сусідніх з областю горіння Ω_b , тобто поширення полум'я відбуватися не буде.

5.2. Побудова системи рівнянь розтікання рідини на ґрунті

Розтікання рідини на горизонтальній поверхні описується диференціальним рівнянням параболічного типу:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = R \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[h^3 \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[h^3 \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] - \gamma \frac{\partial}{\partial x} h^3 \right], \quad (3)$$

де R – ефективний коефіцієнт дифузії:

$$R = \frac{\rho g}{3\mu} \cos \theta = \frac{g}{3\nu} \cos \theta,$$

де $\gamma = \text{tg } \theta$; θ – кут нахилу поверхні; $h(x, y)$ – висота рідини у точці (x, y) , обчислена вздовж нормалі до поверхні. При цьому розташування системи координат обрано таким чином, щоб напрямком нахилу поверхні співпадав з віссю OX (рис. 2).

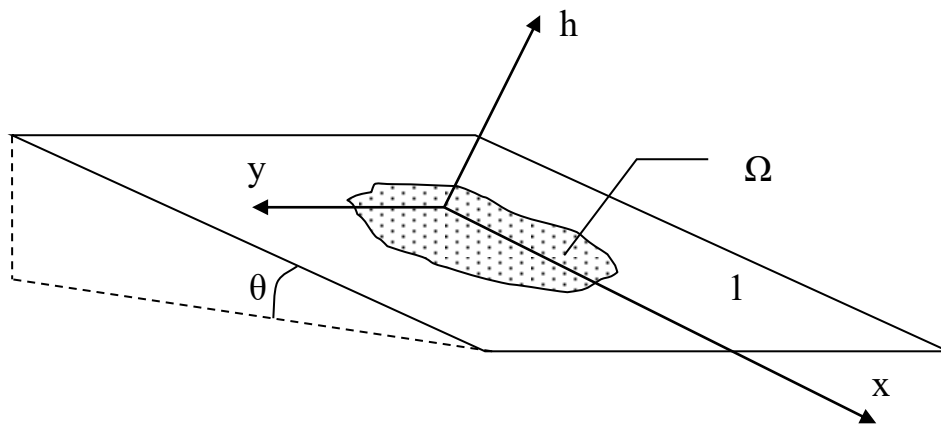


Рис. 2. Вибір системи координат на похилій поверхні: 1 – поверхня; 2 – рідина, що розтікається

Одночасно з цим відбувається просочення рідини вглиб ґрунту. При цьому глибина просочення z описується рівнянням:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = K \frac{h + z + h_f}{z},$$

де $z = z(x, y)$ – глибина просочення в точці (x, y) розливу; K – коефіцієнт гідравлічної провідності змоченого ґрунту; h_f – показник капілярності.

Просочення рідини призводить до зменшення товщини шару на величину:

$$\Delta_{\text{inf}} = \phi \frac{\partial z}{\partial t} = \phi K \frac{h + z + h_f}{z},$$

де ϕ – коефіцієнт пористості ґрунту.

Крім того, вигорання рідини призводить до зменшення товщини її шару на величину:

$$\Delta_{\text{burn}} = \frac{\eta}{\rho} 1_{\Omega_b}(x, y),$$

де η – питома швидкість вигорання рідини; ρ – її густина.

$$1_{\Omega_b}(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in \Omega_b, \\ 0, & (x, y) \notin \Omega_b. \end{cases}$$

Врахування просочення і вигорання перетворює рівняння (3) на систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} = R \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[h^3 \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[h^3 \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] - \gamma \frac{\partial}{\partial x} h^3 \right] - \phi K \frac{h + z + h_f}{z} - \\ - \frac{\eta}{\rho} 1_{\Omega_b}(t), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = K \frac{h + z + h_f}{z}, \quad (5)$$

що описують розтікання рідини з одночасним її просоченням і вигоранням. Додатково необхідно врахувати умову поширення полум'я по поверхні рідини (1).

Будь-якій реальній поверхні (бетон, асфальт, ґрунт, щєбінь) притаманні нерівності. Це можуть бути, зокрема, тріщини, заглиблення, рослинність тощо. Тому, розтікання рідини супроводжується не лише просоченням (внаслідок пористості поверхні), а й заповненням заглиблень, викликаних нерівностями поверхні. З фізичної точки зору це означає, що певний об'єм рідини, що розтікається, витрачається на заповнення заглиблень:

$$V_{\text{dp}}(t) = S(t)h_{\text{dp}},$$

де $V_{dp}(t)$ – об’єм рідини, яка заповнила заглиблення на момент часу t ; $S(t)$ – площа розливу в момент часу t ; h_{dp} – середня глибина нерівностей поверхні. Тобто, з урахуванням витрат рідини на заповнення нерівностей, рівняння (4) набуде вигляду:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = R \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[\tilde{h}^3 \left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\tilde{h}^3 \left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial y} \right) \right] - \gamma \frac{\partial}{\partial x} \tilde{h}^3 \right] - \phi K \frac{h + z + h_f}{z} - \frac{\eta}{\rho} 1_{\Omega_b}(t); \quad (6)$$

$$\tilde{h} = \begin{cases} h - h_{dp}, & h - h_{dp} > 0; \\ 0, & h - h_{dp} \leq 0; \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = K \frac{h + z + h_f}{z}. \quad (8)$$

Відзначимо, що наявність нерівностей на поверхні призводить до того, що площа розливу не буде перевищувати:

$$S_{\max} = \frac{V}{h_{dp}},$$

де V – загальний об’єм рідини. Із вигоранням і просоченням рідини в ґрунт лінійні розміри розливу не зменшуються, оскільки рідина залишається в заглибленнях (рис. 3).

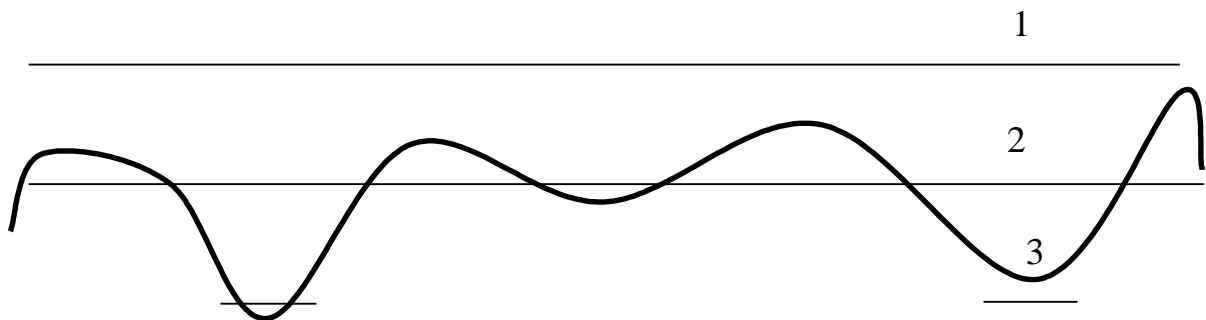


Рис. 3. Зменшення площі поверхні рідини при її вигоранні і просоченні на нерівній поверхні: 1, 2, 3 – рівні рідини в моменти часу t_1 , t_2 , t_3 відповідно, $t_1 < t_2 < t_3$

В [18] з метою визначення середньої глибини нерівностей поверхні було проведено експеримент, в ході якого розливалась вода, і визначалась покрита нею площа. Отримане значення середньої глибини нерівностей склало $h_{dp}=1,7$ см.

5.3. Визначення початкових і крайових умов системи рівнянь розтікання і горіння рідини

За характером розтікання розрізняють миттєвий розлив і такий, що триває в часі. Перший має місце при катастрофічному руйнуванні ємності із рідиною, а другий – при ушкодженні ємності, яке призводить до поступового витікання рі-

дини з неї. Відзначимо, що миттєве витікання є граничним випадком довготривалого витікання, якщо час витікання скорочується, прямуючи до нуля, а загальний об'єм розлитої рідини залишається сталим.

У випадку миттєвого розливу об'ємом V , що стався в момент часу $t=0$ у точці початку координат $(0, 0)$, система (6–8) доповнюється початковою умовою:

$$h(x, y, 0) = V\delta(x)\delta(y), \quad (9)$$

$$z(x, y, 0) = 0, \quad (10)$$

де $\delta(x)$ – дельта-функція Дірака.

Для тривалого в часі витікання рідини система рівнянь розтікання і просочення набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} = R \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[\tilde{h}^3 \left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\tilde{h}^3 \left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial y} \right) \right] - \gamma \frac{\partial}{\partial x} \tilde{h}^3 \right] - \phi K \frac{h + z + h_f}{z} + \\ + \frac{\eta}{\rho} 1_{\Omega_b}(t) + v(t)\delta(x - x_0)\delta(y - y_0); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\tilde{h} = \begin{cases} h - h_{dp}, & h - h_{dp} > 0; \\ 0, & h - h_{dp} \leq 0; \end{cases}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = K \frac{h + z + h_f}{z}, \quad (13)$$

з нульовою початковою умовою:

$$h(x, y, 0) = 0, \quad z(x, y, 0) = 0, \quad (14)$$

де $v(t)$ – об'ємна швидкість витікання рідини (m^3/s); (x_0, y_0) – координати точки, в якій відбувається витікання рідини.

Якщо для розтікання рідини немає жодних перешкод, то задача (6–8) або (11–13) розглядається в нескінченній області:

$$\begin{aligned} -\infty < x < \infty; \\ -\infty < y < \infty. \end{aligned}$$

Якщо існують перешкоди для розтікання рідини (наприклад, залізничні на- сипи), то розтікання відбувається в деякій області Φ (скінченній або нескінченній). В цьому випадку на межі $\partial\Phi$ області Φ буде задано крайову умову:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial n} \right|_{\partial\Phi} = 0, \quad (15)$$

де $\partial/\partial n$ – похідна в напрямку нормалі до межі області. Співвідношення (15) відповідає умові непроникності рідини через межу області.

В якості прикладу на рис. 4, 5 наведено форму розливу при витіканні дизельного палива з інтенсивністю 5 л/с. На рис. 4 показано розтікання на горизонтальній поверхні, а на рис. 5 – розтікання на похилій поверхні ($\theta=5^\circ$). Кінематична в'язкість $\nu=4,5$ мм²/с; густина $\rho=830$ кг/м³; питома масова швидкість вигорання $\eta=0,055$ кг/(м²·с). Параметри просочування в ґрунт: $K=1,68 \cdot 10^{-7}$ м/с; $h_f=0,95$ м; $\phi=0,31$. Середня глибина нерівностей ґрунту $h_{dp}=1,7$ см. Систему координат обрали таким чином, що її початок співпадає з точкою виливу рідини, а вісь X співпадає з напрямком нахилу поверхні вниз.

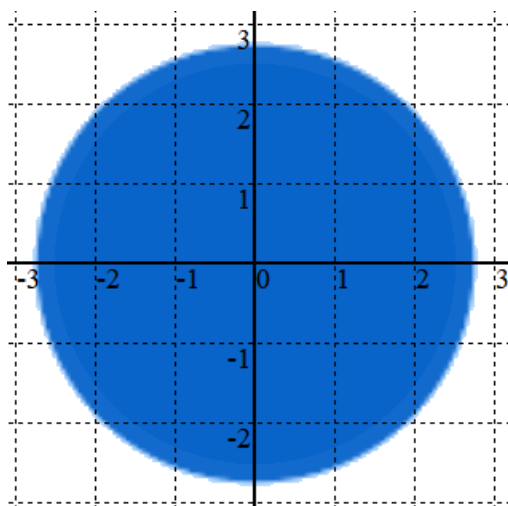


Рис. 4. Розтікання дизельного пального на горизонтальній площині

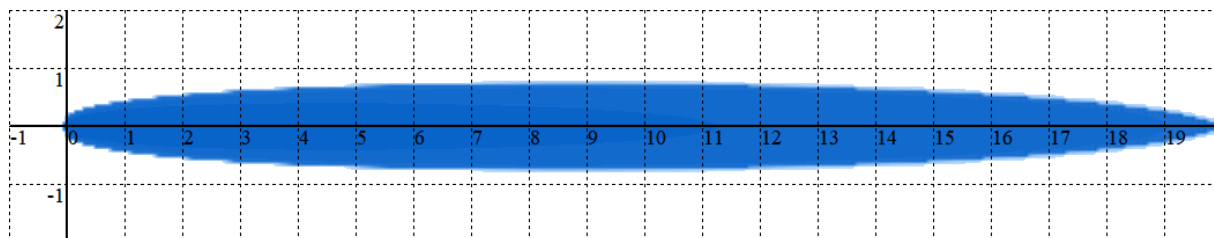


Рис. 5. Розтікання дизельного пального на похилій поверхні ($\theta=5^\circ$)

На рис. 4 показано ситуацію через 600 с після початку виливу рідини, а на рис. 5 – через 100 с.

6. Обговорення результатів побудови моделі розтікання і горіння рідини на ґрунті

Аварійний розлив горючої рідини в низці випадків супроводжується її горінням. Поява джерела запалення призводить до спалахування парів і поширенню полум'я над поверхнею рідини. Швидкість поширення полум'я визначається тепловим потоком від полум'я до поверхні рідини і нижньою концентраційною межею розповсюдження полум'я для парів рідини. Але для практичних застосувань зручніше користуватися лінійною швидкістю поширення полум'я. Якщо розтікання рідини обмежено якимись перешкодами, то форма розливу стає складною і, в загальному випадку, може бути не опуклою. В свою чергу, область розливу, яка охоплена полум'ям, також може мати складну форму. Це обумовлює використання методу скінчених різниць для описання процесу поширення полум'я по поверхні

рідини (1). Дискретний характер поширення полум'я (рис. 1) накладає обмеження (2) на крок просторової сітки і крок по вісі часу.

Розтікання рідини на похилій поверхні (рис. 2) описується рівнянням параболічного типу (3). Врахування просочення рідини вглиб ґрунту спирається на модель Грін-Амт, суть якої полягає в припущенні про існування межі між вже змоченим і ще сухим ґрунтом. Під впливом тиску рідини на поверхні і капілярних сил відбувається переміщення межі вглиб ґрунту. Швидкість просочення визначається гідравлічною провідністю змоченого ґрунту, його пористістю і показником капілярності. Ці параметри залежать від стану ґрунту і типу рідини і мають визначатися експериментально [15].

Врахування просочування і вигорання рідини перетворюють рівняння розтікання рідини (3) на систему (4–5). Реальній поверхні окрім пористості притаманні нерівності (рис. 3). Необхідність їх заповнення призводить до зменшення розмірів розливу. Середня глибина таких нерівностей є визначальною для швидкості розтікання і розмірів розливу. Наявність нерівностей враховано системою рівнянь (6–8).

Початкові умови визначаються характером розтікання рідини: миттєвим або неперервним. Миттєвий розлив має місце у випадку катастрофічного руйнування ємності. В цьому випадку початкові умови набувають вигляду (9, 10). Неперервний розлив має місце при пошкодженні ємності або трубопроводу, внаслідок чого об'єм розливої рідини поступово збільшується. У випадку неперервного витікання рідини диференціальне рівняння (11) містить δ -функцію. У випадку миттєвого розливу δ -функція міститься у початковій умові (9). Перешкоди для розтікання рідини описуються за допомогою крайових умов, що відповідають непроникності рідини через межу області розливу (15).

Розв'язання системи рівнянь (6–8), (11–13), проведене із використанням метода скінчених різниць показує, що нахил поверхні призводить до витягування форми розливу в напрямку нахилу поверхні (рис. 5). В той же час на горизонтальній поверхні розлив має кругову форму (рис. 4). Вигорання і просочення рідини вглиб ґрунту при сталій швидкості витікання призводять до виходу на усталений режим – розміри розливу досягають граничного значення. Подальше збільшення неможливе внаслідок витрат рідини на вигорання і просочення. Зокрема, для розглянутих умов час виходу на усталений режим склав близько 10 хв. При цьому площа розливу не залежить від його форми, оскільки визначається витратами рідини на вигорання і просочування, які в свою чергу залежать від площі розливу, а не його форми. В розглянутих прикладах площа розливу на момент часу $t=10$ хв. склала $S \approx 24,5 \text{ м}^2$.

Отримані результати можуть бути використані для розрахунку теплового потоку від полум'я над розливом горючої рідини і визначення теплового впливу пожежі на сусідні технологічні об'єкти. Обмеженням побудованої моделі є необхідність експериментального визначення параметрів просочення рідини в ґрунт: пористості ґрунту, гідравлічної провідності змоченого ґрунту, показника капілярності.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з використанням метода скінчених різниць для чисельного розв'язання системи рівнянь, що описують розтікання, просочення і горіння рідини на ґрунті.

7. Висновки

1. З використанням метода скінчених різниць побудовано рівняння поширення полум'я по поверхні рідини при розливі довільної форми. Показано, що для

цього відношення відстані між вузлами сітки на поверхні рідини і кроку по вісі часу має не перевищувати половини лінійної швидкості поширення полум'я по поверхні рідини.

2. Побудовано модель розтікання рідини по похилій поверхні. Модель враховує просочення рідини в ґрунт, вигорання, та наявність на поверхні нерівностей. Середня глибина таких нерівностей є визначальною для швидкості розтікання і розмірів розливу. Вигорання і просочення рідини вглиб ґрунту при сталій швидкості витікання призводять до виходу на усталений режим – розміри розливу досягають граничного значення. Зокрема, для розглянутих умов час виходу на усталений режим склав близько 10 хв.

3. Початкові умови визначаються характером розтікання рідини: миттєвим або неперервним. У випадку неперервного витікання рідини диференціальне рівняння розтікання рідини містить δ -функцію Дірака. У випадку миттєвого розливу δ -функція міститься у початковій умові. Перешкоди для розтікання рідини описуються за допомогою крайових умов, що відповідають непроникуваності рідини через межу області розливу. Товщина шару рідини визначається без урахування нерівностей поверхні залежить від в'язкості рідини. Зокрема, для дизельного палива, товщина шару складає 5 мм без урахування нерівностей поверхні.

Література

1. Raja S., Tauseef S. M., 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

2. Kustov M. V., Kalugin V. D., Tutunik V. V., Tarakhno E. V. Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2019. Vol. 1. P. 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99

3. Mygalenko K., Nuyanzin V., Zemlianskyi A., Dominik A., Pozdieiev S. Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1(10). P. 31–37. doi: 10.15587/1729-4061.2018.121727

4. 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. P. 3189–3210. doi: 10.7901/2169-3358-2017.1.3189

5. Zhao X., Chen C., Shi C., Zhao D. An extended model for predicting the temperature distribution of large area fire ascribed to multiple fuel source in tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019. Vol. 85. P. 252–258. doi: 10.1016/j.tust.2018.12.013

6. 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

7. Dadashov I., Loboichenko V., Kireev A. Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. *Pollution Research*. 2018. Vol. 37(1). P. 63–77. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6849>

8. Abramov Y. A., Basmanov O. E., Mikhayluk A. A., Salamov J. Model of Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2023-37-2

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

9. Pan Y., Li M., Luo X., Wang C., Luo Q., Li J. Analysis of heat transfer of spilling fire spread over steady flow of n-butanol fuel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 116. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104685

10. Zhao J., Liu Q., Huang H., Yang R., Zhang H. Experiments investigating fuel spread behaviors for continuous spill fires on fireproof glass. *Journal of Fire Sciences*. 2017. Vol. 35(1). P. 80–95. doi: 10.1177/0734904116683716

11. Seo J., Lee J. S., Kim H. Y., Yoon S. S. Empirical model for the maximum spreading diameter of low-viscosity droplets on a dry wall. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015. Vol. 61. P. 121–129. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2014.10.019

12. Abramov Yu., 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

13. Raja S., Abbasi T., Tauseef S. M., Abbasi S. A. Equilibrium models for predicting areas covered by accidentally spilled liquid fuels and an assessment of their efficacy. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. Vol. 130. P. 153–162. doi: 10.1016/j.psep.2019.08.009

14. Meel A., Khajehnajafi S. A comparative analysis of two approaches for pool evaporation modeling: Shrinking versus nonshrinking pool area. *Process Safety Progress*. 2012. Vol. 34. P. 304–314. doi: 10.1002/prs.11502

15. Ramli H., Zabidi H. A. Effect of oil spill on hydraulic properties of soil. *Malaysian construction research journal*. 2015. Vol. 49. URL: https://www.academia.edu/download/62252229/MCRJ_V19N2_520200302-87581-109jtez.pdf

16. Олійник В. В., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Метод експериментального визначення параметрів просочення рідини в ґрунт. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. Вип. № 2(36). С. 15–25. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-2

17. Tokunaga T. K. Simplified Green-Ampt Model, Imbibition-Based Estimates of Permeability, and Implications for Leak-off in Hydraulic Fracturing. *Water Resources Research*. 2020. doi: 10.1029/2019WR026919

18. Басманов А. Е., Горпинич И. А. Растекание жидкости на негладкой горизонтальной поверхности при аварии на железнодорожном транспорте. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2014. Вип. № 20. С. 16–20. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/248>

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

MODEL OF SPREADING AND BURNING THE LIQUID ON THE SOIL

The object of research is the process of liquid spreading and burning on the ground. A mathematical model of liquid spreading on an inclined surface has been constructed. The model is a system of equations. The first one is a parabolic differential equation that describes the change of the spill area and the thickness of the liquid layer at each point of the area. The second equation is an ordinary differential equation that corresponds to the depth of liquid infiltration into the soil. It is assumed that the process of liquid infiltration into the soil is described by the Green-Ampt model. Its feature is the idea about boundary between wetted and dry soil. Under the influence of liquid pressure above the ground surface and capillary forces the boundary moves deep into the soil. The rate of infiltration is determined

by the hydraulic conductivity of the wetted soil, soil porosity and suction head. These parameters depend on the soil conditions and the type of liquid and must be determined experimentally. The liquid spreading model takes into account surface roughness by introducing a term in the differential equation of fluid spread that contains the average depth of surface roughness. The necessity to fill these irregularities determines the area of the spill. Burnout of the liquid leads to a decrease in the spill area. The initial conditions are determined by the type of the liquid spreading: instantaneous or continuous. The instantaneous spill occurs in the case of a catastrophic destruction of the container. The continuous one occurs in the case of damaging the container or pipeline. In this case the volume of the spilled liquid gradually increases. In the case of continuous liquid spilling the differential equation of liquid flow contains a term with a δ -function. In the case of an instantaneous spill, the initial conditions contain δ -function. The obtained results can be used to determine the heat flow from the spill fire and the thermal effect of the fire on adjacent technological objects.

Keywords: liquid spreading, spill fire, liquid infiltration, Green-Ampt model

References

1. 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
2. Kustov, M. V., Kalugin, V. D., Tutunik, V. V., Tarakhno, E. V. (2019). Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 1, 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99
3. Mygalenko, K., Nuyanzin, V., Zemlianskyi, A., Dominik, A., Pozdieiev, S. (2018). Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, 10, 31–37. doi: 10.15587/1729-4061.2018.121727
4. Etkin, D., Horn, M., Wolford, A. (2017). CBR-Spill RISK: Model to Calculate Crude-by-Rail Probabilities and Spill Volumes. *International Oil Spill Conference Proceedings*, 3189–3210. doi: 10.7901/2169-3358-2017.1.3189
5. Zhao, X., Chen, C., Shi, C., Zhao, D. (2019). An extended model for predicting the temperature distribution of large area fire ascribed to multiple fuel source in tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, 252–258. doi: 10.1016/j.tust.2018.12.013
6. 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
7. Dadashov, I., Loboichenko, V., Kireev, A. (2018). Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. *Pollution Research*, 37, 1, 63–77. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6849>
8. 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
9. Pan, Y., Li, M., Luo, X., Wang, C., Luo, Q., Li, J. (2020). Analysis of heat transfer of spilling fire spread over steady flow of n-butanol fuel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 116. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104685
10. Zhao, J., Liu, Q., Huang, H., Yang, R., Zhang, H. (2017). Experiments inves-

tigating fuel spread behaviors for continuous spill fires on fireproof glass. *Journal of Fire Sciences*, 35, 1, 80–95. doi: 10.1177/0734904116683716

11. Seo, J., Lee, J. S., Kim, H. Y., Yoon, S. S. (2015). Empirical model for the maximum spreading diameter of low-viscosity droplets on a dry wal. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 61, 121–129. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2014.10.019

12. Abramov, Yu., 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

13. Raja, S., Abbasi, T., Tauseef, S. M., Abbasi, S. A. (2019). Equilibrium models for predicting areas covered by accidentally spilled liquid fuels and an assessment of their efficacy. *Process Safety and Environmental Protection*, 130, 153–162. doi: 10.1016/j.psep.2019.08.009

14. Meel, A., Khajehnajafi, S. (2012). A comparative analysis of two approaches for pool evaporation modeling: Shrinking versus nonshrinking pool area. *Process Safety Progress*, 34, 304–314. doi: 10.1002/prs.11502

15. Ramli, H., Zabidi, H. A. (2015). Effect of oil spill on hydraulic properties of soil. *Malaysian construction research journal*, 49. Available at: https://www.academia.edu/download/62252229/MCRJ_V19N2_520200302-87581-109jtez.pdf

16. Oliinik, V., Basmanov, O., Mykhailovska Y. (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

17. Tokunaga, T. K. (2020). Simplified Green-Ampt Model, Imbibition-Based Estimates of Permeability, and Implications for Leak-off in Hydraulic Fracturing. *Water Resources Research*. doi: 10.1029/2019WR026919

18. Basmanov, O., Horpynych I. (2014). Spreading of liquid on non-smooth surface after train accident. *Problems of emergency situations*, 20, 16–20. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/248>

Надійшла до редколегії: 07.03.2023

Прийнята до друку: 13.04.2023