

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

УДК 550

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.90.14>Ю. Стародуб, д-р фіз.-мат. наук, проф.,
E-mail: George_Starodub@yahoo.com;А. Гаврись, канд. техн. наук, старш. викл.,
E-mail: havrys.and@gmail.com;Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
вул. Клепарівська, 35, Львів, 79000, Україна;

О. Козіонова, провід. інж.,

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ІНІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, УкраїнаМОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЕКОЛОГО-ГЕОФІЗИЧНОГО СТАНУ ҐРУНТІВ
НА ІНЖЕНЕРНІ МОСТБУДІВНІ ОБ'ЄКТИ*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)*

Розглянуто методику моделювання реакції ґрунтової товщі під інженерними об'єктами на еколого-геофізичний стан у задачах вивчення негативного впливу навантажень на напружено-деформований стан ґрунтів під інженерними об'єктами. Розглянуто проблему вивчення стійкості стану та досліджено поведінку ґрунту в околі мостоінженерних будівельних конструкцій.

Для вирішення завдань попередження надзвичайних ситуацій застосовано метод моделювання реакції ґрунтового шару на навантаження під об'єктами інженерії, а також враховано тектонічні впливи при вивченні напружено-деформованого стану земної кори в околицях інженерних об'єктів.

Розроблено алгоритм використання методу скінченних елементів у задачі вивчення напружено-деформованого стану основ ґрунтів під інженерними об'єктами. Здійснено фізико-математичну постановку задачі. Задача моделювання вирішується на тестових прикладах. Розроблено моделі суцільного середовища функціонування інженерних споруд, для яких моделюються напружено-деформаційні характеристики масиву ґрунтів. Проведено теоретичне визначення та моделювання критичних значень напружено-деформованого стану ґрунтового масиву під впливом навантажень.

Моделювання дозволяє передбачити характер впливу механічних процесів на еколого-геофізичний стан навоколишнього середовища та дослідити стійкість інженерних споруд. Досліджено напружено-деформаційні процеси гірського масиву, у результаті яких виникають надзвичайні ситуації природного та техногенного характеру.

Ключові слова: ґрунти, еколого-геофізичний стан, навантажені інженерні об'єкти.

Вступ. На сьогоднішній день у зв'язку з розвитком будівництва інженерних споруд, а також реконструкцію вже зведених не тільки в Україні, а й в усьому світі, тенденцією є поява проблем, пов'язаних з виникненням надзвичайних ситуацій на інженерних спорудах. Згідно із статистичними даними лише з 2013 до 2015 р. унаслідок раптового руйнування будівель і споруд в Україні виникло 11 аварій, що призвело до трагічних наслідків, у тому числі летальних. Крім того, 14 осіб у 2013 р. та 17 – у 2015 р. було госпіталізовано. Якщо розглянути екологічний фактор, то у світі за цей період відбулося 409 аварій, що призвели до розливу або викиду небезпечних речовин у водні об'єкти, які були безпосередньо під мостоінженерною спорудою. Ці надзвичайні ситуації були наслідком виникнення тріщин, розломів, утворення тектонічних пустот (карстів), підняттям ґрунту біля основ стики ґрунтового масиву з мостовою конструкцією. Останнє, у свою чергу, відбувається внаслідок перевищення можливих напружень і деформацій ґрунтового масиву, що призводить до руйнування верхніх шарів шляхопроводів і мостових конструкцій.

Постановка проблеми. За допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) можна розв'язати загальні завдання, що стосуються вивчення процесів у земній корі, пов'язаних зі складністю її будови. Задачі про дифракцію на одній чи двох неоднорідностях з використанням дифракційного методу і Борнівського наближення, матричного методу з використанням інтегральних перетворень вирішують у часткових випадках модельних представлень (Стародуб, 1998). Числовий метод скінченних різниць дає розв'язок про напружено-деформований стан неоднорідної земної кори, однак використання цього методу передбачає неточності в розв'язанні, пов'язані з різкими змінами фізичних характеристик земної кори: розломами, пустотами, зсувами. Те ж саме в різних проявах може стосуватися комбінованих методів (Стародуб та ін., 2012).

Обраний метод необхідно оптимально використати: здійснити фізичну і математичну постановку задачі,

розробити алгоритм використання методу. Якщо це числовий метод (числові методи здебільшого дають адекватне розв'язання задач, які ставить розвиток сучасної науки і комп'ютерної техніки), необхідно дослідити стійкість і збіжність методу (методу скінченних елементів), розв'язати задачі на тестових прикладах і порівняти їх з практичними результатами (Стародуб, 1998).

Мета статті – отримати можливість обчислити (точніше оцінити) деформації та напруження, особливо у життєво важливих частинах інфраструктури технологічно розвинених регіонів, з метою окреслити межі ослаблених частин гірських порід та штучних конструкцій (бетонний каркас, укріплення тощо), вивчити їх геофізичну природу, швидкості хвилі зсуву і значення тиску або коефіцієнти Юнга і Пуассона, коефіцієнти демпфування та провести інтерактивне комп'ютерне моделювання для кожної конкретної ситуації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій: Дослідження в даній статті базуються на використанні методу скінченних елементів для моделювання напружено-деформованого стану гірських порід на основі відомого числового методу (Bathe, 1996; Zienkiewicz and Taylor, 2005).

Впливу природних і техногенних процесів на потенційно небезпечні об'єкти із застосуванням математичного моделювання напружено-деформованого стану гірських порід присвячено роботи (Вижва, 2004; Вижва та ін., 2008), які базуються на теорії й методології комплексної геодинамічної інтерпретації даних геофізичного моніторингу небезпечних геологічних процесів.

Мости, як споруди для транспорту, та правила їхнього проектування описано в Державних будівельних нормах (ДНБ) (Мости та труби 2009; Основи та фундаменти..., 2018). У роботах з механіки ґрунтів описано рекомендації з розрахунку зсувного тиску на заданий елемент масиву і загальної стійкості зсувонебезпечних схилів (Рекомендації..., 1989; Рыжов и Тимофеев, 1989; Корнієнко, 2007). Математичне моделювання стійкості зсувного схилу при підйомі рівня ґрунтових вод та

© Стародуб Ю., Гаврись А., Козіонова О., 2020

оцінка інформативних параметрів стану будівельних конструкцій у режимі моніторингу проведено авторами (Трофимчук *и др.*, 2008; Мостовой *и др.*, 2011). Збірні нерозрізні залізобетонні прогонові будови мостів описано в роботі (Захаров *и др.*, 1983).

Застосування МСЕ для моделювання напружено-деформованого стану ґрунтів в основі конструкцій мостів виконано в роботі (Стародуб *та ін.*, 2012), при цьому для моделювання напружено-деформованого стану використана математична модель Мора – Кулона (Chen and Mizuno, 1990). Дослідженню надзвичайних ситуацій з використанням методу скінченних елементів для вивчення напружень і деформацій ґрунтів в околі мостоінженерних конструкцій з визначенням впливу навантажень присвячено такі роботи (Вербицький *та ін.*, 1988; Стародуб, 1998).

Задачі вивчення ґрунтових масивів земної кори в районі мостоінженерних конструкцій методами комп'ютерного моделювання тісно пов'язані з вибором методу їхнього розв'язання. На основі аналізу існуючих публікацій та методів (Стародуб *та ін.*, 2007; Вижва *та ін.*, 2008; Мостовой *и др.*, 2011; Bathe, 1996; Zienkiewicz and Taylor, 2005; Doltsinis, 2018) для моделювання було обрано метод скінченних елементів.

Методологія. Однією з важливих проблем при проектуванні еколого-геологічного захисту та будівництві мостів, віадуків, тунелів різного призначення є прогнозування екологічного та геофізичного характеру механічних умов гірського масиву з метою визначення стійкості та довговічності конструкцій мостового типу (рис. 1).

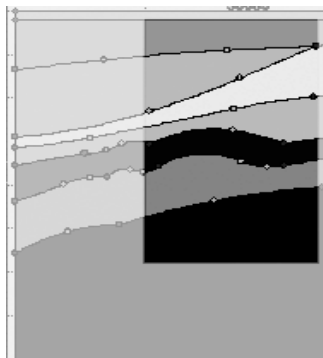


Рис. 1. Модель неоднорідного горизонтального перерізу напівпростору (заштрихована), де на поверхні розміщена структура типу мост

Напружено-деформований стан ґрунтів і мостових споруд визначається геометричними властивостями з різними деформаційними характеристиками та їхнім розподілом. На нього впливають міцність ґрунту, глибина закладення фундаментів мостових конструкцій, процеси промерзання ґрунту, рівень ґрунтових вод тощо. У роботі використовується прогнозування стану конструкцій мостового типу на основі численних експериментів, що використовують МСЕ. Розроблено методологію математичного моделювання для визначення, зокрема, напрямку діяльності сил цивільного захисту. Навантаження на мостову конструкцію має враховувати характер напруженого стану ґрунту, що оточує масив об'єкта, специфіку конструкції, його можливі переміщення та вібраційну поведінку.

У зв'язку із цим рух середовища описується за допомогою Ньютонівської механіки. Узагальнення переміщень для всіх частинок середовища над певним об'ємом (V) із зовнішньою площею (S) із щільністю $\rho(r)$, де r трактується як функція координат – $r(x, y, z)$.

Тіло, яке моделюється, розбивається на елементи. Значення маси елемента m , що апроксимується в декартовій системі координат, зображено на рис. 2, де значення m апроксимується його значеннями в точках – вершинах трикутника. Для вивчення впливу зовнішнього навантаження вивчається вертикальне навантаження на об'єкт. Вектор узагальненого переміщення представляється у вигляді

$$U = (u_{3i-2}, u_{3i-1}, u_{3i}, \dots, u_{3j-2}, u_{3j-1}, u_{3j}, \dots, u_{3k-2}, u_{3k-1}, u_{3k})^T, \quad (1)$$

де $i, j, k = 1, \dots, N_e$.

При тому узагальнені швидкість переміщення і прискорення беруться рівними 0:

$$\dot{U} = \ddot{U} = \vec{0}.$$

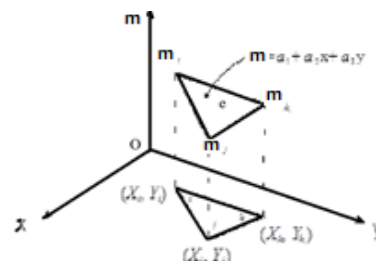


Рис. 2. Модельний трикутний елемент "е" вирізає неоднорідний горизонтальний поперечний переріз XOY напівпростору, де проекція елемента масою m зображена по площині XOY

Таким чином, для частинок із щільністю $\rho_e(r)$ у середовищі залежність від зовнішньої сили можемо записати у вигляді такого рівняння (Bathe, 1996; Стародуб *та ін.*, 2007):

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

де K – матриця жорсткості, яка визначається так:

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

Матриця $B^{(e)}$ визначається із залежності між векторами деформації й узагальненого переміщення $\varepsilon = B^{(e)}U$, де матриця деформацій в розглянутому випадку записується в матрично-векторній формі для компонент u та v переміщення відповідно по осях X і Y декартової системи координат

$$\varepsilon = [\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}]^T$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x},$$

$D^{(e)}$ – матриця напружень-деформацій матеріалу, визначається законом Гука для напруження $\sigma = D^{(e)}\varepsilon$.

R – вектор навантажень

$$R = \sum_{e=1}^{N_e} \int_{V^{(e)}} N^{(e)T} f^{(e)} dv^{(e)}, \quad (4)$$

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

Розраховується значення для сили на поверхні. Математична модель, що використовується, описує напружено-деформований стан у ґрунтовому масиві під навантаженням конструкції мостового типу. Для визначення сили використовуємо критерій наближення Мора-Кулона, який дає

поверхневу силу в тривимірному випадку – так звана модель Друкера-Прагера (*Doltsinis, 2000*). Математичне співвідношення для сили навантаження таке:

$$F = 3\alpha\sigma_m + \sigma_{eqv} - k, \quad (5)$$

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

$$\sigma_{eqv} = \sqrt{0.5\sqrt{(s_x^2 + s_y^2 + s_z^2)/2 + (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)}} - \text{девіаторне напруження з параметрами } s_x = \sigma_{xx} - \sigma_m,$$

$s_y = \sigma_{yy} - \sigma_m, s_z = \sigma_{zz} - \sigma_m.$

$$\alpha = \frac{2\sqrt{3} \cdot \sin \varphi}{3(3 - \sin \varphi)}, \quad k = \frac{2\sqrt{3} \cdot c \cdot \cos \varphi}{(3 - \sin \varphi)}, \quad (6)$$

тут α, k – коефіцієнти для обчислення сили F . У формулах (6) c – питоме зчеплення, φ – кут внутрішнього тертя (у градусах) у рамках моделі Друкера – Прагера.

Результати комп'ютерного моделювання. Використовуючи описаний вище алгоритм, представимо експеримент з комп'ютерного моделювання від підготовки даних до отримання результатів моделювання конструкції типу міст.

Підготовка даних: властивості ґрунту, використовуваного в експерименті моделювання, такі: модуль Юнга $E = 10^6$ Па, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$, питоме зчеплення $c = 10^3$ Па, кут внутрішнього тертя $\varphi = 35^\circ$. Маса ґрунту на одиницю об'єму (питома вага) $\gamma = 18$ кН/м³, питоме зчеплення $c = 10^4$ Па. Порівняно з пружними властивостями ґрунту міст вважаємо ідеально-пружним, значення властивостей матеріалу моста: $E = 25 \cdot 10^9$ Па, $\nu = 0,33$; $\gamma = 25 \cdot 10^3$ Н/м³.

Обмеження та завантаження. Нижня горизонтальна межа моделі має обмежені переміщення в горизонтальному X та вертикальному Y напрямках, тим самим імітуючи жорстку основну несучу породу. Модель включає лише половину мосту до осі симетрії. Обмеження стосуються правої частини моделі за площиною симетрії. Ліва вертикальна межа є ідеально гладкою і жорсткою, що моделює обмеження лише горизонтального напрямку та дозволяє рухатись у вертикальному напрямку (рис. 3). Щільність ґрунту вносять у вигляді навантаження на одиницю об'єму (відповідають від'ємному напрямку осі Y).

Вага на одиницю об'єму та деформації моделюються як у природному стані. При використанні методу пружно-

пластичного аналізу спочатку ґрунт має напруження у природному стані (перед навантаженням)

$$\sigma_{xx} = \lambda\sigma_{yy}, \sigma_{yy} = -\gamma y, \lambda = \frac{\nu}{(1-\nu)}. \quad (7)$$

З використанням описаних вище властивостей матеріалу, обмежень і навантажень отримано результати для моделей, які наведено на рис. 4. На рисунку показано міст, для якого проводилось моделювання, і лінії електропередач, сусідні будівлі та наявність транспортних засобів, які перебувають у зоні ризику в разі можливого руйнування.

Моделювання проводилось з використанням програмного пакету COMSOL. Результати моделювання представлені на рис. 4. Розроблений підхід дозволяє досліджувати напружено-деформований стан об'єктів (будови мостового типу) і контролювати геотехнічні процеси в них, спеціально посилюючи їхні опори з метою зменшення негативного впливу техногенних факторів на навколишнє середовище та ризику виникнення можливих катастроф. Теоретично можливо обчислити і вибрати критично можливі властивості мостових конструкцій для певного типу порід із заданими геофізичними характеристиками та їхній напружено-деформований стан.

Моделювання напружено-деформованого стану ґрунтового масиву проведено з використанням даних, наведених у ДБН (*Мости та труби 2009; Основи та фундаменти..., 2018*) і одержаних з натурних спостережень. Моделювання проводилось згідно з алгоритмом, представленим вище.

Подані в таблиці дані, які можуть бути використані для моделювання, складені шляхом узагальнення з метою проведення моделювання значної кількості результатів фізичних і механічних досліджень властивостей матеріалів Державних будівельних норм. На практиці ці дані можна використовувати для загальної оцінки стану матеріалів мостоінженерних конструкцій при дослідженні основ і фундаментів споруд, коли здійснюється дія навантаження на основу, що передається через підошву фундаменту і відбувається процес передачі напружень на основи та фундаменти споруд.

Показано напружено-деформований стан масиву під дією навантаження тільки мостоінженерної конструкції, спостерігаються деформації та напруження, що концентруються рівномірно, лише на бокову частину ґрунтового масиву, прилеглу до тіла моста.

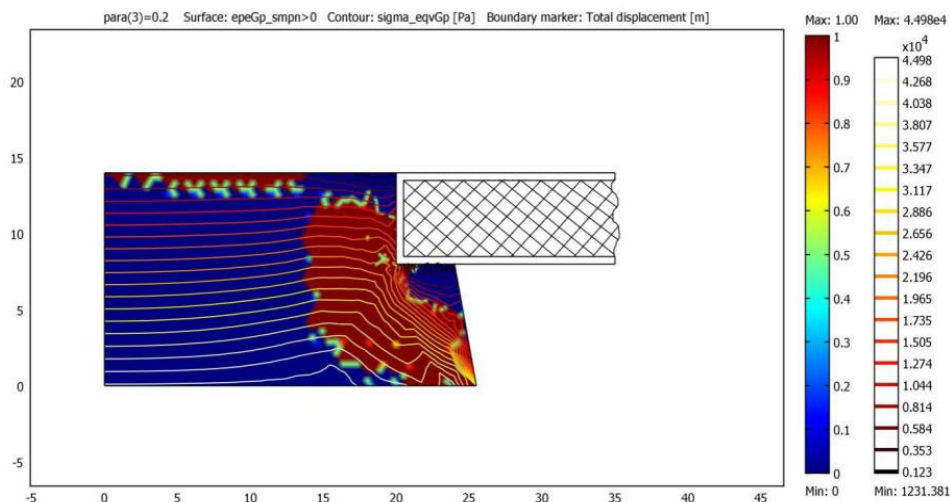


Рис. 3. Поперечний переріз моста показує деформації у площині XY зліва (горизонтальний розмір від 0 до 45 м відповідає осі X , вертикальний розмір збігається з віссю Y , масштаб, як на горизонтальній осі).

У лівій колонці праворуч зображено шкалу деформацій, у правій – ізолінії напружень

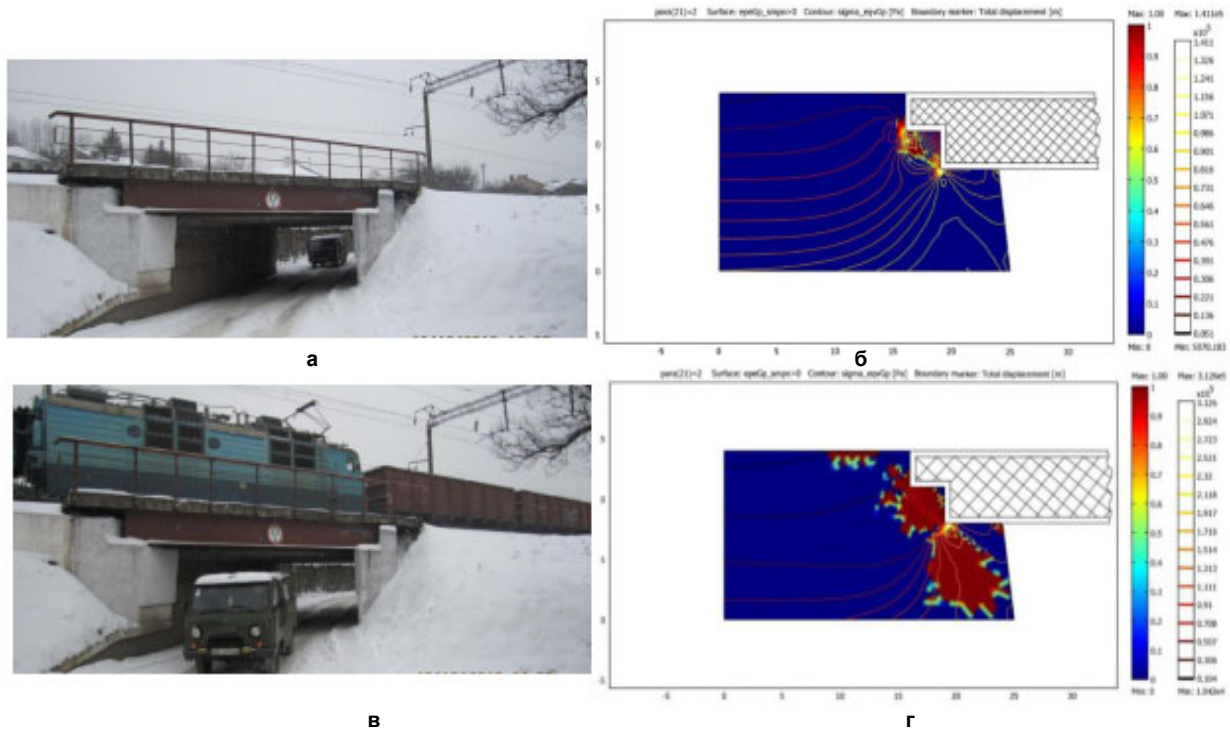


Рис. 4. Міст на вул. Варшавська, м. Львів, Україна

(а – без навантаження; в – навантажений потягом) і результати моделювання напружено-деформованого стану гірських порід у фундаментах конструкцій каркасного типу (б – характеристики ненавантаженої моделі; г – модель навантажена потягом).

Умовні позначення див. на рис. 3

Таблиця

Властивості матеріалу ґрунтового масиву та залізобетону

Фізична величина	Позначення	Значення величин		Одиниці виміру
		для ґрунтового масиву	для залізобетону	
Модуль Юнга	E	10E ⁶	25E ⁹	Па
Коефіцієнт Пуассона	ν	0,3	0,33	–
Питоме зчеплення	c	10000	–	Па
Кут внутрішнього тертя	φ	35	–	град.
Питома вага	γ	18000	56000	Н/м ³

Наступна натурна модель змодельована для мостоінженерної споруди, наведеної на рис. 5, а, в з визначеним напружено-деформованим станом ґрунтового масиву, питома вага якого становить 18 кН/м³, питоме зчеплення – 10 кПа, що відповідає фізико-механічним характеристикам суглинкового ґрунту. Питома вага мостоінженерної споруди становить 56 кН/м³ відповідно до характеристик залізобетону (*Основи та фундаменти...*, 2018). На рис. 5, б, г представлено моделювання напружено-деформованого стану гірських порід у фундаментах конструкції каркасного типу: ненавантажена та навантажена вагою потяга моделі. Розподіл деформацій і напружень для моделі конструкції моста: деформації – зміни кольорів на шкалі деформацій, напруження – ізолінії на шкалі напружень.

Розглянемо зміну напружень і деформацій для моделі мостоінженерної споруди із впливом навантаження (рис. 6). Для прикладу взято вагу одного вантажного вагону – приблизно 75 т, для моделі взято половину ваги, оскільки навантаження розподілено по всій довжині, а моделювання проводиться для половини моста (тобто 32,5 т). Спостерігаємо явну зміну напружень і суттєве збільшення деформацій, а головне, деформації поширюються на поверхню ґрунтового масиву, що свідчить про можливість утворення негативних процесів в області впливу та необхідність його укріплення.

При збільшенні навантаження деформації концентруються нерівномірно: збільшені деформації припадають на частину конструкції в околі перекриття моста, в області опори моста, а також проявляються на поверхні ґрунтового масиву, що є негативним явищем. При цьому

навантаження для конструкції можуть бути більшими, якщо забезпечити укріплення ґрунтового масиву шляхом створення бетонної подушки з підсиленими фізико-механічними характеристиками.

Отримані результати моделювання напружено-деформованого стану ґрунтів дозволяють управляти геотехнічними процесами: за необхідності укріплюючи опори мостоінженерних конструкцій для зменшення негативного впливу техногенних факторів впливу на навколишнє середовище. Також, можливо теоретично розрахувати та підібрати критично можливі властивості мостової конструкції для певного виду ґрунтового масиву з відомими геолого-геофізичними характеристиками.

З метою вивчення можливостей укріплення мостоінженерної споруди в місці прилягання моста до ґрунту і можливого зменшення навантаження на ґрунт проведено моделювання для зміненої форми моста, яка містить опору з матеріалу залізобетону і проникає всередину ґрунту на його схилі, як показано на наступних модельних прикладах (рис. 6).

Розподіл напружень у ґрунті в області дотикання опор на ґрунт має величину порядку 2*10⁵ Н/м². Збільшення напружень на ізолініях від величини 2,4*10⁵ Н/м² до 6,9*10⁵ Н/м² відповідає збільшенню питомого навантаження від 56 кН/м² до 100 кН/м² (рис. 6). При цьому характер зміни деформацій на схилах опор мостів відповідає зміні питомої ваги мостової конструкції. Збільшенню питомого навантаження від 56 кН/м² до 100 кН/м² відповідає зміна напружено-деформованого стану мостобудівної структури від стійкого до нестійкого.

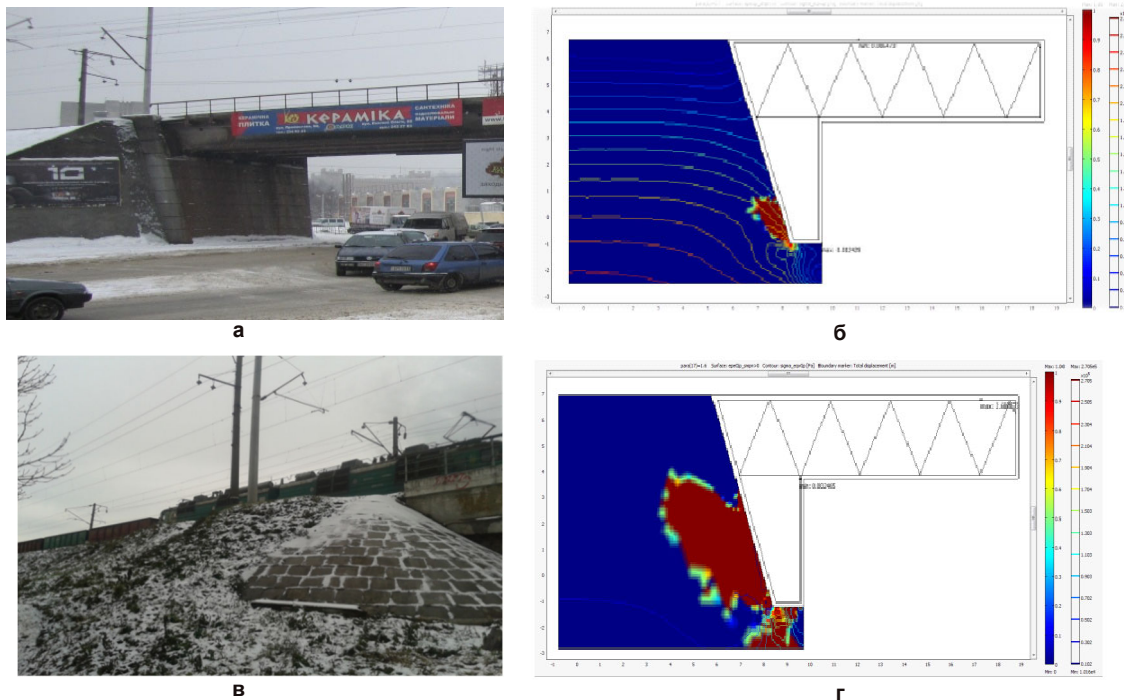


Рис. 5. Міст у районі вул. В. Чорновола, м. Львів, Україна (а – без навантаження; в – навантажений потягом) і результати моделювання напружено-деформованого стану гірських порід у фундаментах конструкцій каркасного типу (б – характеристики ненавантаженої моделі; г – модель навантажена потягом). Умовні позначення див. на рис. 3

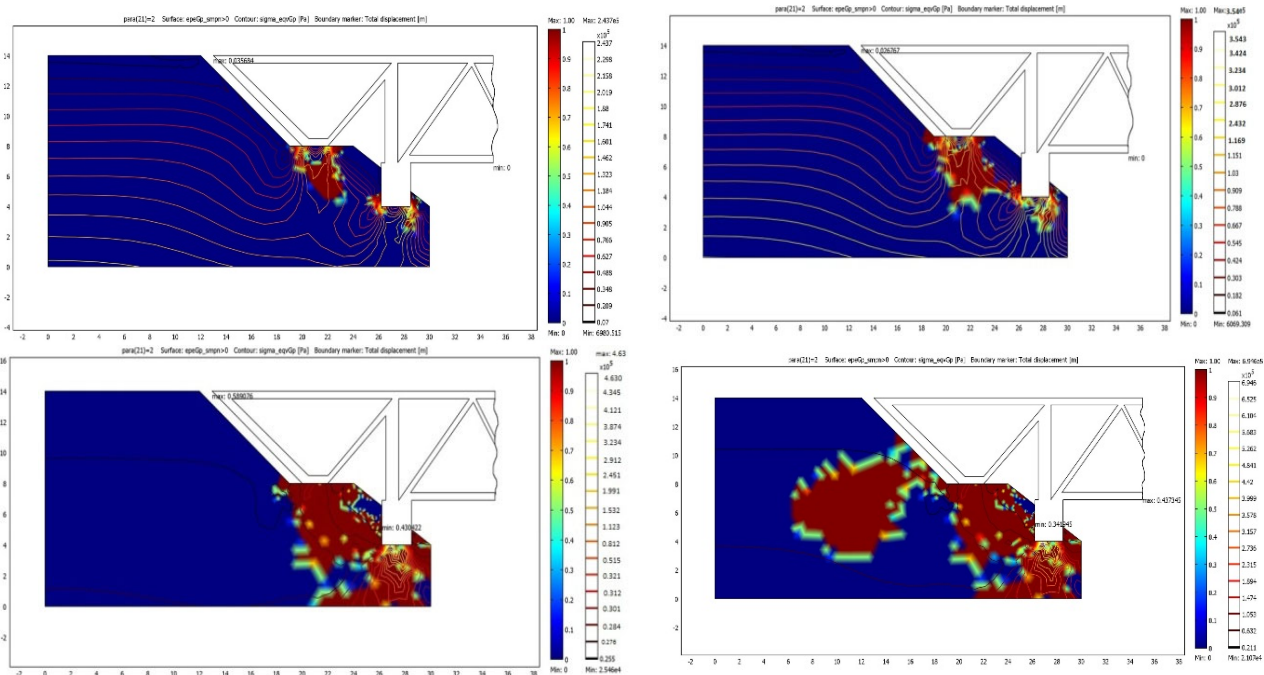


Рис. 6. Натурна модель, що представляє ґрунтовий масив із заданими геолого-геофізичними характеристиками (див. табл.) і визначеним напружено-деформованим станом

Дискусія та перспективи подальшого розвитку в даному напрямі. Узагальнимо, що задачі вивчення впливу ґрунтів в основі інженерних мостобудівних споруд на їхній напружено-деформований стан методами математичного моделювання тісно пов'язані, по-перше, з вибором методу їхнього розв'язання. На основі огляду існуючих публікацій для дослідження було обрано метод скінчених елементів, за допомогою якого можна розв'язати набагато більш загальні задачі щодо вивчення будови земної кори, ніж із використанням аналітичних методів. Використання числового методу для цих задач передбачає неточності в розв'язанні, пов'язані з різкими

змінами фізичних характеристик: розломами, пустотами, зсувами. Те ж саме в різних проявах може стосуватись і комбінованих методів.

По-друге, обраний метод необхідно оптимально використати: правильно здійснити фізичну і математичну постановку задачі, розробити алгоритм використання методу. Вирішуючи практичні задачі, необхідно дослідити стійкість і збіжність МСЕ, розв'язати задачі на тестових прикладах і порівняти їх з результатами із практики.

Висновки. Шляхом проведення числових експериментів отримано модельні результати, що дозволяють

теоретично розрахувати і визначити напружено-деформовані стани ґрунтового масиву під інженерно-будівельними (мостовими) конструкціями та передбачити небезпеку руйнування масивів унаслідок зростання напружень і деформацій під впливом дії навантажень.

Досліджено та проаналізовано метод локалізації та ліквідації надзвичайних ситуацій, шляхом моделювання поведінки ґрунтового масиву внаслідок дії структурних навантажень.

Застосування наведеної методики дозволяє управляти геотехнічними процесами і надавати рекомендації щодо зменшення негативного впливу техногенних факторів на навколишнє середовище, дає можливість теоретично спрогнозувати стійкість інженерних споруд і на практиці мінімізувати наслідки надзвичайних ситуацій від напружень і деформацій ґрунтів під мостоінженерними конструкціями.

Список використаних джерел

- Вербицький, Т.З., Стародуб, Ю.П., Брич, Т.Б. (1988). Вивчення розподілу напружень, деформацій і переміщень в масиві гірських порід з циліндричною неоднорідністю. *Геофізичний журнал*, 6, 36–43.
- Верпаховська, О.О., Пилипенко, В.М. (2019). Зображення глибинної будови геологічного середовища із застосуванням сейсмічної міграції рефрагованих хвиль. К.: *Наук. думка*.
- Вишва, 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, Київ.
- Вишва, С.А., Винниченко, О.Б., Кендзера, О.В. (2008). Вплив природних і техногенних процесів на потенційно небезпечні об'єкти. Монографія. К.: ВПЦ "Київський університет".
- Захаров, Л.В., Колоколов, Н.М., Цейтлін, А.Л. (1983). Сборные неразрезные железобетонные пролетные строения мостов. М.: *Транспорт*.
- Корнієнко, М.В. (2007). Механіка ґрунтів. К.: КНУБА.
- Мости та труби. Основні вимоги проектування. (2009). *ДБН В.2.3-22:2009*.
- Мостовой, В.С., Мостовой, С.В., Кондра, С.М., Страшко, Ж.С. (2011). Оценка информативных параметров состояния строительных конструкций в режиме мониторинга. *Промышленное строительство и инженерные сооружения*, 1, 24–29.
- Основи та фундаменти будівель і споруд. Основні положення. (2018). *ДБН В.2.1-10:2018*.
- Рекомендації по комплексным мерам защиты зданий и сооружений на оползнеопасных склонах. (1989). Ред. А.И. Капитоненко. К.: НИИСК.
- Рыжов, А.М., Тимофеев, С.В. (1989). Рекомендации по расчёту оползневого давления на заданный элемент массива и общей устойчивости оползнеопасных склонов. К.: НИИСК.
- Стародуб, Ю.П. (1998). Прямая динамична задача сейсміки для вивчення будови земної кори. Львів: Світ.
- Стародуб, Ю.П., Гончар, Т.М., Федюк, Я.І., Захарченко, А.В. (2012). Моделювання напружено-деформованого стану основ у будівельних конструкціях мостів. *Міжнародна конференція Карпатського інституту геофізики НАН України*, Львів. Отримано з <https://virt.lidubgd.edu.ua/sta/1.pdf>
- Стародуб, Ю.П., Кендзера, О.В., Купльовський, Б.Є. (2007). Методика моделювання хвильових полів і напружено-деформованого стану в неоднорідному півпросторі з використанням методу скінченних елементів. Центр математичного моделювання ІПГММ НАН України. *Препринт № 07*.
- Трофимчук, А.Н., Калюх, Ю.І., Глебчук, А.С. (2008). Математическое моделирование устойчивости оползневого склона при подъеме уровня грунтовых вод. *Экология и ресурсы*, 18, 51–58.

Yu. Starodub, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,
E-mail: George_Starodub@yahoo.com;
A. Havrys, PhD (Tech.), Senior teacher,
E-mail: havrys.and@gmail.com;
Lviv State University of Life Safety,
35 Kleparivska Str., Lviv, 79000, Ukraine;
O. Kozionova, Leading Engineer,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

MODELLING OF THE EFFECTS OF THE ENVIRONMENTAL-GEOPHYSICAL STATE OF SOILS ON ENGINEERING BUILDING OBJECTS

The article deals with the method of the reaction modelling of soil strata under engineering objects to ecological and geophysical state in the problems of studying the negative influence of loads on a stress-strain state of soil under engineering objects. The problem of stability study is considered and the behaviour of soil in a vicinity of bridge-engineering structures is investigated.

To solve the problems of emergency protection, a method of modelling the reaction of the soil layer under the load on the engineering objects due to tectonic influences to study the stress-strain state of the ground crust in a vicinity of engineering objects is used.

An algorithm of the finite element method in the problem of studying the stress-strain state of soil base under engineering objects has been developed. The physical and mathematical formulation of the problem is carried out. The modelling problem is solved by test cases. Models of continuous environment of functioning engineering structures for which stress-strain characteristics of the soil massif modelled are developed. The theoretical definition and modelling of critical values of the stress-strain state of the soil mass under the influence of loads are carried out.

Modelling allows to predict the nature of the influence of mechanical processes on the ecological and geophysical state of the environment and to study the stability of engineering structures. Stress-deformation processes of the rock massif are investigated, as a result of which emergencies of natural and man-made characters can arise.

Keywords: soil, ecological and geophysical state, loaded engineering objects.

- Bathe, K.-J. (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice Hall.
- Chen, W.F., Mizuno, E. (1990). *Nonlinear Analysis in Soil Mechanics*. Elsevier.
- Doltsinis, I. (2000). *Elements of Plasticity*. WIT Press.
- Doltsinis, I. (2018). A note on the stiffness and flexibility natural approach to the training spring cell. *Engineering Computations*, 35 (3), 1130–1139.
- Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. (2005). *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Elsevier.

References

- Bathe, K.-J. (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice Hall.
- Chen, W.F., Mizuno, E. (1990). *Nonlinear Analysis in Soil Mechanics*. Elsevier.
- Mosty ta truby. Osnovni vymohty proektuvannia. (2009). *ДБН В. 2.3-22:2009*. [in Ukrainian]
- Osnovy ta fundamenti budivel i sporud. Osnovni polozhennia. (2018). *ДБН В.2.1-10:2018*. [in Ukrainian]
- Doltsinis, I. (2000). *Elements of Plasticity*. WIT Press.
- Doltsinis, I. (2018). A note on the stiffness and flexibility natural approach to the training spring cell. *Engineering Computations*, V.35 (3), 1130–1139.
- Kornienko, M.V. (2007). *Mekhanika hruntiv*. KNUBA. Kyiv. [in Ukrainian]
- Mostovoy, V.S., Mostovoy, S.V., Kondra, S.M., Strashko, Zh.S. (2011). Otsenka informativnykh parametrov sostoyaniya stroitelnykh konstruktсий v rezhime monitoringa. *Промышленное строительство и инженерные сооружения*, 1, 24–29. [in Russian]
- Rekomendatsii po kompleksnyim meram zaschityi zdaniy i sooruzheniy na opolzneopasnykh sklonakh. (1989). Eds. A.I. Kapitonenko. NIISK, Kyiv. [in Russian]
- Ryzhov, A.M., Timofeev, S.V. (1989). Rekomendatsii po raschyotu opolzneovogo davleniya na zadannyi element massiva i obschey ustoychivosti opolzneopasnykh sklonov. NIISK, Kyiv. [in Russian]
- Starodub, Yu.P., Kendzera, O.V., Kuplovskiy, B.Ie. (2007). Metodyka modeliuвання khvylovykh poliv i napruzhenno-deformovanoho stanu v neodnorodnomu pivprostori z vykorystanniam metodu skinchennykh elementiv. Tsentr matematychnoho modeliuвання IPPMM NAN Ukrainy. *Preprint № 7*. [in Ukrainian]
- Starodub, Yu.P. (1998). Priama dynamichna zadacha seismiky dlia vyvchennia budovy zemnoi kory. Lviv: Svit. [in Ukrainian]
- Starodub, Yu.P., Honchar, T.M., Fediuk, Ya.I., Zakharchenko, A.V. (2012). Modeliuвання napruzhenno-deformovanoho stanu osnov u budivelnykh konstruktсийakh mostiv. *Mizhnarodna konferentsiya Karpatskoho institutu heofizyky NAN Ukrainy, Lviv*. Retrieved from <https://virt.lidubgd.edu.ua/sta/1.pdf> [in Ukrainian]
- Trofimchuk, A.N., Kalyuh, Yu.I., Glebchuk, A.S. (2008). Matematicheskoe modelirovaniye ustoychivosti opolzneovogo sklona pri pod'eme urovnya gruntovykh vod. *Экология и ресурсы*, 18, 51–58. [in Russian]
- Verbytskyi, T.Z., Starodub, Yu.P., Brych, T.B. (1988). Vyvchennia rozpodilu napruzhen, deformatsii i peremishchen v masyvi hirs'kykh porid z tsylindrychnoiu neodnorodnistiu. *Geophysical Journal*, 6, 36–43. [in Ukrainian]
- Verpakhovska, O.O., Pylypenko, V.M. (2019). Zobrazhennia hlybynnoi budovy heolohichnoho sredovysshcha iz zastosuvanniam seismichnoi mihratsii refrahovanykh khvyly. Kyiv: Naukova dumka. [in Ukrainian]
- Vyzhva, S.A. Vynnychenko, O.B., Kendzera, O.V. (2008). Vplyv pryrodnykh i tekhnohennykh protsesiv na potentsiino nebezpechni ob'ekty: monohrafiia. Kyiv: VPTS "Kyivskyy universytet". [in Ukrainian]
- Vyzhva, S.A. (2004). Teoria i metodolohia kompleksnoi heodynamichnoi interpretatsii danykh heofizychnoho monitorynhu nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv. *Doctor's thesis (Geol. Sci. 04.00.22)*. Kyiv. [in Ukrainian]
- Zaharov, L.V., Kolokolov, N.M., Tseytlin, A.L. (1983). Sbornyie nerazreznyie zhelezobetonnyie proletnyie stroeniya mostov. Moskva: *Transport*. [in Russian]
- Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. (2005). *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Elsevier.

Надійшла до редколегії 25.05.20

Ю. Стародуб, д-р физ.-мат. наук, проф.,
E-mail: George_Starodub@yahoo.com;
А. Гавриш, канд. техн. наук, ст. препод.,
E-mail: havrys.and@gmail.com;
Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности,
ул. Клепаривска, 35, Львов, 79000, Украина;
О. Козионова, ведуш. инж.,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, Киев, 03022, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКОГЕОФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ НА ИНЖЕНЕРНЫЕ МОСТОСТРОИТЕЛЬНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Рассмотрена методика моделирования реакции почвенной толщи под инженерными объектами при изучении негативного влияния нагрузок на напряженно-деформированное состояние грунтов. Рассмотрена проблема изучения устойчивости состояния и исследовано поведение почвы в окрестности мостоинженерных строительных конструкций.

Для решения задач предупреждения чрезвычайных ситуаций использован метод моделирования реакции почвенного слоя на нагрузку под объектами инженерии и учтены тектонические воздействия при изучении напряженно-деформированного состояния земной коры в окрестностях инженерных объектов.

Разработан алгоритм использования метода конечных элементов в задаче изучения напряженно-деформированного состояния оснований грунтов под инженерными объектами. Осуществлена физико-математическая постановка задачи. Задача моделирования решается на тестовых примерах. Разработаны модели сплошной среды функционирования инженерных сооружений, для которых моделируются напряженно-деформационные характеристики массива почв. Проведено теоретическое определение и моделирование критических значений напряженно-деформированного состояния грунтового массива под воздействием нагрузок.

Моделирование позволяет предсказать характер воздействия механических процессов на эколого-геофизическое состояние окружающей среды и исследовать устойчивость инженерных сооружений. Исследованы напряженно-деформационные процессы горного массива, в результате которых возникают чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера.

Ключевые слова: грунты, эколого-геофизическое состояние, нагруженные инженерные объекты.