УДК 519.248: 001.89

МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОТЕХНІЧНОЇ СИТУАЦІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕМЕНТІВ МІСЬКОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Собуцький В.О.
Національний університет водного господарства
та природокористування

Бура В.С.
Управління з питань надзвичайних ситуацій та
цивільного захисту населення Рівненської облдержадміністрації
м. Рівне, Україна

АНОТАЦІЯ: Приведено алгоритми вирішення типових задач із апріорного ранжирування уражальних чинників джерел техногенних надзвичайних ситуацій, прогнозування геотехнічної ситуації (ГС) в системі елементів міської інфраструктури (ЕМІ) і пошуку шляхів реалізації технічних рішень щодо сталого функціонування категорованих міст та об’єктів економіки.

АННОТАЦИЯ: Приведены алгоритмы решения типовых задач по априорному ранжированию факторов источников техногенных чрезвычайных ситуаций, прогнозирования геотехнической ситуации (ГС) в системе элементов городской инфраструктуры (ЭГИ) и поиска путей реализации технических решений по стабильному функционированию категорированных городов и объектов экономики.

ABSTRACT: The brought algorithms of the decision of the standard problems on a priori ranking harmful factors of man-caused sources emergency situation, forecasting’s geotechnical situation in system of the main elements of the urban infrastructure for of the ways to realization of the technical decisions on stable operation provision and blackout category city and object of the economy are presented.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: інженерно-технічні заходи забезпечення експлуатаційної надійності, геотехнічна ситуація, математичне планування експерименту.

Пізнавальна цінність математичних моделей, як засобу автоматичного керування системою, її глибокого пізнання й створення теорії є предметом активних досліджень науково-дослідних лабораторій Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне) [1].

Практичний інтерес у розв'язуванні будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту представляють цифрові методи оптимізації, що реалізуються за допомогою сучасних комп'ютерних технологій [2].

На думку французького філософа Е. Мейєрсона (1859 - 1933), теорія пізнання сутності процесів, що відбуваються в досліджуваних системах, має будуватись не на результатах аналізу думок і тлумачень чисто логічного порядку, а лише відповідно до розгляду та інтуїтивного сприйняття констатацій емпіричного порядку. "Констатація емпіричного", згідно Е. Мейєрсону, складається із сукупності існуючих наукових результатів та їх історії [3].

Результат усіх закономірностей, яким підпорядковуються дані представленого експерименту побудови математичної моделі геотехнічної ситуації в системі ЕМІ, з тлумачень, логічно доведених у межах досліджуваної підсистеми аналітично-експертного забезпечення цивільного захисту, й буде головною метою запропонованого наукового дослідження.

Пропонована методологія локальної теорії аналітично-експертного забезпечення цивільного захисту передбачає використання великої кількості експериментальних даних і полягає в теоретичному вираженні системи інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту, а також вказує на умови, яким мають задовольняти всі рівняння, визначені експериментальними фактами. Розроблена функціональна структура системи інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту містить відповідний математичний апарат для управління ГС за критеріями ефективності, а також забезпечує синтез її локальних теорій, а саме:

- довідково-інформаційного забезпечення (збір та обробка вихідних даних, зонування територій за характером негативної дії уражальних чинників);
- інженерно-вишукувального забезпечення (пошук та обґрунтування рішень щодо постачання категорованих міст та об'єктів економіки, розміщення підприємств сфери виробництва будівельних конструкцій, виробів і матеріалів, розвитку позаміської зони, інженерного забезпечення);
- проектного забезпечення (планування й забудова міст, населених пунктів і об'єктів економіки з урахуванням вимог Норм проектування інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту);
- аналітично-експертного забезпечення (прогнозування ГС, пошук оптимального варіанту реалізації інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту в сфері містобудування).

Інженерно-технічні заходи забезпечення цивільного захисту (ІТЗ ЦЗ) – це комплекс прогнозних, аналітично-експертних, інженерно-вишукувальних і проектних робіт та довідково-інформаційних, консультативних і посередницьких послуг, що спрямовані на забезпечення сталого функціонування галузей національної економіки України в особливий період та убезпечення в умовах техногенних надзвичайних ситуацій.

Мета системного підходу до вирішення задач ІТЗ ЦЗ в галузі містобудування полягає в керуванні системою ЕМІ шляхом формулювання мети, виявлення особливостей та параметрів системи, від яких залежить досягнення мети, визначення показників і критеріїв ефективності, побудови математичної моделі та розробки на її основі алгоритмів і програм визначення оптимальних значень уражальних чинників.

Після вивчення якісної структури досліджуваного процесу, виявлення і виключення чинників, що не чинять істотного впливу на критерії й показники ефективності, установлення обмежень й регульованих чинників, системний аналіз припускає математичне моделювання, що дозволяє кількісно виразити характер й ступінь впливу окремих елементів системи, а також їх взаємодію.

Викладена локальна теорія аналітично-експертного забезпечення цивільного захисту (АЕЗ ЦЗ) містить методологію багатофакторного прогнозування геотехнічної (ГС) в системі ЕМІ на основі математико-статистичного моделювання.

Показником І-ї групи задач оптимізації підсистеми АЕЗ ЦЗ є системне прогнозування ГС, а ІІ-ї групи – пошук оптимального варіанту реалізації ІТЗ ЦЗ в сфері містобудування. Прогнозування ГС відноситься до числа погано організованих або так званих дифузних підсистем, характерними рисами яких є неможливість чіткого виділення окремих явищ і необхідність урахування багатьох різнорідних чинників. Для дифузних підсистем в умовах неповного знання механізму всіх явищ, що відбуваються в них, особливо ефективним є статистичний і кібернетичний методи дослідження.

Статистичний метод дозволяє розробляти рекомендації з оптимальної поведінки підсистеми в умовах невизначеності, а також представляти експериментальний матеріал у стандартній формі та здійснювати "згортання інформації" у формі аналітичного виразу – рівняння регресії. Це особливо важливо, коли об'єм інформації швидко зростає і необхідне компактне, але разом із тим, достатньо повне її викладення.

Кібернетичний метод розкриває, насамперед, функціональні залежності підсистеми від середовища, абстрагуючись від внутрішніх причинно-наслідкових зв'язків, тобто використовує відомий принцип "чорного ящика". Кібернетичному моделюванню властива єдність функціонального підходу та оптимізації як засобу одержання даних для найкращого керування підсистемою.

Математичне планування експерименту (МПЕ) в теорії АЕЗ ЦЗ проводиться в три етапи:

- попереднє вивчення ГС як об’єкта дослідження (постановка завдання, збір і обробка апріорної інформації, висування робочої гіпотези; вибір параметрів оптимізації, незалежних змінних і обмежень; попередній експеримент);

- побудова відповідної математичної моделі та її інтерпретація;

- здійснення, за необхідності, технічної реалізації отриманих результатів.

Завдання математичного моделювання ГС зводиться до одержання залежності, що характеризує зв’язок між параметром оптимізації $(R_{У.В}{}^0/q^{1/3})$ і незалежними змінними X_k (чинниками), яку можна аналітично представити у вигляді функції:

$$R_{У.В}{}^0/q^{1/3} = \varphi(H/q^{1/3}, q, X_м, ..., X_k), \text{ м/т}^{1/3}, \tag{1}$$

де $R_{У.В}{}^0/q^{1/3}$ – приведений радіус зони виходу з ладу об‘єкту системи за ударною хвилею:

$$R_{У.В}{}^0/q^{1/3} = \sum_{i=1}^{10}(H/q^{1/3})_i + q + X_м \rightarrow max, \text{ м/т}^{1/3}, \tag{2}$$

$H/q^{1/3}$ - приведена висота ядерного вибуху i-го виду з урахуванням умовної потужності вибуху (q) або інших незалежних змінних

$$40 \geq H/q^{1/3} \geq (-40), \text{ м/т}^{1/3}, \tag{3}$$

де q - калібр ядерного боєприпасу

$$q = 10^8 = const., \text{ т}; \tag{4}$$

$X_м$ - метеоумови середньої смуги (відкрита місцевість, літо, дуже слабка мряка, видимість 1…2 км);

X_k – незалежні змінні I-ї групи задач оптимізації підсистеми АЕЗ ЦЗ;

n - кількість видів ядерних вибухів, за їх висотою (глибиною) від поверхні землі (води) та характеристик середовища.

Для якісного виконання завдань із прогнозування ГС необхідно розрахувати значення величини приведеного радіусу зони виходу з ладу об’єкту системи $(R_{У.В}{}^0/q^{1/3})$ за дією всіх уражальних чинників, із прив’язкою до домінуючого – надмірного тиску у фронті повітряної ударної хвилі $(\Delta p_ф)$:

$$\Delta p_ф \rightarrow min., \text{ кг/см}^2. \tag{5}$$

Невідома функція відгуку адекватно описується поліноміальним рівнянням другого порядку:

$$R_{У.В}{}^0/q^{1/3} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{11}\beta X_i + \sum_{i=1}^{11}\beta_i X_i^2 + \sum_{i\neq j}^{11}\beta_{ij}X_iX_j + ... , \text{ м/т}^{1/3}. \tag{6}$$

Вид і показник степеню полінома вибираються або на підставі теоретичного аналізу або апріорі, а потім уточнюються статистично. Оцінки коефіцієнтів регресії ***(β)*** поліноміальних моделей можуть бути знайдені на основі експерименту.

Відповідно до сучасної математичної теорії експерименту найбільш вдале поєднання статистичного й кібернетичного підходів до дослідження складних дифузних підсистем має місце в методах МПЕ, що на цей час досить добре розроблені стосовно різних галузей науки і техніки, у тому числі й будівельних технологій.

Якщо на стадії одержання математичних моделей дифузних підсистем можливе абстрагування від складних причинно-наслідкових зв'язків, то далі аналіз моделей дозволяє значною мірою розкрити ці зв'язки і дослідити сутність процесів, що відбуваються в підсистемі. Пізнавальна цінність математичних моделей полягає у тому, що вони є засобом не тільки автоматичного керування підсистемою АЕЗ ЦЗ, але й засобом її глибокого пізнання та створення теорії [2].

Результат усіх закономірностей, яким підпорядковуються дані представленого експерименту побудови математичної моделі ГС, із тлумачень, логічно доведених у межах досліджуваної системи, і складає головну мету наукового дослідження. На основі апріорної інформації на першому етапі МПЕ відібрано 11 чинників, що чинять вплив на ГС в системі ЕМІ. Для ранжирування уражальних чинників застосувався метод формалізації згідно літературних даних.

За результатами ранжування методом формалізації згідно літературних даних побудовано середню апріорну діаграму рангів впливу розглянутих чинників на ГС в системі ЕМІ при обраних межах їх зміни (рис. 1).

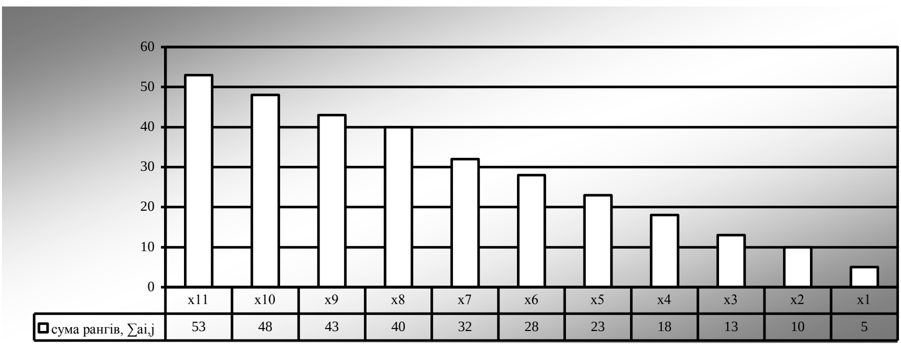

Рис. 1. Середня апріорна діаграма рангів впливу чинників на ВПС

Аналіз діаграми рангів показує, що розподіл чинників є нерівномірним і близьким до експоненціального. Це дозволяє виділити безперечно основні уражальні чинники, а частину віднести до так званого “шумового поля”. До таких найбільш суттєвих чинників, що впливають на ГС в системі ЕМІ можна віднести: надмірний тиск у фронті повітряної ударної хвилі ***($\Delta P_ф$)***, тиск сейсмовибухових і сейсмічних хвиль у ґрунті ***(σ)***, а також тиск у фронті підводної ударної хвилі ***(p_m)***. Найслабшим чинником за літературними даними стала часова функція напруженості електричного поля ***(E(t))***.

На другому етапі МПЕ, були вибрані основні критерії оптимізації вихідного параметру ***($R_{У.В}{}^0/q^{1/3}$)*** підсистеми АЕЗ ЦЗ в системі ЕМІ, а саме:

$C_p{}^0$ – ступінь руйнування об’єкту;

p^0 – ймовірність ураження об’єкту, (%);

$к^0$ – коефіцієнт послаблення випромінювання захисною товщею об’єкту;

$Q_n{}^0$ – середня густина радіоактивного забруднення поверхонь об’єкту, (розп/хв·см^2);

$c_φ$ – коефіцієнт опору тиску газового потоку захисної товщі об’єкту;

N_e – концентрація електронів у місці підвищеної іонізації, (1/см^3);

$E^B{}_{МАКС}$ – максимальне значення вертикальної складової напруженості електричного поля, (В/м),

визначені експериментальним шляхом, залежно від потужності та висоти вибуху, віддалення об’єкту від центру (епіцентру) вибуху, розміру і стійкості об’єкту до дії уражальних чинників, його розташування на місцевості, метеорологічних умов, характеру рельєфу місцевості тощо [4].

Сукупність усіх значень, які може приймати чинник у межах експерименту, називають його областю варіювання. У матриці планування (таблиці планових експериментів) чинники давалися в кодованому вигляді. При цьому за основний рівень варіювання приймалася центральна, тобто нульова точка, яка позначена ***(X_{io})***, а інтервал варіювання – ***(ΔX_i)***. Шляхом додавання або віднімання значення інтервалу варіювання від значення чинника, що знаходиться на основному рівні, одержано відповідно верхній, що позначається (+1) або (+), або нижній, що позначається (-1) або (-), рівень чинника.

Взаємозв’язок між натуральними ***(X_i)*** і кодованими значеннями чинників ***(x_i)*** визначено за формулою:

$$x_i = (X_i - X_{io})/\Delta X_i. \qquad (7)$$

Вибір інтервалів варіювання залежить від цілей і можливостей дослідження, а також від конкретних умов проведення експерименту, які зводяться в табл. 1.

Таблиця 1

Умови планування експерименту
побудови математичної моделі ВПС в системі МЕМ

№ з/п	Чинники		Рівні варіювання			Інтервал варіювання ΔXi, натур.вим.
	Натуральний вигляд	Кодований вигляд	-1	0	+1	
1	2	3	3	4	5	6
1	Надмірний тиск у фронті повітряної ударної хвилі *($\Delta p_ф$)*, кг/см^2	x_1	0,3	0,35	0,4	0,05
2	Тиск сейсмовибухових і сейсмічних хвиль у грунті *(σ)*, кг/см^2	x_2	0,2	0,25	0,3	0,05
3	Тиск у фронті підводної ударної хвилі *(p_m)*, кг/см^2	x_3	30	185	340	155
4	Світловий імпульс випромінювання *(u)*, кал/см^2	x_4	50	210	370	160
5	Сумарна доза проникної радіації за захисною товщею *(D_x)*, р	x_5	$1{,}1\cdot10^{-18}$	$2{,}1\cdot10^{-16}$	$4{,}3\cdot10^{-16}$	$2{,}1\cdot10^{-16}$
6	Сумарний потік нейтронів *($П_n$)*, нейтр/см^2	x_6	0	$5\cdot10^{11}$	10^{12}	$5\cdot10^{11}$
7	Імпульс тиску рентгеновського випромінювання *($I_д$)*, кг·сек/см^2	x_7	0,046	0,058	0,070	0,012
8	Рівень радіації *(P)*, р/год	x_8	24184	255370	486556	231186
9	Імпульс тиску газового потоку *($I_д$)*, кг·сек/см^2	x_9	168,90	168,925	168,95	0,025

Закінчення таблиці 1

1	2	3	3	4	5	6
10	Концентрація електронів у місці підвищеної іонізації *(N_e)*, 1/см^3	x_{10}	0	$0,9 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^5$	$0,9 \cdot 10^5$
11	Часова функція напруженості електричного поля *($E(t)$)*, В/м	x_{11}	62	372	682	310

Для побудови лінійних залежностей застосовувалися дворівневі, а для квадратичних – трирівневі плани і плани з більшою кількістю рівнів.

Результати дослідів оброблялися за допомогою методів математичної статистики, одержуючи залежності між вихідними параметрами й чинниками, що на них впливають, у вигляді лінійних або неповних квадратичних рівнянь регресії.

Таким чином, отримуємо математичну модель ГС в системі ЕМІ:

$$R_{У.В}^0/q^{1/3} = \varphi(x_1, x_2, x_4, x_5, x_6) + f(x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}),\ \text{м/т}^{1/3}. \quad (8)$$

або

$$R_{У.В}^0/q^{1/3} = \varphi(\Delta p_ф, \sigma, u, D_x, П_п) + f(I_д, P, I_д, N_e, E(t)),\ \text{м/т}^{1/3}. \quad (9)$$

Якщо функції $\varphi(x_1, x_2, x_4, x_5, x_6)$, $f(x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11})$ задані на відрізку $[a,b]$ і мають певні наперед визначені властивості, то можна стверджувати, що отримано функціональний простір ГС, елементами (точками, векторами) якого є функції.

Наявність у функціональному просторі ГС числа $\|R_{У.В}^0/q^{1/3} - x\|$, яке має властивості звичайної відстані

$$\|R_{У.В}^0/q^{1/3} - 0\| = \|R_{У.В}^0/q^{1/3}\| \geq 0,\ \text{м/т}^{1/3}; \quad (10)$$

$$\|R_{У.В}^0/q^{1/3}\| = 0 \rightarrow \varphi(x) = f(x) \equiv 0,\ \text{м/т}^{1/3}; \quad (11)$$

$$\|a\ R_{У.В}^0/q^{1/3}\| = |a| \cdot \|R_{У.В}^0/q^{1/3}\|,\ \text{м/т}^{1/3}; \quad (12)$$

$$\|R_{У.В}^0/q^{1/3} + x\| \leq \|R_{У.В}^0/q^{1/3}\| + \|x|,\ \text{м/т}^{1/3}. \quad (13)$$

дає можливість звичайним методом визначити межі елементів зазначеного простору – ε – межею елементу $(R_{У.В}^0/q^{1/3})$ є множина елементів $(R_{У.В}/q^{1/3})$ цього простору, таких що

$$\|R_{У.В}/q^{1/3} - R_{У.В}^0/q^{1/3}\| < \varepsilon,\ \text{м/т}^{1/3}. \quad (14)$$

Якщо ГС – функціональний простір із введеним на множині його елементів відстанню $(R_{У.В}^0/q^{1/3})$, а також якщо задано правила φ та f, відповідно до яких кожному елементу $(R_{У.В}/q^{1/3})$ деякої підмножини $(R_{У.В}^0/q^{1/3})$ **<u>*С*</u>** ГС поставлене у відповідність число.

$$(\varphi + f) : R_{У.В}{}^{0}/q^{1/3} \rightarrow X,\ \text{м/т}^{1/3}. \quad (15)$$

У випадку використання МПЕ параметр $(R_{У.В}{}^{0}/q^{1/3})$ (невідомої функції відгуку) можна представити поліномами:

- функціональної залежності φ

$$R_{У.В}{}^{0}/q^{1/3} = \beta_0 + \beta_1 \Delta p_ф + \beta_{11} \Delta p_ф{}^2 + \beta_{12} \Delta p_ф \sigma + \beta_{14} \Delta p_ф u + \beta_{15} \Delta p_ф D_x + \\ + \beta_{16} \Delta p_ф П_n + \beta_2 \sigma + \beta_{22} \sigma^2 + \beta_{24} \sigma u + \beta_{25} \sigma D_x + \beta_{26} \sigma П_n + \beta_4 u + \beta_{44} u^2 + \\ + \beta_{45} u D_x + \beta_{46} u П_n + \beta_5 D_x + \beta_{55} D_x{}^2 + \beta_{56} D_x П_n + \beta_6 П_n + \beta_{66} П_n{}^2,\ \text{м/т}^{1/3} \quad (16)$$

де $R_{У.В}{}^{0}/q^{1/3}$ – параметр оптимізації, тобто вихідний параметр системи;

$\Delta p_ф, \sigma, u, D_x, П_n$ – незалежні змінні цієї ж системи;

$\beta_0, \beta_1, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_2, \beta_{22 \ldots}$ - теоретичні коефіцієнти регресії;

- функціональної залежності f

$$R_{У.В}{}^{0}/q^{1/3} = \beta_0 + \beta_7 I_д + \beta_{77} I_д{}^2 + \beta_{78} I_д P + \beta_{79} I_д I_д + \beta_{710} I_д N_e + \beta_{711} I_д E(t) + \\ + \beta_8 P + \beta_{88} P^2 + \beta_{89} P I_д + \beta_{810} P N_e + \beta_{811} P E(t) + \beta_9 I_д + \beta_{99} I_д{}^2 + \beta_{910} I_д N_e + \\ + \beta_{911} I_д E(t) + \beta_{10} N_e + \beta_{1010} N_e{}^2 + \beta_{1011} N_e E(t) + \beta_{11} E(t) + \beta_{1111} E(t)^2,\ \text{м/т}^{1/3} \quad (17)$$

де $R_{У.В}{}^{0}/q^{1/3}$ – параметр оптимізації, тобто вихідний параметр системи;

$I_д, P, I_д, N_e, E(t)$ – незалежні змінні цієї ж системи;

$\beta_0, \beta_7, \beta_{77}, \beta_{78}, \beta_8, \beta_{88 \ldots}$ - теоретичні коефіцієнти регресії,

і будемо стверджувати, що задано функціонал, область визначення якого є множина $(R_{У.В}{}^{0}/q^{1/3})\ \underline{C}$ ГС.

Функціонал $(R_{У.В}{}^{0}/q^{1/3})$ називається лінійним, якщо він визначений на всій множині ГС, неперервний в кожній точці, а також має ознаку адитивності, тобто для довільних чинників x виконується рівність:

$$R_{У.В}{}^{0}/q^{1/3} = L\,(x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11}) = \\ = \varphi(x_1, x_2, x_4, x_5, x_6) + f(x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}),\ \text{м/т}^{1/3}, \quad (18)$$

якщо Ω – обмежена область ГС в R^n з кусочно-гладкою межею $\partial\Omega$.

Координати об‘єктів в R^n будемо позначати літерою x, розуміючи під цим символом вектор-стовпчик із компонентами x_i, $i = 1, 2, \ldots, 11$. Для градієнта функції $\varphi(x)$ або $f(x)$ - вектор-стовпчика її частинних похідних $\partial\varphi(x)/\partial x_i$, φ_{xi} – приймається позначення $grad\ \varphi(x)$.

Для будь-яких гладких $\varphi(x)$ або $f(x)$, які обертаються в нуль на межі області маємо те, що в точці екстремуму $(R_{У.В}{}^{0}/q^{1/3})$ виконується співвідношення, яке називається рівнянням Ейлера-Остроградського:

$$L_{\varphi,f}(x, \varphi, f\ grad_{\varphi,f}) - \sum_{i=1}^{n} \partial L_{\varphi,fxi}/\partial x_i = 0,\ \text{м/т}^{1/3}. \quad (19)$$

Крайова задача для цього рівняння з межовою умовою

$$\varphi(x)|_{x\epsilon\partial\Omega} = f(x)|_{x\epsilon\partial\Omega} = \psi(\omega),\ \text{м/т}^{1/3} \quad (20)$$

є необхідною умовою екстремуму в даній задачі [5].

На першій стадії дослідження отримуємо рівняння регресії першого ступеня або неповні квадратичні рівняння. Розв’язання більшості оптимізаційних задач пов'язане, звичайно, з використанням поліномів другого порядку. Поліноміальні залежності третього порядку на практиці вирішення будівельно-технологічних задач практично не застосовуються.

В результаті експериментів визначають коефіцієнти регресії b_0, b_1, b_{11}, b_{12}, b_2, b_{22}..., які є оцінками теоретичних коефіцієнтів. Після цього рівняння (16, 17) приймають вигляд:

- функціональної залежності φ

$$R\hat{}_{У.В}{}^{0}/q^{1/3} = b_0 + b_1\Delta p_ф + b_{11}\Delta p_ф^2 + b_{12}\Delta p_ф\sigma + b_{14}\Delta p_ф u + b_{15}\Delta p_ф D_x + b_{16}\Delta p_ф \Pi_n + b_2\sigma + b_{22}\sigma^2 + b_{24}\sigma u + b_{25}\sigma D_x + b_{26}\sigma \Pi_n + b_4 u + b_{44}u^2 + b_{45}uD_x + b_{46}u\Pi_n + b_5 D_x + b_{55}D_x^2 + b_{56}D_x\Pi_n + b_6\Pi_n + b_{66}\Pi_n^2,\ \text{м/т}^{1/3}, \quad (21)$$

де $R\hat{}_{У.В}{}^{0}/q^{1/3}$ – розрахункове значення параметра оптимізації;

$\Delta p_ф$, σ, u, D_x, Π_n – незалежні змінні системи;

b_0, b_1, b_{11}, b_{12}, b_2, b_{22}... – розрахункові коефіцієнти регресії;

- функціональної залежності f

$$R\hat{}_{У.В}{}^{0}/q^{1/3} = b_0 + b_7 I_д + b_{77}I_д^2 + b_{78}I_д P + b_{79}I_д I_д + b_{710}I_д N_e + b_{711}I_д E(t) + b_8 P + b_{88}P^2 + b_{89}PI_д + b_{810}PN_e + b_{811}PE(t) + b_9 I_д + b_{99}I_д^2 + b_{910}I_д N_e + b_{911}I_д E(t) + b_{10}N_e + b_{1010}N_e^2 + b_{1011}N_e E(t) + b_{11}E(t) + b_{1111}E(t)^2,\ \text{м/т}^{1/3} \quad (22)$$

де $R\hat{}_{У.В}{}^{0}/q^{1/3}$ – розрахункове значення параметра оптимізації;

$I_д$, P, $I_д$, N_e, $E(t)$ – незалежні змінні системи;

b_0, b_7, b_{77}, b_{78}, b_8, b_{88}... - розрахункові коефіцієнти регресії.

Дослідні розрахунки виконувалися за основними критеріями оптимізації вихідного параметру ($R\hat{}_{У.В}{}^{0}/q^{1/3}$) підсистеми АЕЗ ЦЗ в системі ЕМІ, визначеними експериментальним шляхом залежно від потужності та висоти вибуху, розміру й стійкості об'єкту до дії уражальних чинників, його розташування на місцевості відповідно до плану ПФЕ 2^4. У кожній точці плану розрахунок незалежних змінних в системі ЕМІ по кожному i-му виду уражального чинника, виконували оперуючи емпіричними даними [4].

З урахуванням значимості коефіцієнтів математична модель ГС в системі ЕМІ (у кодованому виразі змінних) буде мати вигляд:

$$R\hat{}_{У.В}{}^{0}/q^{1/3} = 15{,}95 + 5{,}5(1/x_1) + x_7 + \ln x_{10} - x_7\ln x_{10} - (1/x_8)\ln x_{10},\ \text{м/т}^{1/3} \quad (23)$$

На другому етапі перевіряється гіпотеза про адекватність поліноміальної моделі з усіма значимими коефіцієнтами регресії. При цьому використовується мінімізуюча сума квадратів, що називається в регресивному аналізі залишковою. Для перевірки адекватності формулюється нуль-гіпотеза, і якщо вона за критерієм Фішера (F) буде визнана правдоподібною, то модель описує процес адекватно експерименту. З інженерної точки зору це означає, що модель передбачає результати ($R\hat{}_{У.В}{}^{0}/q^{1/3}$) в середньому з похибкою, більшою в $\sqrt{F}$ разів, аніж експериментальна. Оскільки $F_p < F_m$, отримане рівняння регресії є адекватним і його можна використовувати для побудови номограм.

На основі отриманих даних будується номограма, за якою можна розрахувати значення $(R^{\wedge}_{y.B}{}^{0}/q^{1/3})$ при визначених значеннях x_1, x_7, x_8, x_{10} і варійованих чинників.

У прямокутній декартовій системі координат $0xyz$ поверхня відгуку двофакторної квадратичної (повної) моделі ГС в системі ЕМІ, залежно від значення коефіцієнтів b_i, b_{ii}, b_{ij}, схематично зображається у вигляді гіперболічного параболоїду.

Результати експертної оцінки працездатності системи ЕМІ, проведеної при аналізованій довірчій імовірності виходу з ладу її об'єктів – 95 % (показник α-імовірності відмови – 0,05) і кількості ступенів свободи, визначених умовами експерименту, свідчать про неможливість забезпечення експлуатаційної надійності несучих будівельних конструкцій і системи в цілóму в межах зони, радіус якої удвічі перевищує нормативне значення віддаленості меж зон можливих руйнувань від меж проектної забудови категорованих міст [6]. Метод розрахунку конструкцій за допустимим станом може стати продовженням методу МПЕ. При розрахунках зазначеним методом чітко встановлюється допустимий стан конструкцій та використовується система розрахункових коефіцієнтів, уведення яких гарантує, що такий стан не відбудеться за найбільш несприятливої взаємодії навантажень і при найменших значеннях міцнісних характеристик матеріалів. Міцність перерізів визначають за стадією руйнування, проте надійність роботи конструкції під навантаженням оцінюють не одним синтезованим коефіцієнтом запасу, а зазначеною системою розрахункових коефіцієнтів [7].

ЛІТЕРАТУРА

1. Собуцький В.О. Експлуатаційна надійність міських будівель і споруд: основи теорії і практика: монографія / Собуцький В.О., Собуцький О.В. – Рівне: НУВГП, 2013. – 225 с.
2. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту: навчальний посібник / Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Житковський В.В. – Рівне: НУВГП, 2011. – 174 с.
3. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Том 4. / Эйнштейн А.; состав. И.Е. Тамм. – М.: Наука, 1965. – 599 с.
4. Боевые свойства ядерного оружия. – М.: Воениздат, 1967. – 624 с.
5. Вся высшая математика: учебник. - Том 6 / [М.Л. Краснов, А.И. Киселёв, Г.И. Макаренко и др.]. – М.: Эдиториал УРСС, 2003, – 256 с.
6. Інженерно-технічні заходи цивільного захисту (цивільної оборони). Система надійності та безпеки в будівництві: ДБН В.1.2-4-2006. – К. : Мінбуд України, 2006. – 34 с.
7. Байков В.Н. Железобетонные конструкции. Общий курс: учебник для вузов / Байков В.Н., Сигалов Э.Е. – М.: Стройиздат, 1991. – 767 с.: ил.

Стаття надійшла до редакції 25. 10.2013 р.