

УДК 622:624:550.82

Гайко Г.І., д.т.н., проф., Матвійчук І.О., аспірант  
НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

## **ПОСТАНОВКА ІМОВІРНІСТНОЇ ЗАДАЧІ ОЦІНКИ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА МІСЬКІ ПІДЗЕМНІ СПОРУДИ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО**

Обсяги проектування та будівництва підземних об'єктів в світі постійно зростають, що викликано різким зростанням населення мегаполісів в останні роки. Більш активному освоєнню підземного простору сприяє висока вартість землі в мегаполісах й можливість ефективного вирішення низки актуальних міських проблем (територіальних, транспортних, енергетичних, екологічних тощо).

Для оцінки сприятливості геологічного середовища урбанізованих територій до будівництва комплексів підземних споруд створена методика їх типізації, яка враховує змінність властивостей не тільки поверхневого шару дослідної території (що є нагальною потребою для планування наземного будівництва), а й усієї товщі геологічного середовища [1]. Під типізацією геологічного середовища слід розуміти виділення таких його зон, які характеризуються різними умовами протікання геологічних і техногенних процесів і мають різну здатність реагувати на інженерно-господарське освоєння території, що розкривається специфікою взаємодії між геологічним середовищем і штучними елементами (спорудами).

Розглядалися групи впливу природничих і техногенних факторів. До переліку природничих факторів відносили: тип геологічної будови (вік, генезис, літологічний склад відкладів, форми дислокацій); морфологію рельєфу (висоти поверхні, розчленованість, крутість схилів); тип і склад товщі ґрунтів та порід; їх механічні характеристики та властивості, а також їх згортки з урахуванням впливу вологості; геологічну порушенність масиву; геодинамічну обстановку; гідродинамічні умови. До техногенних (геоурбаністичних) факторів відносили: статичне навантаження (щільність і поверховість забудови); зовнішні динамічні впливи (інтенсивність руху транспорту, промислові вібрації, вибухові роботи тощо); наявність і параметри підземних споруд (тип за призначенням, конструкція, розміри, форма); способи ведення геобудівельних робіт; щільність і стан гідротехнічних і теплотехнічних споруд; наявність і характер техногенних відкладів. Принцип типізації дозволяє простежити зміни властивостей геологічного середовища на території міста. Виділення проводиться на основі суми балів прийнятих факторів впливу у визначених діапазонах зміни факторів. Такий підхід є універсальним і дає можливість об'єднати за своїм значенням природничі та техногенні складові для оцінки сприятливості тих чи інших зон геологічного середовища підземному

будівництву. При цьому виділялися стани: вельми сприятливий, сприятливий, недостатньо сприятливий і несприятливий.

Слід зауважити, що значна кількість факторів має імовірнісну природу. Невизначеність, для якої можуть бути встановлені різні категорії: просторова мінливість і геологічні фактори, помилки, що виникають при змінах і оцінках геомеханічних параметрів, включаючи їх статистичний розподіл, неповний облік навантажень і упущення, що виникли в ході проектування і будівництва. Кожен підземний об'єкт має вартість будівництва, яка визначається спочатку його характеристиками і ринком, і коректується в ході будівництва зустрінутими геологічними умовами. Тому повинні бути збалансовані витрати на докладне вивчення цих умов і запобігання ризикам або на ліквідацію їх наслідків. В іншому випадку необхідні витрати все одно будуть зроблені або навіть перевищені, але з конфліктними наслідками для учасників будівництва [2].

Останнім часом для вирішення широкого спектру завдань в геомеханіці застосовується метод Монте-Карло, завдяки якому оцінюється нестабільність фізико-технічних властивостей ґрунтів; надійність основ фундаментів; стійкість бортів кар'єрів та схилів; розрахунок фільтрації води через ґрунтові греблі; моделювання фільтрації розчинів через підірваний рудний масив; визначення імовірнісних характеристик активного тиску ґрунту; розрахунок надійності споруд на пружної основі тощо [3–7]. Вважаємо за доцільне застосувати метод Монте-Карло для більш точної оцінки імовірнісної природи факторів впливу при районуванні (типізації) міських територій для підземного будівництва.

Сутність методу Монте-Карло [8] полягає в багаторазовому розрахунку вихідних параметрів системи або моделі:

$$y_i = f(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, \dots, x_{ni}), i \in 1, N \quad (1)$$

під впливом вхідних випадкових параметрів  $x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, \dots, x_{ni}$  із заданими законами розподілу. В результаті виходить вихідний інформаційний масив  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_N$ , за яким встановлюються розкид вихідних даних (варіаційний розмах), закономірність їх розподілу та характеристики працездатності системи - ризик,  $P$ , або надійність  $P_n = 1 - P$ . Багаторазове завдання вхідних випадкових параметрів  $x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, \dots, x_{ni}$  виконується в процесі «розіграшу випадкових чисел». Основою цього процесу є генерація випадкових чисел з рівномірним в інтервалі  $(0; 1)$  розподілом за спеціальними таблицями або датчиками ЕОМ, генеруючими отримання рівномірно розподілених випадкових чисел на відрізьку  $(a; b)$  за формулою:

$$X_i = a + (b - a)x_i \quad (2)$$

де  $X_i$  – рівномірно розподілене випадкове число на інтервалі  $(a; b)$ ;

$x_i$  – рівномірно розподілене випадкове число на інтервалі  $(0; 1)$ .

При необхідності модель повинна включати кореляцію між змінними. У таких випадках незалежна генерація випадкових параметрів не підходить. Для корельованих параметрів можуть використовуватися наступні рівняння:

$$N_1 = \sqrt{-2\ln R_1} \cos(2\pi R_2) \quad (3)$$

$$N_2 = \sqrt{-2\ln R_1} \sin(2\pi R_2) \quad (4)$$

$$N_2^* = N_1 \rho_{xy} + N_2 \sqrt{1 - \rho_{xy}^2} \quad (5)$$

$$x_1 = \mu_x + N_1 \sigma_x \quad (6)$$

$$y_1 = \mu_y + N_2^* \sigma_y \quad (7)$$

де  $R_1$  і  $R_2$  є незалежними випадковими числами від 0 до 1 з рівномірним розподілом.

$N_1$  і  $N_2$  – незалежні випадкові числа, нормально розподілені із середнім 0 і стандартним відхиленням ( $\sigma$ ) 1.

$N_2^*$  – випадкове число, пов'язане з  $N_1$ .

$\rho_{xy}$  – коефіцієнт кореляції між випадковими величинами  $x$  і  $y$ .

$\mu_x, \sigma_x, \mu_y, \sigma_y$  – середнє і стандартне відхилення змінних  $x$  і  $y$ .

В залежності від точності результатів які ми хочемо отримати, кількість ітерацій може бути визначена за формулою:

$$n = \left(\frac{d}{a}\right)^2 \frac{1-p}{p} \quad (8)$$

де  $n$ - кількість ітерацій;

$d$ - нормальне стандартне відхилення за таблицею 1;

$a$ - допустима помилка;

$p$ - імовірність відмови.

Імовірність відмови оцінюється як  $p = 0,1$ , розраховують кількість імітацій Монте-Карло, необхідних для оцінки ймовірності в діапазоні  $\pm 20\%$  навколо оціненого  $p$  з достовірністю 90%.

$$d = 1,28, \alpha = 0,2 \text{ і } p = 0,1 \quad n = \left(\frac{1,28}{0,2}\right)^2 \frac{1-0,1}{0,1} = 369$$

За результатами розрахунку бачимо, що мінімальна кількість імітацій повинна бути не менше 369. В разі необхідності підвищення надійності даних кількість обчислень може суттєво зростати.

Таблиця 1

Нормальне стандартне відхилення

Відсоток довіри (%)	Нормальне стандартне відхилення (d)
80	1,28
85	1,44
90	1,64
95	1,96
99	2,57

Для генерації нормально розподілених випадкових чисел або випадкових чисел з іншими законами розподілу використовуються формули перетворення рівномірно розподілених випадкових чисел  $r_i$  [1, 3].

Значення ймовірності, вибране генератором випадкових чисел, не має зв'язку ні з попереднім, ні з подальшим вибором. Механізм вибору випадкових значень параметра управляється тільки формою розподілу ймовірностей. Обчислювані параметри знаходяться в межах між вихідними значеннями  $a$  і  $b$ . Зважаючи на це важливим є вибір виду розподілу ймовірності, який проводиться суб'єктивно на основі досвіду попередніх досліджень або думки експертів. Отримані таким чином відомості дозволяють встановити середнє значення розподілу і його дисперсію (розкид) при нормальному розподілі.

Таким чином, застосування розглянутої методики до змінних факторів, що визначають ступінь сприятливості міському підземному будівництву, дозволить уточнити методику районування (типізації) геологічного середовища урбанізованих територій.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гайко Г.І., Кріль Т.В. Типізація геологічного середовища урбанізованих територій при освоєнні підземного простору // XIV міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях». – Київ, 2015. – С. 173-180.

2. Кауфман Л.Л., Лысиков Б.А. Геотехнические риски подземного строительства: [Монография] / Под. общ. ред. Л. Л. Кауфмана. – Донецк: Норд-Пресс, 2009. – 362 с.

3. Потапов, В. Д. Имитационное моделирование производственных процессов в горной промышленности / В. Д. Потапов, А. Д. Яризов. – М.: Высшая школа, 1981. – 191 с.

4. Смолич С.В., Смолич К.С. Решение горно-геологических задач методом «Монте-Карло»: Учеб. пособие. – Чита: ЧитГУ, 2004. – 103 с.

5. Бугров А. К. Определение вероятностных характеристик активного давления грунта методом Монте-Карло/ А. К. Бугров, В. Г. Шилин // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2002. – № 5 (Интернет-журнал <http://www.georec.spb.ru/mag/2002n5/index.htm>).

6. Бугров А. К. Расчет надежности по осадке упругопластического основания методом статистических испытаний / А. К. Бугров, В. Г. Шилин // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2000. – № 3 (Интернет-журнал <http://www.georec.spb.ru/mag/2000n3/index.htm>).

7. Таиров, Т.Н. Оценка надежности оснований шахтных копров по методу Монте-Карло Текст. / Таиров Т. Н., Половов Б. Д. // Известия вузов. Горный журнал. 2008. – №3. – С. 73-81.

8. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапиро. – М.: Мир, 1969. – 395 с.