

УДК 550

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.12>Юрій СТАРОДУБ, д-р фіз.-мат. наук, проф.
e-mail: George_Starodub@yahoo.com

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, Україна

Андрій ГАВРИСЬ, канд. техн. наук, доц.
e-mail: havryst.and@gmail.com

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, Україна

Олеся КОЗІОНОВА, інж.
e-mail: rapakivi@ukr.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ВИВЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ҐРУНТІВ НАВАНТАЖЕНИХ МОСТОІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Виживою)

Представлено приклади використання методики моделювання впливу еколого-геофізичного стану ґрунтів на об'єкти мостового типу з використанням методу скінченних елементів. Проведено огляд публікацій моделювання напружено-деформованого стану складно побудованих мостових конструкцій в умовах техногенного впливу навколишнього середовища. Розглянуто приклади вивчення стану навантажених ґрунтів у основі мостів, побудованих у населених пунктах. Як приклад проведено моделювання напружено-деформованого стану ґрунтів під двома складними мостовими конструкціями. Показано зміни напружень-деформацій таких ґрунтів у разі збільшення навантажень на мости та зміни виду мостових конструкцій. Підтверджено ефективність застосування методу скінченних елементів для моделювання процесів вивчення та зміни напружень і деформацій у породах під складно побудованими конструкціями та виявлення типових проявів зміни напружено-деформованого стану, які важливі для швидкої оцінки стану ґрунтів.

Ключові слова: напружено-деформований стан, ґрунти, навантажені інженерні об'єкти.

Вступ

На сьогодні, за інформацією Міністерства інфраструктури, в Україні загалом функціонує понад 16 тисяч мостів різних типів та конструктивних рішень. Водночас, за даними "Укравтодору", лише близько 7,5 тис. з них (тобто майже 50 %) відповідають чинним нормам і стандартам, тоді як інша частина об'єктів підлягає реконструкції. Проте, згідно з обстеженням мостового господарства, здійсненого державною службою в 2019 р., негайного ремонту потребує 895 мостів (з них 169 перебувають у передаварійному стані), що значно відрізняється від даних "Укравтодору". Така значна різниця в оцінках може бути зумовлена недобросовісною перевіркою цих споруд або неповною інформацією про їхній стан. Зрозуміло, що в сьогоденні умовах війни кількість мостоінженерних споруд, що підлягають ремонту або реконструкції, невпинно зростає.

Недостатня інформація про існуючі опорні конструкції та фундаменти мостів створює значні проблеми для оцінки стану конструкції та може спричинити значну невизначеність щодо безпеки та їхньої працездатності. Характеристика та оцінка стану опорної конструкції та фундаменту мостів не тільки допоможе знизити їх вразливість до природних небезпек, але й надасть можливості для їх повторного використання із значними вигодами.

Постановка проблеми. Задачі вивчення ґрунтових масивів земної кори в районі мостоінженерних конструкцій методами комп'ютерного моделювання тісно пов'язані з вибором методу їхнього розв'язання. Один з ефективних методів вирішення даних задач – метод скінченних елементів (МСЕ), який має широке застосування і використовувався авторами в попередніх дослідженнях (Стародуб та ін., 2007, 2020) для визначення напружено-деформованого стану простих конструкцій. Проте ефективність застосування даного методу під час вивчення складнопобудованих залізобетонних інженерних споруд автори не досліджували.

Метою статті є моделювання (обчислення) деформацій і напружень у складнопобудованих мостоінженерних спорудах залізобетонного типу внаслідок зовнішніх

впливів навантаження на конструкції та їх вплив на природу ґрунтів у опорах моста. Необхідно дослідити їх геофізичну природу: вплив зміни модулів Юнга і Пуассона, відповідно швидкостей поздовжньої хвилі і хвилі зсуву, значення навантажень, що призводять до зміни деформацій і напружень на основі інтерактивного комп'ютерного моделювання.

Метою роботи є запобігання виникненню надзвичайних ситуацій на мостоінженерних спорудах шляхом удосконалення захисту на основі моделювання та теоретичного визначення критично допустимих значень напружено-деформованого стану ґрунтового масиву під дією навантажень інженерних споруд мостового типу. Такі дослідження, зокрема, також важливі для моніторингу профільно-диференційованих ґрунтів на ділянках технологічного впливу на навантажені об'єкти (Вижива, 2004; Вижива та ін., 2008; Karabyn et al., 2019).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У статті (Müzel et al., 2020) було досліджено властивості композиційних матеріалів, що почали широко використовуватися у спорудженні будівельних конструкцій, у тому числі мостоінженерних. Автори використали метод скінченних елементів як спосіб аналізу композиційних матеріалів, підданих різноманітному впливу залежно від функціонального призначення. Всі дослідження проведено на мікрорівні без практичних випробувань і комп'ютерного моделювання на спорудах.

У роботі (Mao et al., 2019) досліджується доцільність використання методів ідентифікації конструкції для характеристик і фундаментів мостів за допомогою МСЕ. Автори досліджували всі основні фактори, що становлять інтерес для характеристик оцінки опорної конструкції мостів, включаючи глибину закладення фундаменту, тип фундаменту, матеріал, геометрію фундаменту, цілісність підконструкції, граничний стан, її несучу здатність, вразливість підконструкції до деформації та термін служби, що залишився. Для оцінки цих параметрів було досліджено багато інструментів і технологій, таких як неруйнівна оцінка, руйнівний контроль, випробування навантаженням, чисельне моделювання, геотехнічне та

© Стародуб Юрій, Гавриць Андрій, Козіонова Олеся, 2023

геофізичне дослідження місця, аналіз на основі ризику та статистичні процедури. Проте за досліджуваний взірець автори взяли трипрогінний міст з простою опорою без поєднання метало-армованих конструкцій.

У статті (Shah et al., 2018) проведено дослідження працездатності конструкцій з використанням методу скінченних елементів, на прикладі як непошкоджувального, так і пошкоджувального тесту мостів, які мають однакові фізичні параметри. Метою було проаналізувати нелінійну зміну поведінки пошкодження, яке утворюється на прикладі тестового моста, коли деякі умови навантаження моделюються за допомогою МСЕ. За словами авторів, два тестові мости представляють моделі реальних мостів, які використовуються в повсякденному житті. Отже, у реальному випадку, як ці два тестові мости, моделювання фактично шляхом порівняння. Проте, як визначають самі автори статті, у разі використання даного дослідження на реальних спорудах можлива похибка.

Автори роботи (Aydın, Özkaaya, 2018) досліджували сучасні методи, які використовуються для оцінки навантажень на обрешетку кладкових арочних мостів, та проводили дослідження, спрямоване на розрахунок поведінки однопрогінних мурованих аркових мостів за певних навантажень методом статичного аналізу. Модель досліджували за допомогою програми пакета ANSYS на прикладі історичного мосту Сарпдере. Результати дослідження підтвердили історичні літературні дані. Проте використання даних методів на сучасних мостоінженерних спорудах не розглядалося і є предметом дослідження авторів статті.

У роботі (Lu et al., 2020) запропоновано використання нової моделі – моделі Крігінга, що використовується для інтелектуального аналізу та прогнозування фактичної жорсткості існуючих мостів, а також для високоточного прогнозування експериментальних результатів статичного навантаження. Для моделювання та аналізу отриманих даних автори використали програмне забезпечення ANSYS, що базується на використанні МСЕ. Тому адекватність перевірки даної моделі потрібно додатково дослідити з погляду використання двох різних моделей для аналізу.

Автори статті (Diez et al., 2016) запропонували новий підхід, оснований на кластеризації, до групових підструктур або з'єднань мосту з подальшим виявленням аномальних або пошкоджених структур мостоінженерних споруд. Згідно з дослідженням цей підхід базується на комбінації поверхневого аналізу ознак ушкоджень та визначення критичних з'єднань, на які впливає вібрація від транспорту, що проїжджає, за допомогою триосьових акселерометрів. Проте даний підхід не враховує додаткові навантаження, які можуть діяти на міст через вплив геофізичних явищ (наприклад, землетрусів) та поєднання їх з іншими вібраційними процесами зовнішнього середовища.

У роботі (Moravej et al., 2019) запропоновано застосувати модульний байєсівський підхід для калібрування скінчено-елементної моделі бетонного коробчастого моста в лабораторному масштабі. Автори вперше використали такий підхід для оцінки скінчено-елементної моделі реальної конструкції для двох станів – неушкодженого і пошкодженого (пошкоджений стан являє собою зміни структурних параметрів внаслідок старіння або перевантаження). Функції розбіжності використовуються для визначення відхилення між результатами експериментальної та чисельної моделей, що в подальшому замінено гаусовими процесами для полегшення обчислення. Хоча даний метод досить інформативний, проте способи застосування його потребують подальшого аналізу.

Методологія. У задачах моделювання напружено-деформованого стану у земному середовищі складної структури порід розв'язують динамічну задачу теорії пружності, враховуючи нелінійні явища. Середовище умовно розбивають на елементи скінченного розміру, які враховують важливі зміни у структурах. Дослідження поведінки структур з допомогою вивчення рухів певних скінченних елементів і оптимізації рухів елементів, на які умовно розбивають неперервні фізичні величини, апроксимують кусково-неперервними функціями на скінченній кількості елементів. Вигідно представляти такі функції поліномами, які визначаються для кожного елемента. Зокрема, форми елементів встановлюють порядок полінома, які визначають переміщення методом скінченних елементів (Bathe, 1996). Задача зводиться до розв'язання матричного рівняння або системи лінійних рівнянь, загальний вигляд якої можна представити у вигляді

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = f, \quad (1)$$

де U, \dot{U}, \ddot{U} – вектор відповідно переміщень, швидкостей переміщень і прискорень у вузлах елементів структури; f – вектор суми концентрованих сил у вузлах і сил на поверхневих границях структур, які можуть залежати від часу; K – матриця жорсткості системи, яка визначається залежністю напружень від переміщень і деформацій; M – матриця мас елементів структури, з яких складається тіло. Рівняння (1) є матричним виразом, який виражає узагальнений вигляд другого закону Ньютона, де матриця C враховує демпфування переміщень.

Якщо перенести перший і другий доданки рівняння (1) в праву частину, отримуємо формулу

$$KU = R, \quad (2)$$

де матриця R визначається як $R = f - (M\ddot{U} + C\dot{U})$. Остання формула враховує у правій частині можливі динамічні і квазідинамічні (повільні) рухи в системі, які визначаються рухами елементів структури.

В (2) R – матриця-стовпчик, – враховує навантаження, представляється у вигляді

$$R = \sum_{e=1}^{N_e} \int_{V^{(e)}} N^{(e)T} f^{(e)} dV^{(e)},$$

де $f^{(e)}$ – вектор навантаження на елемент (e) тіла; $N^{(e)}$ – матриця функцій форми встановлює залежність між вектором переміщень $u(r)$ і узагальнених переміщень U :

$$u(r) = N^{(e)}U.$$

Математична модель, що використовується, описує напружено-деформований стан у ґрунтовому масиві під навантаженням конструкції мостового типу. Для визначення сили використовують критерій наближення Мора-Кулона, згідно з яким отримуємо співвідношення для сили навантаження для тривимірного випадку (модель Друкера-Прагера (Doltsinis, 2018):

$$f^{(e)} = 3\alpha\sigma_m + \sigma_{eqv} - k,$$

де $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ – гідростатичне напруження;

$\sigma_{eqv} = \sqrt{0.5 \sqrt{(s_x^2 + s_y^2 + s_z^2)/2 + (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)}}$ – девіаторне напруження, характеризує зміну форми без зміни його об'єму, з параметрами: $s_x = \sigma_{xx} - \sigma_m$, $s_y = \sigma_{yy} - \sigma_m$,

$$s_z = \sigma_{zz} - \sigma_m; \quad \alpha = \frac{2\sqrt{3} \cdot \sin \varphi}{3(3 - \sin \varphi)}, \quad k = \frac{2\sqrt{3} \cdot c \cdot \cos \varphi}{(3 - \sin \varphi)}$$

k – коефіцієнти для обчислення сили $f^{(e)}$. У формулі

c – коефіцієнт, який визначає питоме зчеплення; φ – кут внутрішнього тертя в рамках моделі Друкера–Прагера (в кутових градусах).

Матрицю жорсткості K визначають у такому вигляді (Стародуб та ін., 2007):

$$K = \sum_{e=1}^{N_e} \int_{V^{(e)}} B^{(e)T} D^{(e)} B^{(e)} dV^{(e)}. \quad (3)$$

Матриця $B^{(e)}$ визначається із залежності між векторами деформації $\varepsilon = [\varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{xy}]^T$, $\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$, $\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$,

$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$ і узагальненого переміщення $\varepsilon = B^{(e)}U$, де мат-

риця деформацій у розглянутому випадку записується у матрично-векторній формі для компонент $u(r)$ і v переміщення відповідно по осях X і Y Декартові системи координат; $D^{(e)}$ – матриця напружень-деформацій матеріалу, визначається законом Гука для напруження $\sigma = D^{(e)}\varepsilon$.

Результати моделювання. Описані методом моделювання напружено-деформованого стану середовища, обрано натурну модель, яку представлено на рис. 1: міст біля села Калинівка Яворівського району Львівської області (1а – загальний вигляд, 1б – вигляд арки моста із симетричним навантаженням на опори).

З метою вивчення збільшення впливу навантаження на ґрунт під складною мостовою конструкцією, від початку було розглянуто модель, коли ґрунт моделювався стиснутим аргелітовим вапняком із швидкістю поздовжніх хвиль близько 2300 м/с, для типового значення

коефіцієнта Пуассона приблизно 0,3 і густини породи 18000 кг/м³. Водночас питоме зчеплення взяте $c = 10^3$ Па, кут внутрішнього тертя породи $\varphi = 35$ град. Для пружних властивостей металевої конструкції моста приймаємо значення для поздовжніх хвиль 3150 м/с, густину матеріалу – 2550 кг/м³.

Задаючи граничні умови, врахуємо жорстке закріплення нижньої границі у модельних прикладах. З метою економії пам'яті в моделі проводимо вісь симетрії по правому її краю – таке припущення відповідає вигляду моделі на рис. 1б. Однак обмеження на рух у горизонтальному напрямку не забороняє рухів у вертикальному, зокрема вздовж осі симетрії. Навантаження завдяки силі ваги напружені у вертикальному напрямку (від'ємному напрямку вздовж осі Y). Верхня границя моделі – вільна, права – має роликві властивості (можливий рух вверх-вниз, відповідає вертикальному руху). Для моделі напружено-деформованого стану середовища Друкера–Прагера пружна поведінка ґрунту породи виражається через коефіцієнт Пуассона ν і об'ємну густину γ , які мають вигляд

$$\sigma_{xx} = \lambda \sigma_{yy}, \quad \sigma_{yy} = -\gamma y, \quad \lambda = \frac{\nu}{(1-\nu)}. \quad (4)$$

Властивості матеріалу моделі такі: ґрунту – модуль Юнга для ґрунту і металевої конструкції моста, відповідно, $E = 10^6$ Па та 10^9 Па; коефіцієнт Пуассона для ґрунту і металевої конструкції моста $\nu = 0,3$; питома вага, відповідно, $\gamma = 18 \cdot 10^3$ Н/м³ та $56 \cdot 10^3$ Н/м³; для ґрунтового масиву питоме зчеплення $c = 10^5$ Па, кут внутрішнього тертя породи $\varphi = 35^\circ$.

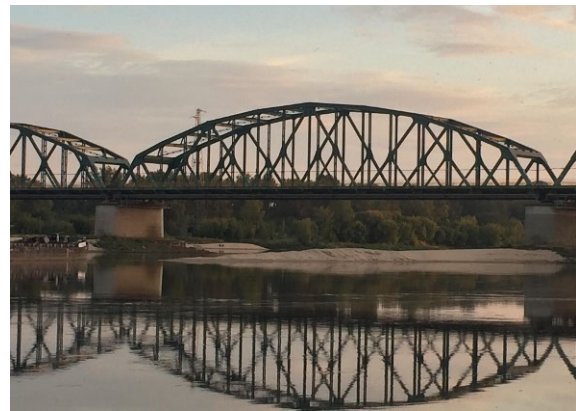


Рис. 1. Міст біля с. Калинівка Яворівського району Львівської області. У горизонтальному напрямку розмір моделі – 45 м відповідає осі X , вертикальний розмір моделі відповідає осі Y (масштаб однаковий): а – загальний вигляд, б – вигляд арки моста з навантаженням

Як видно з рис. 2 а-д деформація ґрунту під опорою моста зростає у разі зростання навантаження від 10 до 50000 т. Практично 100-відсоткова деформація поширюється по всій нижній модельованій частині ґрунту. Це призводить до збільшення напружень (якщо порівнювати із сусідніми частинами області моделювання ґрунту під опорою моста), яке проявляється у зростанні напружень та концентрації ізоліній напружень в околі дотику опори моста до ґрунту. Значення напруження на ізолініях моделі зростають у місці опори моста приблизно у п'ять разів – від $1,7 \cdot 10^5$ Н/м² до $5,6 \cdot 10^5$ Н/м². Можливі руйнування

породи в умовах дотику конструкції до основи шукаємо у Державних будівельних нормах, а саме "ДБН В.1.2-6:2021: Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість" (ДБН В.1.2-6:2021, 2021). Уточнені дані отримуємо з натурних спостережень.

Згідно з ДБН В.1.2-14:2018 (безпечними вважаються ґрунти, навантаження яких у 100 разів менше за граничні значення) (ДБН В.1.2-14:2018, 2018) та з натурних спостережень можна стверджувати, що змодельовані навантаження до 50000 т для моста біля с. Калинівка Яворівського району Львівської області створюють можливість аварійної ситуації.

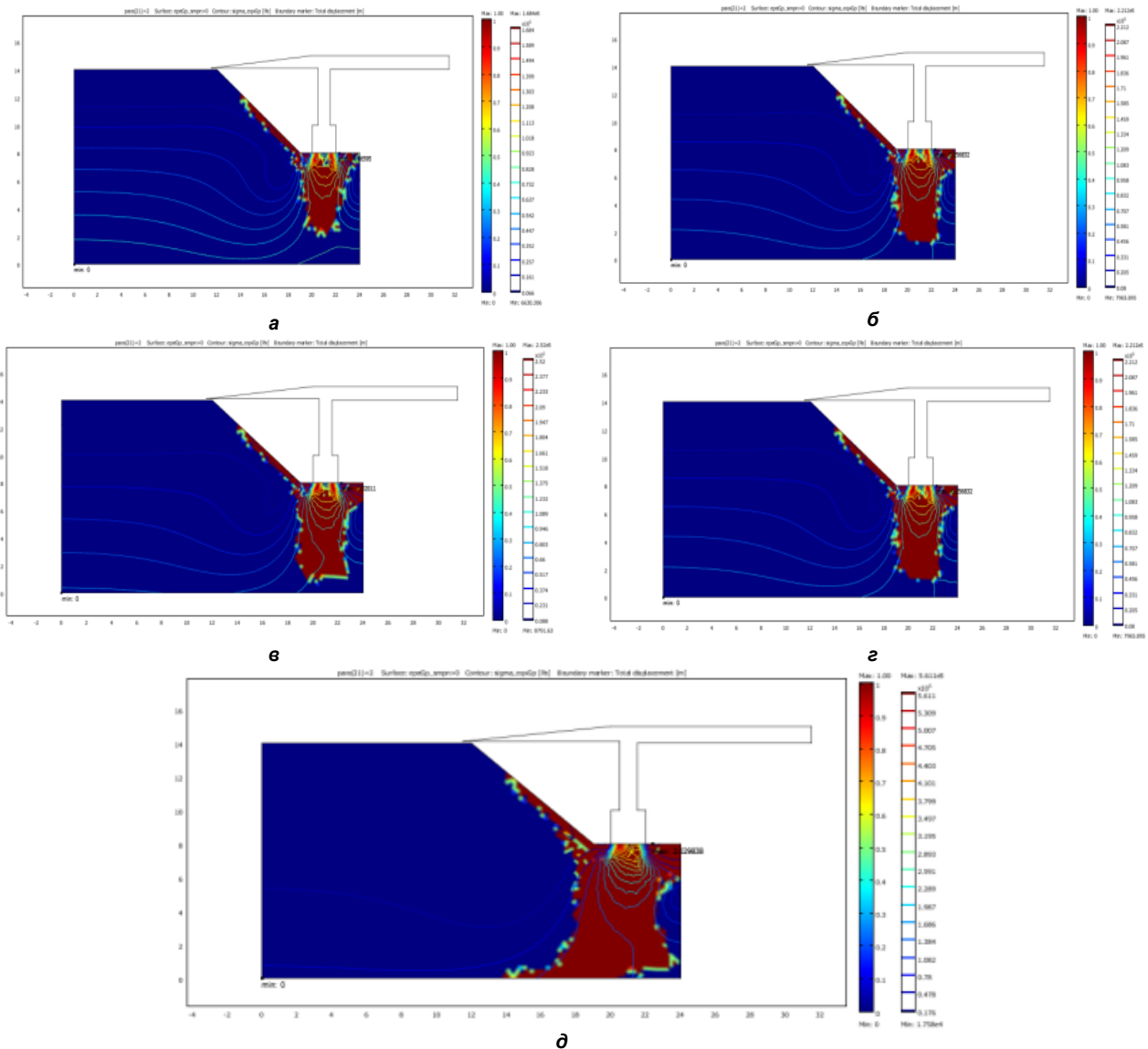


Рис. 2. Розподіл деформацій ґрунту у кольорах від коричневого (максимальна деформація) до синього (мінімальна) та розподіл ізоліній напружень (аналогічні кольори) в моделі за збільшення навантаження на арку моста від 10 т до 50 т
 а – 10 т, б – 1000 т, в – 10000 т, г – 15000 т, д – 50000 т

Наступною моделлю, яку досліджено щодо впливу виду конструкції на розподіл напружень і деформацій, була модель моста у місті Червоноград Яворівського району Львівської області, (рис. 3). Дану конструкцію вже розглянуто у статті (Стародуб та ін., 2020), проте в цьому випадку змінюється тип ґрунту та вага мостоінженерної споруди, що дає змогу порівняти вже існуючі результати з новими. А саме: з визначенням напружено-деформованим станом ґрунтового масиву, питома вага якого становить 18 кН/м^3 , питома зчеплення 10 кПа , що відповідає фізико-механічним характеристикам пухкої піщано-глинистої осадової гірської породи ґрунту – супіску. Питома вага мостоінженерної споруди становить 56 кН/м^3 , відповідно до характеристик залізобетону.

Характеристики моделі такі: модуль Юнга для ґрунту і металевої конструкції моста відповідно $E = 10^6 \text{ Па}$, 10^9 Па ; коефіцієнт Пуассона для ґрунту і металевої конструкції моста $\nu = 0,3$; питома вага ґрунту і залізобетонної конструкції моста відповідно $\gamma = 15 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$, $60 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$;

питома зчеплення $c = 10^5 \text{ Па}$, кут внутрішнього тертя породи $\phi = 35^\circ$.

На прикладі моделі, яка повторює конструкцію моста, бачимо, що в ненапруженому випадку – під дією лише напружень від ваги моста, ізолінії напружень, на відміну від попередньої конструкції, зростають в напрямку, протилежному до денної поверхні. Аналогічний ефект зростання напружень має місце з глибиною – від $2,5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ до $2,8 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$, що спостерігаємо і для навантаженої моделі (вагон вагою 35 т). Область максимальних деформацій розширюється і проникає на глибину, однак напруження зростають приблизно на 10 %, що згідно з ДБН В.1.2-6:2021 (ДБН В.1.2-6:2021, 2021) не створює катастрофічної ситуації.

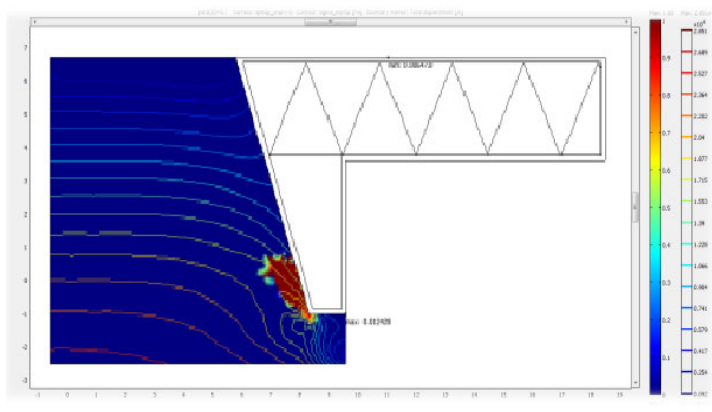
Результати нового моделювання практично відтворюють підсумки попередніх розрахунків, що може бути пов'язане зі збільшенням питомої ваги досліджуваної конструкції і зміною типу ґрунту на супісок. Це доводить правильність методу моделювання для різних мостоінженерних конструкцій зі змінними параметрами.



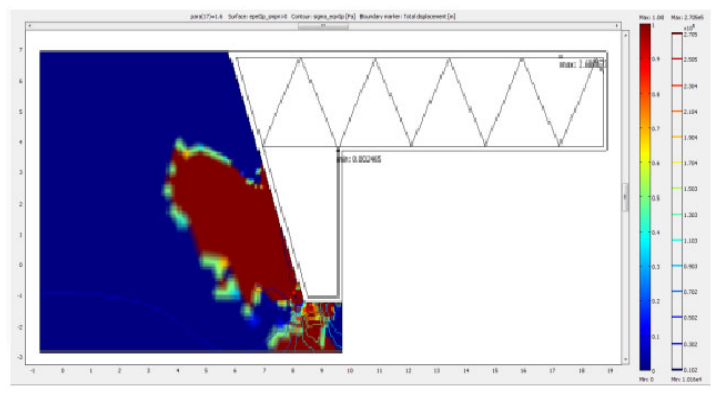
а



б



в



г

Рис.3. Міст по вул. Львівській в м. Червоноград Яворівського району Львівської області:
а – загальний вигляд без навантаження; б – вигляд залізобетонної конструкції мосту.

Результати моделювання напружено-деформованого стану гірських порід у фундаментах конструкцій каркасного типу:
в – розрахунок для ненавантаженої моделі; г – модель навантажена потягом

Висновки та перспективи розвитку розглянутого напрямку. На основі моделювання напружено-деформованого стану ґрунтового масиву під дією навантажень інженерних споруд мостового типу для двох реальних моделей, було встановлено:

- для мосту біля с. Калинівка Яворівського району Львівської області помітна деформація поширюється по всій нижній змодельованій частині ґрунту і призводить до збільшення напружень в околі дотику опори моста до ґрунту. Значення напруження на ізолініях моделі зростають у місці опори моста приблизно у п'ять разів – від $1,7 \cdot 10^5$ Н/м² до $5,6 \cdot 10^5$ Н/м².

Згідно з ДБН та натурними спостереженнями можна сказати, що змодельовані навантаження до 50000 т для мостової споруди створюють можливість аварійної ситуації.

- для мосту в м. Червоноград Яворівського району Львівської області ефект зростання напружень має місце з глибиною – від $2,5 \cdot 10^6$ Н/м² до $2,8 \cdot 10^6$ Н/м², що спостерігаємо і для навантаженої вагоном 35 т моделі. Область максимальних деформацій розширюється і проникає на глибину, але згідно з (ДБН В.1.2-6:2021, 2021) не створює катастрофічної ситуації.

Використання застосованого в роботі методу скінченних елементів дає змогу моделювати процеси вивчення напружень і деформацій у складнобудованих конструкціях, що є важливим для швидкої оцінки їхнього стану, особливо у випадку напружень, які можуть бути в різному роду катастрофічних ситуаціях, пов'язаних з природними і техногенними винятковими ситуаціями, зокрема, при врахуванні найгірших екстраординарних процесів. Особливо актуальним це стає нині, коли велика кількість

мостоінженерних споруд у зоні військових дій зазнає впливу навантажень, спричинених вибуховими хвилями.

У всіх названих випадках метод швидкої оцінки стану навколишнього середовища, з можливістю прогнозування його становища шляхом математичного моделювання з використанням комп'ютерних алгоритмів і методів, одним з яких є МСЕ, на сучасних ЕОМ є важливим і незамінним.

Список використаних джерел

Вижва, С.А. (2004). Теорія і методологія комплексної геодинамічної інтерпретації даних геофізичного моніторингу небезпечних геологічних процесів. *Дис. ... д-ра геол. наук: 04.00.22*. Київський національний університет імені Тараса Шевченка.

Вижва, С.А., Винниченко, О.Б., Кендзера, О.В. (2008). Вплив природних і техногенних процесів на потенційно небезпечні об'єкти. ВПЦ "Київський університет".

ДБН В.1.2-6:2021. (2021). Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість.

ДБН В.1.2-14:2018. (2018). Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд.

Стародуб, Ю., Гавриш, А., Козіонова, О. (2020). Моделювання впливу еколого-геофізичного стану ґрунтів на інженерні мостобудівні об'єкти. *Вісник київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(90), 97–103.

Стародуб, Ю.П., Кендзера, О.В., Купльовський, Б.С. (2007). Методика моделювання хвильових полів і напружено-деформованого стану в неоднорідному півпросторі з використанням методу скінченних елементів. Центр математичного моделювання ІППММ НАН України. Препрінт № 07.

Aydin, A.C., Özkaya, S.G. (2018). The finite element analysis of collapse loads of single-spanned historic masonry arch bridges (Ordu, Sarpdere Bridge). *Engineering Failure Analysis*, 84, 131–138.

Bathe, K.-J. (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice Hall.

Chen, W.F., Mizuno, E. (1990). *Nonlinear Analysis in Soil Mechanics*. Elsevier.

Diez, A., Khoa, N.L.D., Makki Alamdari, M., Wang, Y., Chen, F., Runcie, P. (2016). A clustering approach for structural health monitoring on bridges. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(3), 429–445.

Doltsinis, I. (2018). A note on the stiffness and flexibility natural approach to the training spring cell. *Engineering Computations*, 35(3), 1130–1139.

Karabyn, V., Popovych, V., Shainoha, I., Lazaruk, Y., (2019). Long-term monitoring of oil contamination of profile-differen-tiated soils on the site of influence of oil-and-gas wells in the central part of the Boryslav-Pokuttya oil-and-gas bearing area. *Petroleum and Coal*, 61(1), 81–89.

Lu, P., Xu, Z., Chen, Y., & Zhou, Y. (2020). Prediction method of bridge static load test results based on Kriging model. *Engineering Structures*, 214, 110641.

Mao, Q., Mazzotti, M., DeVitis, J., Braley, J., Young, C., Sjoblom, K., Bartoli, I. (2019). Structural condition assessment of a bridge pier: A case study using experimental modal analysis and finite element model updating. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(1), e2273.

Moravej, H., Chan, T. H., Nguyen, K.D., Jesus, A. (2019). Vibration-based Bayesian model updating of civil engineering structures applying Gaussian process metamodel. *Advances in Structural Engineering*, 22(16), 3487–3502.

Müzel, D.S., Bonhin, E.P., Guimarães, N.M., Guidi, E.S. (2020). Application of the finite element method in the analysis of composite materials: A review. *Polymers*, 12(4), 818.

Shah, A.A., Chowdhry, B.S., Daudpoto, J., Ali, I. (2018). Transient structural health monitoring of the test bridges using finite element method. *5th International multi-topic ICT conference (IMTIC), 2018*, pp. 1–7. IEEE.

Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. (2005). *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Elsevier.

References

Aydin, A.C., Özkaya, S.G. (2018). The finite element analysis of collapse loads of single-spanned historic masonry arch bridges (Ordu, Sarpdere Bridge). *Engineering Failure Analysis*, 84, 131–138.

Bathe, K.-J. (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice Hall.

Chen, W.F., Mizuno, E. (1990). *Nonlinear Analysis in Soil Mechanics*. Elsevier.

DBN V. 1.2-14:2018. (2018). Zahalni pryntsyropy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktivnoi bezpeky budiveli i sporud [in Ukrainian].

DBN V.1.2-6:2021. (2021). Osnovni vymohy do budiveli i sporud. Mekhanichnyy opir ta stykist' [in Ukrainian].

Diez, A., Khoa, N.L.D., Makki Alamdari, M., Wang, Y., Chen, F., Runcie, P. (2016). A clustering approach for structural health monitoring on bridges. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(3), 429–445.

Doltsinis, I. (2017). *Progress report, DAAD Project-ID 57213102: Application of Spring Lattice Models for Shell Structures, ISD-Stuttgart, August 2017, 1–10*

Yuriy STARODUB, DSc (Phys. & Math.), Prof.
e-mail: George_Starodub@yahoo.com
Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

Andrii HAVRYS, PhD (Tech.), Assoc. Prof.
e-mail: havrys.and@gmail.com
Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

Olesia KOZIONOVA, Engineer
e-mail: rapakivi@ukr.net
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Karabyn, V., Popovych, V., Shainoha, I., Lazaruk, Y., (2019). Long-term monitoring of oil contamination of profile-differen-tiated soils on the site of influence of oil-and-gas wells in the central part of the Boryslav-Pokuttya oil-and-gas bearing area. *Petroleum and Coal*, 61(1), 81–89.

Lu, P., Xu, Z., Chen, Y., & Zhou, Y. (2020). Prediction method of bridge static load test results based on Kriging model. *Engineering Structures*, 214, 110641.

Mao, Q., Mazzotti, M., DeVitis, J., Braley, J., Young, C., Sjoblom, K., Bartoli, I. (2019). Structural condition assessment of a bridge pier: A case study using experimental modal analysis and finite element model updating. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(1), e2273.

Moravej, H., Chan, T. H., Nguyen, K.D., Jesus, A. (2019). Vibration-based Bayesian model updating of civil engineering structures applying Gaussian process metamodel. *Advances in Structural Engineering*, 22(16), 3487–3502.

Müzel, D.S., Bonhin, E.P., Guimarães, N.M., Guidi, E.S. (2020). Application of the finite element method in the analysis of composite materials: A review. *Polymers*, 12(4), 818.

Shah, A.A., Chowdhry, B.S., Daudpoto, J., Ali, I. (2018). Transient structural health monitoring of the test bridges using finite element method. *5th International multi-topic ICT conference (IMTIC), 2018*, pp. 1–7. IEEE.

Starodub, Yu., Havrys, A., Kozionova, O. (2020). Modeling of the effects of the environmental-geophysical state of soils on engineering building objects. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(90), 97–103 [in Ukrainian].

Starodub, Yu.P., Kendzera, O.V., Kupl'ovskyy, B.Ye. (2007). Metodyka modelyuvannya khvylovykh poliv i napruzhenno-deformovanoho stanu v neodnorodnomu pivprostori z vykorystannam metodu skinchenykh elementiv. Tsentri matematychnoho modelyuvannya IPPMM NAN Ukrainy. Preprint № 07 [in Ukrainian].

Vyzhva, S.A. (2004). Teoriya i metodolohiya kompleksnoyi heodynamichnoyi interpretatsiyi danykh heofizychnoho monitorynhu nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv. *Thesis ... Dr. Sci. (Geol.): 04.00.22*. Taras Shevchenko National University of Kyiv [in Ukrainian].

Vyzhva, S.A., Vynnychenko, O.B., Kendzera, O.V. (2008). Vplyv pryrodnykh i tekhnichnykh protsesiv na potentsiyno nebezpechni ob'yekty. *VOC "Kyiv University"* [in Ukrainian].

Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. (2005). *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Elsevier.

Отримано редакцією журналу / Received: 28.04.23

Прорецензовано / Revised: 13.06.23

Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

STUDY OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF SOILS OF LOADED ENGINEERING OBJECTS

The article presents examples of the use of the method of modelling the influence of the ecological and geophysical state of the soil on bridge-type objects using the finite element method. A review of publications on modelling the stress-strain state of complex bridge structures under man-made environmental influences was conducted. Examples of studying the state of loaded soils at the base of bridges built in populated areas are considered. As an example, modeling of the stress-strain state of soils under two complex bridge structures was carried out. Changes in stress-strain of such soils are shown when the loads on bridges increase and when the type of bridge structures changes. The effectiveness of using the finite element method for modelling the processes of studying and changing stresses and deformations in rocks under complex structures and identifying typical manifestations of changes in the stress-strain state, which are important for a quick assessment of the soil condition, has been confirmed.

Keywords: stress-strain state, soils, loaded engineering objects.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.