

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)
Ю. В. Михайловська, PhD, с.н.с. відділу (ORCID 0000-0003-1090-5033)
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

МЕТОД ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОСОЧЕННЯ РІДИНИ В ҐРУНТ

Об'єктом дослідження є процес просочення рідини в сипучий матеріал. Побудовано математичну модель для визначення параметрів просочення рідини в ґрунт: коефіцієнта пористості ґрунту, коефіцієнта гідравлічної провідності і показника капілярності. 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. Основна ідея методу полягає в тому, щоб визначити параметри просочення таким чином, щоб розрахункове значення глибини просочення якнайменше відрізнялося від експериментально отриманих значень. Наведено метод оцінки параметрів моделі просочення рідини вглиб ґрунту. Спочатку проводиться відеофіксація процесу просочення рідини в зразок ґрунту, насипаного в скляний мірний циліндр. Далі на основі аналізу відеозапису вимірюється глибина просочення рідини в певні моменти часу. Оцінка коефіцієнта пористості знаходиться безпосередньо із отриманих експериментальних даних, а для оцінки значень коефіцієнта гідравлічної провідності і показника капілярності побудовано і розв'язано задачу мінімізації. В якості критерію вибору значень параметрів використано мінімум суми квадратів відхилень експериментально визначених глибин просочення від розрахункових. Розв'язання задачі мінімізації проводиться методом градієнтного спуску. При цьому значення частинних похідних апроксимовані їх виразами у скінчених різницях. В якості прикладу використання наведеного методу було проведено оцінку параметрів просочення сирої нафти в пісок. Порівняння розрахованої глибини просочення з експериментально визначеною свідчить про задовільну збіжність результатів. Запропонований метод визначення параметрів просочення може бути використаний при практичному застосуванні моделі розтікання і просочення рідини на ґрунті.

Ключові слова: розлив рідини, параметри просочення, модель Грін-Ампт, коефіцієнт пористості, сипучий матеріал

1. Вступ

Значна кількість надзвичайних ситуацій, що виникають в хімічній, переробній промисловості і на транспорті, починаються з аварійного розливу горючих або інших небезпечних рідин [1]. Найбільшу небезпеку при цьому являє займання розливу горючої рідини. Це загрожує не лише розповсюдженням пожежі на сусідні технологічні об'єкти і природні ландшафти, а й призводить до викиду забруднюючих речовин в атмосферу [2].

Серед надзвичайних ситуацій на залізничному транспорті, пов'язаних з розливом горючих рідин, можна відзначити наступні.

2021 (США, Техас) – з рейок зійшов потяг з нафтопродуктами і зіткнувся з вантажівкою. Загорілося 3 цистерни, висота полум'я від пожежі становила кілька десятків метрів. Були евакуйовані мешканці найближчих будинків.

2021 (Росія, Саратов) – на естакаді під час вантажних робіт відбулося загорання нафтопродуктів в цистерні.

2020 (США, Аризона) – зійшли з рейок і спалахнули цистерни з легкозаймистими рідинами.

2020 (Казахстан, Жамбильська обл.) – зійшла з рейок цистерна з бензином, внаслідок чого відбувся розлив і загорання. Площа пожежі склала близько 600 м².

2019 (Канада, Манітоба) – з рейок зійшов потяг з 37 цистернами з нафтою, що призвело до її часткового розливу.

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. Просочення рідини в ґрунт, з одного боку, зменшує товщину шару рідини на поверхні ґрунту, а, значить, і площу розтікання. З іншого, призводить до забруднення ґрунтів і підземних вод.

Отже, актуальною проблемою при розливі рідини на поверхні ґрунту є її просочення в глибину.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [3] проаналізовано ризики, що виникають при транспортуванні залізницею небезпечних вантажів, але поза увагою залишено наслідки аварій. В [4] проведено аналіз надзвичайних ситуацій, пов'язаних з розливом горючих рідин на залізничному транспорті. Запропоновано використовувати статистичні дані для розрахунку ймовірностей аварій і об'єму розливої горючої рідини. Такий підхід дозволяє узагальнити наслідки аварій, але не дає можливості проаналізувати конкретну ситуацію. В [5] досліджується пожежа розливу великої площі в залізничному тунелі. Особливістю підходу є розбиття всього простору на окремі зони і обчислення розподілу температур в них. При цьому сама площа пожежі вважається заданою апіорі. Розлив і горіння рідини може призвести до каскадного розповсюдження пожежі на природні ландшафти. В [6] розглянуто заходи щодо обмеження розповсюдження ландшафтних пожеж. В [7] розглянуто тепловий вплив пожежі на сталеві конструкції, але поза увагою залишено динаміку зміни параметрів осередку горіння. В [8] розглянуто екологічні характеристики засобів пожежогасіння, що використовуються для гасіння пожеж нафтопродуктів. При цьому утворення розливу та вплив просочення рідини в ґрунт на параметри пожежі не розглядаються.

В [9] експериментально досліджується динаміка розтікання n-бутанола з одночасним розповсюдженням полум'я. Недоліком такого підходу є залежність отриманих результатів від умов експерименту і неможливість їх узагальнення. В [10] досліджено розтікання і горіння горючих рідин на поверхні вогнетривкого скла. В [11] побудовано емпіричну модель розтікання бензину, ізооктану і етанолу на алюмінієвій поверхні. Використання такого класу моделей на практиці ускладнено внаслідок того, що в реальних умовах поверхня не є ідеально гладкою, вона має нерівності та нахил.

Одним з поширених методів моделювання розтікання рідини по горизонтальній поверхні є використання принципу гравітаційного розтікання циліндричного шару рідини [12]. Аналізу моделей розтікання рідини на твердій поверхні присвячено роботу [13]. В ній на підставі порівняння розрахунків за моделлю [14] і експериментальних даних запропоновано модифікацію моделі. Недоліком такого підходу є те, що запропонована корекція залежить від умов, в яких були проведені експериментальні дослідження.

В [15] запропоновано апроксимацію часу просочення рідини у вигляді поліному третьої степені відносно глибини просочення. Побудовано оцінки коефіцієнтів полінома, як розв'язок задачі мінімізації відхилення розрахункових даних від експериментальних. Недоліком такого підходу є те, що коефіцієнти полінома не дозволяють розрахувати такі параметри просочення, як коефіцієнт гідравлічної провідності, коефіцієнт пористості ґрунту і показник капілярності.

В [16] наведено значення параметрів просочення для деяких типів ґрунту і рідин, але в загальному їх необхідно визначати в кожному випадку окремо, оскільки

ки вони залежать як від типу рідини, так і від стану ґрунту.

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 просочення рідини в глибину ґрунту при її аварійному розливі є визначення параметрів просочення.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є визначення параметрів просочення рідини в ґрунт, а саме: коефіцієнта пористості, коефіцієнта гідравлічної провідності і показника капілярності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- побудувати модель визначення параметрів просочення рідини в сипучий матеріал;
- розробити метод оцінювання параметрів просочення рідини;
- оцінити параметри просочування на прикладі сирової нафти і піску.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес просочення рідини в сипучий матеріал. Основною гіпотезою є наявність чіткої межі між сухим і вже змоченим матеріалом. Припускається, що просочення рідини в сипучий матеріал описується моделлю Грін-Ампт [17]. Параметри просочення визначаються як розв'язок задачі мінімізації суми квадратів відхилень розрахованих значень від експериментально отриманих. Для розв'язання задачі двовимірної оптимізації використовується метод градієнтного спуску. Розрахунки здійснюються із застосуванням середовища Delphi. Експериментальне визначення параметрів проводиться на прикладі просочення сирової нафти в пісок. В якості ємності для піску використовується скляний мірний циліндр. Проводиться відеофіксація процесу просочення. Час і глибина просочення визначаються на основі аналізу відеозапису.

5. Результати розробки метода визначення параметрів просочення рідини в ґрунт

5.1. Побудова моделі визначення параметрів просочення рідини в ґрунт

Час просочення розлитої рідини в ґрунт визначається рівнянням [15]:

$$t(z) = \frac{z}{K(1-\phi)} - \frac{c_0 + h_f}{K(1-\phi)^2} \ln \left(1 + \frac{1-\phi}{c_0 + h_f} z \right), \quad (1)$$

де z , t – глибина і час просочення відповідно; ϕ – коефіцієнт пористості ґрунту; c_0 – початковий рівень рідини на поверхні ґрунту; K – коефіцієнт гідравлічної провідності змоченого ґрунту; h_f – показник капілярності.

Коефіцієнт гідравлічної провідності і показник капілярності залежать від рідини, типу ґрунту і його стану. Це означає, що для практичного використання залежності (1) необхідно експериментальним шляхом визначити параметри просочення.

Нехай в моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n вимірюється глибина просочення z_1, z_2, \dots, z_n і товщина шару рідини на поверхні h_1, h_2, \dots, h_n . Тоді коефіцієнт пористості

може бути оцінено за формулою:

$$\phi = \frac{h_1 - h_n}{z_n - z_1}. \quad (2)$$

Для визначення коефіцієнта гідравлічної провідності K і показника капілярності h_f запишемо функцію похибки:

$$L = \sum_{k=1}^n (z_k - F(t_k))^2, \quad (3)$$

де $F(t)$ – розв’язок алгебраїчного рівняння (1). Тоді оцінка параметрів K , h_f зводиться до розв’язання задачі мінімізації:

$$L = \sum_{k=1}^n (z_k - F(t_k))^2 \rightarrow \min_{K, h_f}. \quad (4)$$

Значення K , h_f , що забезпечують мінімум функції (3), і будуть оцінками відповідних параметрів. Внаслідок неявного представлення функції $F(t)$ аналітичне розв’язання задачі (4) є неможливим. Тому доцільним є скористатися одним із чисельних методів оптимізації, наприклад, методом градієнтного спуску. Розглядаючи (4) як функцію $L(K, h_f)$, оберемо довільно початкові значення $K^{(0)}$, $h_f^{(0)}$ і будемо виконувати ітераційну процедуру:

$$(K^{(i+1)}, h_f^{(i+1)}) = (K^{(i)}, h_f^{(i)}) - \lambda_i \text{grad } L(K^{(i)}, h_f^{(i)}); \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad (5)$$

де λ_i – параметр;

$$\text{grad } L(K^{(i)}, h_f^{(i)}) = \left(\frac{\partial L}{\partial K}, \frac{\partial L}{\partial h_f} \right) \Big|_{(K^{(i)}, h_f^{(i)})}. \quad (6)$$

При цьому значення параметра λ_i підбирається шляхом розв’язання задачі одновимірної мінімізації:

$$L \left(K^{(i)} - \lambda_i \frac{\partial L}{\partial K} (K^{(i)}, h_f^{(i)}), h_f^{(i)} - \lambda_i \frac{\partial L}{\partial h_f} (K^{(i)}, h_f^{(i)}) \right) \rightarrow \min_{\lambda_i}. \quad (7)$$

Для розв’язання задачі (7) може бути використаний метод дихотомії. Ітераційний процес (5) продовжується, поки не буде виконано умову:

$$|K^{(i+1)} - K^{(i)}| < \varepsilon, \quad |h_f^{(i+1)} - h_f^{(i)}| < \varepsilon, \quad (8)$$

де $\varepsilon > 0$ – наперед обране значення. Внаслідок того, що функція $L(K, h_f)$ не може бути подана в явному вигляді, її частинні похідні, що входять до (5)–(7), апрокс-

симуємо скінченими приростами:

$$\frac{\partial L}{\partial K} (K^{(i)}, h_f^{(i)}) \approx \frac{L(K^{(i)} + \Delta, h_f^{(i)}) - L(K^{(i)}, h_f^{(i)})}{\Delta}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial L}{\partial h_f} (K^{(i)}, h_f^{(i)}) \approx \frac{L(K^{(i)}, h_f^{(i)} + \Delta) - L(K^{(i)}, h_f^{(i)})}{\Delta}, \quad (10)$$

де Δ – достатньо мала величина.

5.2. Розробка метода оцінювання параметрів просочення

Практичне використання побудованої моделі визначення параметрів просочення рідини в ґрунт зводиться до виконання наступної послідовності процедур.

1. У вертикальний мірний скляний циліндр насипається зразок ґрунту, що являє собою підстилаючу поверхню.

2. Наливається рідина, що досліджується, і проводиться відеофіксація процесу просочення.

3. Шляхом обробки відеозапису визначається товщина шару рідини на поверхні сипучого матеріалу h_k і глибина просочення z_k в обрані моменти часу t_k , $k=1, 2, \dots, n$.

4. Із отриманих результатів за формулою (2) обчислюється значення коефіцієнта пористості ϕ .

5. Будується функція цілі (3).

6. Довільно обираються початкові значення коефіцієнта гідравлічної провідності $K^{(0)}$ і показника капілярності $h_f^{(0)}$, покладається $i=0$.

7. За формулами (9), (10) обчислюються наближені значення частинних похідних.

8. Методом дихотомії розв'язується задачі одновимірної мінімізації (7).

9. Розв'язок λ_i задачі мінімізації (7) підставляється в (5), і обчислюються нові значення коефіцієнта гідравлічної провідності $K^{(i+1)}$ і показника капілярності $h_f^{(i+1)}$.

10. Якщо виконані умови (9), (10), то процес обчислень завершується і отримані значення $K^{(i+1)}$, $h_f^{(i+1)}$ приймаються в якості оцінок коефіцієнта гідравлічної провідності ґрунту і показника капілярності відповідно. В протилежному випадку покладаємо $i=i+1$ і переходимо до п. 7.

5.3. Оцінка параметрів просочення на прикладі сирої нафти і піску

Застосуємо наведену методу для визначення параметрів просочення сирої нафти в пісок. Результати обробки відеозапису процесу просочення наведені в табл. 1 [15].

Значення коефіцієнта пористості ϕ обчислюємо за формулою (2):

$$\phi = \frac{h_1 - h_n}{z_n - z_1} \approx 0,314. \quad (11)$$

Застосування методу градієнтного спуску до задачі мінімізації (4) дає значення коефіцієнта гідравлічної провідності і показника капілярності:

$$K=1,68 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}; h_f=0,95 \text{ м}. \quad (12)$$

Табл. 1. Залежність глибини просочення від часу

Час, t , с	Глибина просочення, z , см	Товщина шару на поверхні, h_0 , см
0	0	1,66
8	0,18	1,56
20	0,35	1,48
44	0,53	1,42
72	0,70	1,37
133	0,88	1,32
232	1,05	1,28
328	1,23	1,23
487	1,40	1,18
750	1,58	1,14
1030	1,75	1,09
1296	1,93	1,04
1598	2,10	1,00

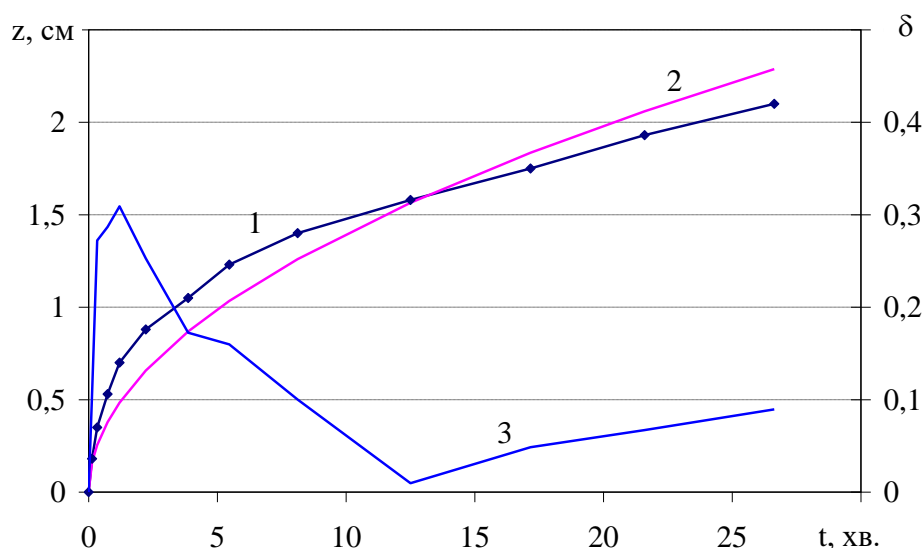


Рис. 1. Залежність глибини просочення сирої нафти в пісок від часу: 1 – експериментальні дані; 2 – результат розрахунку за формулою (1); 3 – відносна похибка (по правій осі)

На рис. 1 показано залежність глибини просочення сирої нафти в пісок від часу, отриману експериментально (табл. 1) і за формулою (1), в яку підставлені значення параметрів просочення ϕ , K , h_f .

6. Обговорення результатів розробки методу оцінювання параметрів просочення рідини в ґрунт

Динаміка просочення рідини в ґрунт дається виразом (1), який описує залежність часу просочення від глибини. Цей же вираз неявно задає зворотню залежність – глибину просочення від часу. Залежність (1) містить параметри просочення: коефіцієнт пористості ґрунту, коефіцієнт гідралічної провідності і показник капілярності. Ідея наведеного методу оцінювання параметрів просочення полягає в тому, щоб підібрати ці параметри таким чином, щоб розрахункове значення глибини просочення якнайменше відрізнялося від експериментально отриманих значень.

Наведений метод оцінки параметрів моделі просочення рідини вглиб ґрунту включає вимірювання глибини просочення в певні моменти часу, що робиться шляхом відеофіксації процесу просочення рідини в зразок ґрунту, насипаного в

скляний мірний циліндр. Після цього оцінка коефіцієнта пористості знаходиться безпосередньо із експериментальних даних за формулою (2). А для оцінки значень коефіцієнта гідравлічної провідності і показника капілярності будується і розв'язується задача мінімізації (4). В ній якості критерію вибору значень цих параметрів використовується мінімум суми квадратів відхилень експериментально визначених глибин просочення від розрахованих за формулою (1). Для розв'язання задачі мінімізації (4) застосовано метод градієнтного спуску, особливістю якого є використання перших частинних похідних (5) від функції цілі і зведення вихідної задачі до послідовності задач одновимірної мінімізації (7). Внаслідок неявного завдання залежності глибини просочення від часу значення частинних похідних в (5) замінено їх виразами у скінчених різницях (9), (10). В якості критерію закінчення ітераційного процесу підбору параметрів просочення використовуються умови (8).

В якості прикладу застосування наведеного методу було проведено оцінку параметрів просочення сирої нафти в пісок (табл. 1), в результаті чого були отримані оцінки (11), (12). Підстановка отриманих значень в залежність (1) і порівняння розрахованої глибини просочення з експериментально визначеною показує (рис. 1), що спочатку відносна похибка між експериментальними даними і результатами розрахунків зростає, досягаючи 30 %, а потім зменшується і після 8 хв. не перевищує 10 %.

Відзначимо, що показник капілярності і гідравлічна провідність є характеристиками пари «грунт – рідина». Типові значення коефіцієнта пористості лежать в діапазоні від 0,09 (асфальт) до 0,45 (пісок), гідравлічної провідності піску, глини, чорнозему – $(10^{-4} \div 10^{-8})$ м/с, показника капілярності – $(10^{-2} \div 1)$ м.

Обмеженням побудованої моделі є те, що задача мінімізації (4) включає в себе лише коефіцієнт гідравлічної провідності і показник капілярності, а коефіцієнт пористості ґрунту розраховується з інших міркувань. Врахування всіх трьох параметрів в єдиній задачі мінімізації дозволило би покращити збіжність розрахункових значень з результатами експерименту.

Таким чином, перспективи подальших досліджень пов'язані з введенням коефіцієнта пористості ґрунту до задачі мінімізації (4).

Запропонований метод визначення параметрів просочення може бути використаний при практичному застосуванні моделі розтікання і просочення рідини на ґрунті [18].

7. Висновки

1. Побудовано модель визначення параметрів просочення рідини в ґрунт: коефіцієнта пористості ґрунту, коефіцієнта гідравлічної провідності і показника капілярності. Модель спирається на аналітичну залежність часу просочення рідини від глибини. Це співвідношення є вихідним для отримання неявно заданої залежності глибини просочення від часу. Величини параметрів просочення визначаються як розв'язок задачі оптимізації, критерієм якої є мінімум суми квадратів відхилень розрахованих значень глибини просочення від експериментально отриманих.

2. Запропоновано метод оцінки параметрів моделі просочення рідини вглиб ґрунту, яка включає вимірювання глибини просочення в певні моменти часу, що робиться шляхом відеофіксації процесу просочення рідини в зразок ґрунту, насипаного в скляний мірний циліндр. Після цього із експериментальних даних розра-

ховується коефіцієнт пористості ґрунту. Для оцінки значень коефіцієнта гідравлічної провідності і показника капілярності розв'язується задача мінімізації. Для знаходження розв'язку задачі застосовано метод градієнтного спуску, який, в свою чергу, зводиться до послідовності задач одновимірної оптимізації, які розв'язуються методом дихотомії.

3. На прикладі просочення сирої нафти в пісок знайдено оцінки параметрів просочення. Експеримент проводився протягом 27 хв., глибина просочення складала 2,1 см. При цьому були отримані значення коефіцієнта пористості ґрунту $\phi=0,314$, коефіцієнта гідравлічної провідності $K=1,68 \cdot 10^{-7}$ м/с і показника капілярності $h_f=0,95$ м. Показано, що спочатку відносна похибка між експериментально визначеною і розрахованою глибиною просочення зростає, досягаючи 30 %, а потім зменшується і після 8 хв. не перевищує 10 %. Більші значення відносної похибки в перші хвилини дослідження обумовлені високою швидкістю просочення внаслідок більшого тиску шару рідини і меншого опору ґрунту.

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. Huang W., Shuai B., Zuo B., Xu Y., Antwi E. A systematic railway dangerous goods transportation system risk analysis approach: The 24 model. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 61. P. 94–103. doi: 10.1016/j.jlp.2019.05.021

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. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2019. Vol. 85. P. 252–258. doi: 10.1016/j.tust.2018.12.013

6. 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

7. 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

8. 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. Available online: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6849>

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. Abramov Y., Basmanov O., Oliinik V., Khmyrov I. 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
16. Ramli H., Zabidi H. A. Effect of oil spill on hydraulic properties of soil. *Malaysian construction research journal*. 2015. Vol. 49. Available online: https://www.academia.edu/download/62252229/MCRJ_V19N2_520200302-87581-109jtez.pdf
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. Абрамов Ю. О., Басманов О. Є., Олійник В. В. Моделювання розтікання горючої рідини внаслідок аварії на залізничному транспорті. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2021. Вип. № 1(33). С. 30–42. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-3

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

METHOD OF EXPERIMENTAL DETERMINING THE PARAMETERS OF IMPREGNATING A LIQUID INTO THE SOIL

The object of the study is the process of liquid impregnation into bulk material. It was built a mathematical model that determines the parameters of impregnation of liquid into the soil: porosity coefficient, hydraulic conductivity coefficient and suction head. It is assumed that the process of liquid infiltration into the soil is described by the Green-Ampt model. The feature of the model is a boundary between wet and dry soil. The main idea of the method is to choose the impregnation parameters in such a way that the calculated value of the impregnation depth differs as little as possible from the experimentally obtained values. The methodology for estimating the parameters of the model of impregnating the liquid into the soil is given. First, the process of liquid impregnation into a soil sample in a

Environmental Protection Technologies. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-36-2

glass measuring cylinder is videotaped. Then the depth of liquid penetration is measured at certain moments of time. The estimate of the porosity coefficient is obtained directly from the experimental data. It was built a minimization problem for estimating the values of the coefficient of hydraulic conductivity and the suction head. The minimum of the sum of the squares of deviations between experimentally determined impregnation depths and the calculated ones was used as a criterion for determining parameter values. The minimization problem is solved by using the gradient descent method. The values of the partial derivatives are approximated by their expressions in finite differences. As an example of the use of proposed method, the parameters of the impregnation of crude oil into sand were evaluated. Comparing the calculated impregnation depth and the experimentally determined one indicates a good coincidence of the results. The proposed method of determining the infiltration parameters can be used in the practical application of the liquid spreading and infiltrating model.

Keywords: liquid spillage, impregnation parameters, Green-Ampt model, porosity coefficient, bulk material

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. Huang, W., Shuai, B., Zuo, B., Xu, Y., Antwi, E. (2019). A systematic railway dangerous goods transportation system risk analysis approach: The 24 model. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 61, 94–103. doi: 10.1016/j.jlp.2019.05.021
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. 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
7. 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
8. 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 online: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6849>
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 investigating 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. Abramov, Y., Basmanov, O., Oliinik, V., Khmyrov, I. (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
16. Ramli, H., Zabidi, H. A. (2015). Effect of oil spill on hydraulic properties of soil. *Malaysian construction research journal*, 49. Available online: https://www.academia.edu/download/62252229/MCRJ_V19N2_520200302-87581-109jtez.pdf
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. Abramov, Y., Basmanov, O., Oliimik V. (2021). Modeling the spilling of flammable liquid in a case of railway accident. *Problems of emergency situations*, 1(33), 30–42. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-3

Надійшла до редколегії: 17.10.2022

Прийнята до друку: 16.11.2022