

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОСОЧЕННЯ РІДИНИ В СИПУЧИЙ МАТЕРІАЛ

Математичний опис процесу просочення рідини в сухий сипучий матеріал спирається на модель Грін-Амт [1]. Особливістю моделі є розгляд процесу просочування як руху вниз межі між вже змоченим і ще сухим ґрунтом. Із використанням закону Дарсі побудовано систему звичайних диференціальних рівнянь першого порядку. Розв'язок системи диференціальних рівнянь отримано у вигляді залежності часу від глибини просочення [2]:

$$t(z) = \frac{z}{K(1-\phi)} - \frac{c_0 + h_f}{K(1-\phi)^2} \ln \left(1 + \frac{1-\phi}{c_0 + h_f} z \right), \quad c_0 - \phi z > 0. \quad (1)$$

де t , z – час і глибина просочення відповідно; K – гідравлічна провідність змоченого ґрунту; ϕ – коефіцієнт пористості ґрунту; c_0 – початкова товщина шару рідини на ґрунті; h_f – показник капілярності

Залежність (1) містить такі параметри, як коефіцієнт гідравлічної провідності, коефіцієнт пористості ґрунту і показник капілярності. Ці параметри залежать від рідини, що просочується, а також від типу сипучого матеріалу і його стану (вологості, спресованості). Якщо всі ці параметри відомі, то їх підстановка в (1) дозволяє визначити час просочення на задану глибину, як це зроблено в [1]. Але з практичної точки зору ці параметри не є відомими априорі.

Безпосередня оцінка параметрів, що входять до співвідношення (1), наприклад методом найменших квадратів, ускладнена внаслідок нелінійного характеру залежності від зазначених параметрів.

Відзначимо, що для малих значень глибини просочення ($z < c_0 + h_f$) розвинення функції $\ln(1+x)$ в ряд Тейлора перетворює (1) на

$$t(z) = \frac{1}{2K(c_0 + h_f)} z^2 - \frac{1-\phi}{3K(c_0 + h_f)^2} z^3 + \frac{(1-\phi)^2}{4K(c_0 + h_f)^3} z^4 - \dots \quad (2)$$

Обмежуючись першими двома членами ряду, отримаємо залежність часу просочення від глибини у вигляді

$$t(z) \cong az^2 + bz^3. \quad (3)$$

Невідомі коефіцієнти a , b будемо шукати як значення, що забезпечують мінімум суми квадратів відхилень, розрахованих за формулою значень часу $t(z_n)$ від експериментальних значень t_n :

$$L = \sum_{i=1}^n (t(z_i) - t_i)_{a,b}^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Підстановка (3) в (4) дає задачу мінімізації:

$$L = \sum_{i=1}^n (az_i^2 + bz_i^3 - t_i)_{a,b}^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

Задача (5) має єдиний розв'язок, який визначається необхідними умовами екстремуму:

$$\frac{\partial L}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (az_i^2 + bz_i^3 - t_i) z_i^2 = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (az_i^2 + bz_i^3 - t_i) z_i^3 = 0. \quad (7)$$

Розв'язуючи систему лінійних рівнянь (6), (7) відносно a, b, отримаємо

$$a = \frac{c_{13}c_{22} - c_{23}c_{12}}{c_{11}c_{22} - c_{21}c_{12}}; \quad b = \frac{c_{11}c_{23} - c_{13}c_{21}}{c_{12}c_{21} - c_{11}c_{22}}, \quad (8)$$

де

$$c_{11} = \sum_{i=1}^n z_i^4; \quad c_{12} = \sum_{i=1}^n z_i^5; \quad c_{13} = \sum_{i=1}^n t_i z_i^2; \quad (9)$$

$$c_{21} = \sum_{i=1}^n z_i^5; \quad c_{22} = \sum_{i=1}^n z_i^6; \quad c_{23} = \sum_{i=1}^n t_i z_i^3. \quad (10)$$

Таким чином, формули (8)–(10) визначають коефіцієнти апроксимуючого полінома (3). Експериментальне дослідження проведено на прикладі просочення сирої нафти в пісок. Для цього в вертикальній мірній скляний циліндр насипався пісок. Після цього наливалася рідина і проводилася відеофіксація процесу просочення. Шляхом обробки відеозапису визначалася глибина просочення і відповідний час. Результати дослідження показують, що залежність між товщиною шару рідини на поверхні піску і глибиною просочення має лінійний характер. На рис. 1 наведено експериментальну залежність часу від глибини просочення та її апроксимацію у вигляді (3); 3 – відносна похибка апроксимації (по правій вісі).

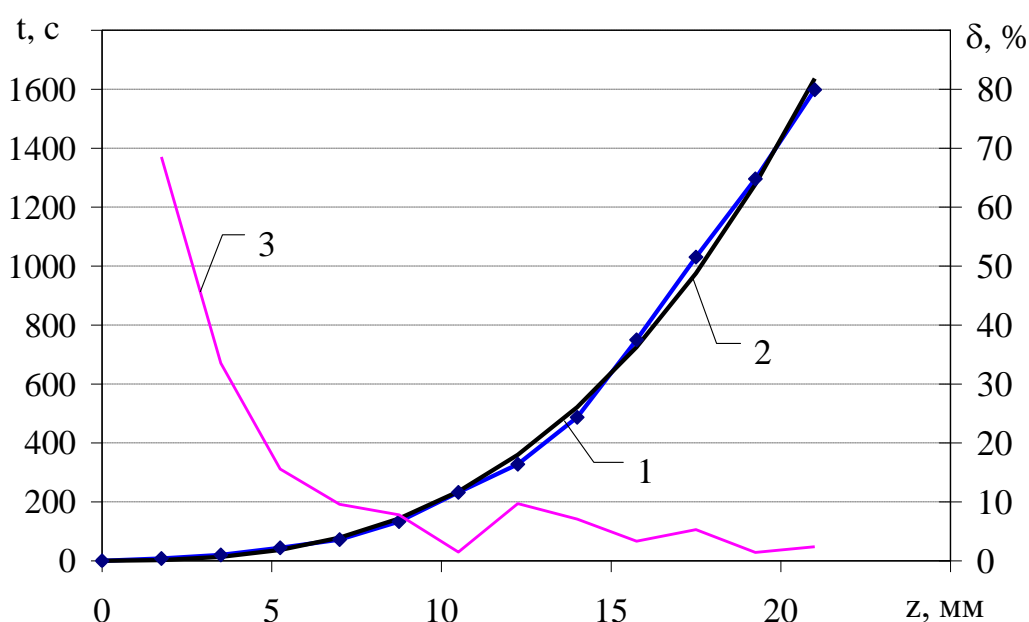


Рис. 1. Залежність часу від глибини просочення: 1 – експеримент; 2 – апроксимація у вигляді (3); 3 – відносна похибка апроксимації (по правій вісі)

Аналіз залежностей на рис. 1 свідчить про те, що після першої хвилини після розливу рідини залежність часу від глибини просочення задовільно апроксимується поліномом (3). Похибка такої апроксимації не перевищує 10% і має тенденцію до спадання із часом.

Таким чином, запропонований метод експериментального визначення параметрів просочення рідини в сипучий матеріал полягає в:

- заміні точного розв'язку (1) задачі просочення рідини наближеним розв'язком у вигляді полінома (3);
- розрахунку коефіцієнтів апроксимуючого полінома за (9), (10), отриманими шляхом використання метода найменших квадратів;
- розрахунку коефіцієнта пористості.

З практичної точки зору, поліном (3) з коефіцієнтами, що визначаються формулами (8)–(10) дозволяє визначити кількість рідини, яка встигне просочитися вглиб підстилаючої поверхні до того, як розлив буде ліквідовано. Це, в свою чергу, дає можливість оцінити товщину забрудненого шару ґрунту.

До недоліків запропонованого метода слід віднести неможливість визначення таких параметрів, як коефіцієнт гідравлічної провідності і показника капілярності. Отже перспективи подальших досліджень пов'язані з їх визначенням шляхом застосування метода найменших квадратів безпосередньо до залежності (1). Також слід відзначити, що для певного сипучого матеріалу і певної рідини, коефіцієнт гідравлічної провідності і показник капілярності пов'язані з коефіцієнтом пористості.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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. 4/10 (118). P. 24-29

O. Basmanov, Doctor of technical science, Professor, National University of Civil Defence of Ukraine,

V. Oliinik, Candidate of technical science, Associated Professor, National University of Civil Defence of Ukraine

EXPERIMENTAL DETERMINING THE PARAMETERS OF LIQUID INFILTRATION IN BULK MATERIAL

An experimental study was conducted on the example of impregnation of crude oil in the sand. To this end, sand was poured into a vertical measuring glass cylinder. After that, the liquid was poured and a video recording of the impregnation process was carried out. By processing the video recording, the depth of impregnation and the corresponding time were determined. The results of the study show that the relationship between the thickness of the liquid layer on the surface of the sand and the depth of impregnation is linear in nature. By expanding the logarithmic function contained in the solution to the system of differential equations into the Taylor series, a polynomial dependence of time on the depth of impregnation was established. To determine the coefficients of the polynomial based on the experimental data, the least squares method was used. In this case, the approximation error after the first minute after spilling does not exceed 10 %.