

18. Чернишова Л.І., Дженкова А.С. Особливості формування системи управління витратами вітчизняних підприємств. *Інноваційна економіка*. 2014. № 3 (52). С. 61–68.
19. Шаповалова Т.Ю., Фесенко Н.В. Аналіз сутності деяких категорій інвестиційної діяльності. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*: зб. наук. праць Харків: НТУ «ХПІ». 2011. № 26. С. 156-164.
20. Шарко В.В. Шляхи, основні напрями та інструменти механізму інтенсифікації виробництва промислового підприємства. *Економіка і управління*. 2012. № 4. С. 64–69.

Рукопис подано до редакції 26.09.2019

УДК 624.153.524

Р.О. ТИМЧЕНКО, д-р техн. наук, проф., Д.А. КРІШКО, канд. техн. наук, ст. викл.,
І.В. ХОРУЖЕНКО, аспірант
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОСНОВИ ПІД СТРУКТУРНИМИ ФУНДАМЕНТАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Мета. Проектування оптимальних конструктивних рішень з урахуванням конкретних умов експлуатації одна з головних інженерних задач. З розвитком технологій та зі стрімкими темпами використання програмного забезпечення при проектуванні, зрозуміння та конструюванні інженерних систем актуальним є впровадження в роботу програмних комплексів на основі МКЕ при моделюванні ґрунтової основи, її взаємодії з фундаментною конструкцією, аналізу роботи системи в цілому. Одним із ускладнень при математичному моделюванні складчастих фундаментів під опори ЛЕП є моделювання сумісної роботи фундаментної конструкції складної форми та ґрунтової основи, де необхідно підібрати модель ґрунтової основи, врахувати всі вихідні параметри, зімітувати роботу фундаменту до моменту повного залучення ґрунтової основи у роботу.

Методи дослідження. При вирішенні контактних задач застосовується метод кінцевих елементів, що активно використовується в сучасних програмних комплексах для моделюванні інженерних конструкцій, взаємодій та явищ. Вони відрізняються способами завдання моделі ґрунтової основи, та мають свої певні інструменти для зміни та коригування вихідних параметрів та аналізу. В той же час, при використанні будь-яких із програмних комплексів актуальним є також моделювання фундаментних конструкцій різних форм та видів.

Наукова новизна. Актуальність даної роботи пов'язана із розв'язанням поставленої задачі. Її результатом є встановлення залежності між зовнішнім навантаженням та осіданням фундаментної конструкції двох типів.

Практична значимість. Дослідження дають змогу оцінити роботу структурних фундаментів різного конструктивного рішення, математичне моделювання дозволяє всесторонньо проаналізувати результати та врахувати недоліки системи при подальших дослідженнях.

Результати. Встановлено, що при моделюванні особливу увагу слід звертати на призначення початкових параметрів системи, на вибір типу кінцевих елементів і оптимальної моделі ґрунтової основи. Були встановлені основні залежності між зовнішнім навантаженням та осіданням фундаментної конструкції. Аналізуючи графіки осідань обох фундаментних конструкцій було встановлено, що модель фундаменту-прототипу має більше нерівномірний характер осідань у кожній контрольній точці, в той час як криві осідань за показниками трьох різних точок оптимальної фундаментної конструкції мають практично аналогічні значення.

Ключові слова: складчастий фундамент, метод кінцевих елементів, напружено-деформований стан, контактна взаємодія, ґрунт, моделювання.

doi: 10.31721/2306-5451-2019-1-49-69-75

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Побудова математичної моделі – це центральний етап дослідження або проектування будь-якої системи. Математичне моделювання за допомогою програмних комплексів на основі методу кінцевих елементів (МКЕ) дозволяє в повному обсязі вирішувати складні інженерні задачі, досліджувати процеси та явища, аналізувати і прогнозувати роботу досліджуваної системи, мати змогу адекватно порівнювати роботу моделі та натурального процесу, явища тощо. На сьогоднішній день існують різноманітні програмні комплекси на основі методу кінцевих елементів, наприклад: Feadam, Sage-Crisp, Plaxis, Ansys, LiraSap, Nastran, ABAQUS та інш. Вони відрізняються способами завдання моделі ґрунтової основи, та мають свої певні інструменти для зміни та коригування вихідних параметрів та аналізу. В той же час, при використанні будь-яких із програмних комплексів актуальним є також моделювання фундаментних конструкцій нестандартних форм та

видів [1]. На сьогоднішній день досвід використання програмних комплексів для моделювання складних фундаментних систем або складних фундаментів у поєднанні з ґрунтовою основою має не достатню вивченість.

Аналіз досліджень і публікацій. Вітчизняні та закордонні вчені галузі активно використовують математичне моделювання за допомогою програмних комплексів для дослідження напружено-деформованого стану основи [2-7]. З розвитком технологій та зі стрімкими темпами використання програмного забезпечення при проектуванні, розрахунках та конструюванні інженерних систем актуальним є впровадження в роботу програмних комплексів на основі МКЕ при моделюванні ґрунтової основи, її взаємодії з фундаментною конструкцією, аналізу роботи системи в цілому.

Першочергово при аналізі наукових досліджень приділяється увага дослідженню використання програмних комплексів при математичному моделюванні фундаментів-оболонки різного типу при взаємодії з ґрунтовою основою. Mahmoud Samir El-kady та Essam Farouk Badrawi провели експериментальні та числові дослідження із використанням п'яти квадратних фундаментів, з яких один фундамент плоскої форми в якості еталонного зразка та чотири фундаменти складеної форми оболонкового типу [8]. При математичному моделюванні використовувався програмний комплекс ABAQUS. Nisha P. Naik та Sabna Thilakan [9] досліджували роботу фундаменту-оболонки стовпчастого типу, аналізуючи різні кути нахилу бічних поверхонь. Моделі фундаментної деформації та властивості ґрунту були численно змодельовані за допомогою програмного забезпечення OptumG2 із застосуванням кінцевих елементів. Вчені Китаю Dongxue Nao, Rong Chen та Guangsen Fan займалися дослідженням граничної несучої здатності фундаментів опор ліній електропередач на структурно нестійких ґрунтах [10]. Математичне моделювання основи та фундаменту були здійснені у програмному комплексі ABAQUS.

Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Хоруженко І.В. дослідили напружено-деформований стан структурних фундаментів та основи при їх контактній взаємодії при різних умовах їх взаємодії [11]. Було виконано порівняння двох умов взаємодії фундаментної конструкції та ґрунтової основи. В першому випадку моделювалася ситуація, коли призматична складка контактує з основою тільки у межах горизонтальних опорних полиць. В другому випадку ґрунт основи повністю включався у роботу шляхом заповнення ним порожнини складки. У якості еталонного зразка ґрунту було обрано пісок пилюватий з характеристиками $c = 2$ кПа, $e = 0,75$, $E = 11$ МПа, $\varphi = 26^\circ$. Для визначення головних та еквівалентних напружень було обрано теорію Кулона-Мора (модель ґрунтової основи) у якості теорії міцності при оцінці несучої здатності ґрунтової основи. В результаті було зроблено висновки, що кращі результати продемонструвала робота фундаменту сумісно з ґрунтом, що можна пояснити тим фактом, що ґрунт та фундамент в такому випадку діють як єдине ціле. У випадку, коли призматична складка спирається на ґрунт лише через опорні горизонтальні полиці і саме через них передає навантаження на ґрунт, зі збільшенням жорсткості складки еквівалентні напруження зменшуються. Це пояснюється тим, що при збільшенні жорсткості складки вона перестає працювати як тонкостінна конструкція, втрачаючи властивості оболонки, і її робота при збільшенні жорсткості більше схожа на роботу звичайної фундаментної плити.

Аналогічно було проведені дослідження впливу геометричних параметрів складчастого фундаменту-оболонки на величину несучої здатності [12]. Для математичного моделювання взаємодії фундаментної конструкції та ґрунтової основи було застосовано програмний комплекс LiraSap-2013. Було виконано моделювання однієї призматичної складки фундаменту з відомими геометричними параметрами та фізичними характеристиками [13, 14], надалі досліджувалася робота одного типового призматичного штапу при зміні умов роботи та взаємодії з ґрунтовою основою. Для дослідження напружено-деформованого стану основи при різних типах взаємодії системи «фундамент-основа» розв'язання задачі відбувалося у плоскій постановці. В якості змінного параметру на даному етапі дослідження було обрано ширину опорної частини складки. В процесі математичного моделювання необхідно було дослідити як впливає цей параметр на несучу здатність основи. В процесі аналізу біло встановлено, що при математичному моделюванні фундаментної складки в плоскій задачі зміна ширина опорної частини суттєво не впливає на несучу здатність основи. Проте це може бути наслідком того, що аналіз виконувався в плоскій постановці. Тому дані результати є основою для подальшого аналізу та досліджень при моделюванні об'ємної задачі.

Постановка завдання. Метою дослідження є вивчення контактної взаємодії фундаментної конструкції та ґрунту основи за допомогою математичного моделювання; аналіз значення напружено-деформованого стану основи.

Викладення матеріалу та результати. Одним із ускладнень при математичному моделюванні складчастих фундаментів під опори ЛЕП є моделювання сумісної роботи фундаментної конструкції складної форми та ґрунтової основи, де необхідно вдало підібрати модель ґрунтової основи, врахувати всі вихідні параметри, зімітувати роботу фундаменту до моменту повного залучення ґрунтової основи у роботу.

Моделювання контактної задачі структурного фундаменту двох типів з основою здійснювалося в програмному комплексі «Ліра-САПР», що призначений для проектування і розрахунку машинобудівних та будівельних конструкцій різного призначення. Розрахунки в програмі виконуються як на статичні, так і на динамічні навантаження. Основою розрахунків є метод кінцевих елементів (МКЕ). Різні модулі, що підключаються (процесори) дозволяють робити підбір і перевірку перерізів сталевих і залізобетонних конструкцій, моделювати ґрунт, розраховувати мости і поведінку будівель в період монтажу тощо [15].

Для оптимізації процесу розрахунку математичної моделі було прийнято рішення брати за розрахункову довжину смугу в 1 м і проводити розрахунок в об'ємній постановці задачі. Також було змодельована тільки $\frac{1}{4}$ частина фундаментної системи в місці розташуванні однієї з баз опори ЛЕП, припускаючи, що інші частини фундаментної системи будуть працювати аналогічно. Такі дії можливі за умови рівномірного розподілення навантаження від опори ЛЕП на фундаментні балки, тобто була змодельована сумісна робота вертикально навантаженого фундаменту із основою.

Для моделювання призматичної складки використовувався кінцевий елемент (КЕ) типу 41. Даний кінцевий елемент призначений для міцнісного розрахунку тонких пологих оболонки (плит, балок-стінок). В кожному вузлі в такому кінцевому елементі є по 6 ступенів свободи: U – горизонтальне переміщення, додатній напрям якого співпадає із напрямком вісі X_1 ; V – горизонтальне переміщення, додатній напрям якого співпадає із напрямком вісі Y_1 ; W (Z) – вертикальне переміщення (прогин), додатній напрям якого співпадає із напрямком вісі Z_1 ; U_x – кут повороту відносно вісі X_1 ; U_y – кут повороту відносно вісі Y_1 ; U_z – кут повороту відносно вісі Z загальної системи координат. Ступені свободи U , V відповідають мембранним, а W , U_x , U_y – згинальними деформаціям. Кут повороту U_z не входить до переліку вузлових параметрів, що визначають деформації елемента та в місцевій системі координат він дорівнює нулю. Ця ступінь свободи з'являється при стикуванні елементів, що не лежать в одній площині, і необхідна для врахування просторової роботи конструкції.

Для моделювання ґрунтової основи було використано універсальний просторовий восьми-вузловий ізопараметричний КЕ 36. Даний тип КЕ призначений для міцнісного розрахунку континуальних об'єктів та масивних просторових конструкцій. В кожному вузлі даного КЕ є 3 ступені свободи U , V , W , що визначені відносно вісей X , Y , Z загальної системи координат. Вони представляють собою лінійні переміщення вздовж відповідних вісей, додатні напрямки яких співпадають із напрямком вісей координат.

Для моделювання балок було використано універсальний просторовий стрижневий КЕ 10. Такий стрижень має місцеву праву декартову систему координат X_1 , Y_1 , Z_1 , відносно якої визначаються зусилля та задається місцеве навантаження. Для поєднання такого стрижня до вузлів схеми передбачені різні можливості: за допомогою абсолютно жорстких вставок вздовж місцевих осей; за допомогою зняття зв'язку по будь-якому із напрямків (зняття лінійного зв'язку забезпечує прослизання, зняття кутового зв'язку – вільний поворот, тобто циліндричний шарнір). Матриця жорсткості будується для гнучкої частини стрижня. Даний кінцевий елемент може бути використаний при всіх признаках схеми, що використовуються при розрахунку стрижневих конструкцій.

В результаті побудови кінцево-елементної моделі було отримано модель із 202673 кінцевих елементів різного типу, та 209674 вузлів.

Шарнірну взаємодію між балками та складкою змодельовано об'єднанням відповідних вертикальних переміщень (за допомогою створення груп об'єднання переміщень).

Попередня глибина гуртової товщі, що стискається, визначалася із умови рівності середньому тиску (тиск від дії зовнішнього навантаження) під подошвою фундаменту 20 відсоткам

від природного тиску, при подальшому розрахунку відбувалося коригування глибини ґрунтової товщі, що стискається. При цьому нижня частина 3/4 ґрунтової товщі була змодельована кінцевими елементами більшого розміру для оптимізації процесу розрахунку.

Як відомо, конструкції за обрисом близьким до арочного, передають на опорні частини горизонтальні зусилля, які, в свою чергу, призводять до появи розтягуючих напружень в основі складки. З метою зменшення негативного впливу розпору, який передається на ґрунт, в складці влаштовуються ребра жорсткості (діафрагми).

Основним критерієм граничної несучої здатності основи було виникнення пластичних деформацій основи. Для визначення головних та еквівалентних напружень при розширеному аналізі можна обирати одну із запропонованих теорій міцності: найбільших дотичних напруг; енергетична Губера-Хенкі-Мізеса; теорія Мора (R_t , R_c); теорія Друкера-Прагера (R_t , R_c); теорія Писаренко-Лебедева (R_t , R_c); теорія Генієва (R_t , R_c); теорія Кулона-Мора (c , φ); теорія Боткіна (c , φ). Для визначення головних та еквівалентних напружень було обрано теорію Кулона-Мора (модель ґрунтової основи) у якості теорії міцності при оцінці несучої здатності ґрунтової основи. В даному випадку значення еквівалентних напружень при розширеному аналізі порівнюються з граничними значеннями R_c та R_t , що є граничними значеннями стиску та розтягу, що розраховуються попередньо за формулами 1 та 2

$$R_c = \frac{2 \cdot C \cdot \cos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}, \quad (1)$$

$$R_t = \frac{2 \cdot C \cdot \cos(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)}, \quad (2)$$

де C – коефіцієнт зчеплення, φ – кут внутрішнього тертя.

При цьому еквівалентні напруження σ_e за теорією міцності Кулона-Мора для ґрунтів розраховується за формулою

$$\sigma_e = (1 - \chi) \cdot \left(\sigma_0 - \frac{\sigma_i}{3} \cdot \sin(\psi) \right) + (1 + \chi) \cdot \frac{\sigma_i \cdot \cos(\psi)}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

тут $\chi = \left| \frac{R_t}{R_c} \right|$, $\psi = \frac{1}{3} \cdot \arcsin \left(\frac{27 \cdot J_3}{2 \cdot \sigma_i^3} \right)$, $J_3 = (\sigma_1 - \sigma_0) \cdot (\sigma_2 - \sigma_0) \cdot (\sigma_3 - \sigma_0)$, де σ_1 , σ_2 , σ_3 – головні напруження; σ_0 – середнє напруження, що дорівнює $\sigma_0 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 / 3$.

Навантаження прикладалося поступово з кроком 1 т у вигляді зосередженої сили, місцерозташування якої визначалося за місцем встановлення бази опори ЛЕП. До моменту виникнення під подошвою фундаменту еквівалентних напружень, що перевищують гранично допустимі, фіксувалися значення вертикальних переміщень (осідання) при кожному етапі навантаження. Мозаїка еквівалентних напружень зображена на рис. 1. Значення вертикальних переміщень фіксувалися під верхньою полицею складки, на кожній із трьох складок. На рис. 2 зображено мозаїку напружень N_z для обох типів фундаментів, на рис. 3 зображені фінальні значення вертикальних переміщень.

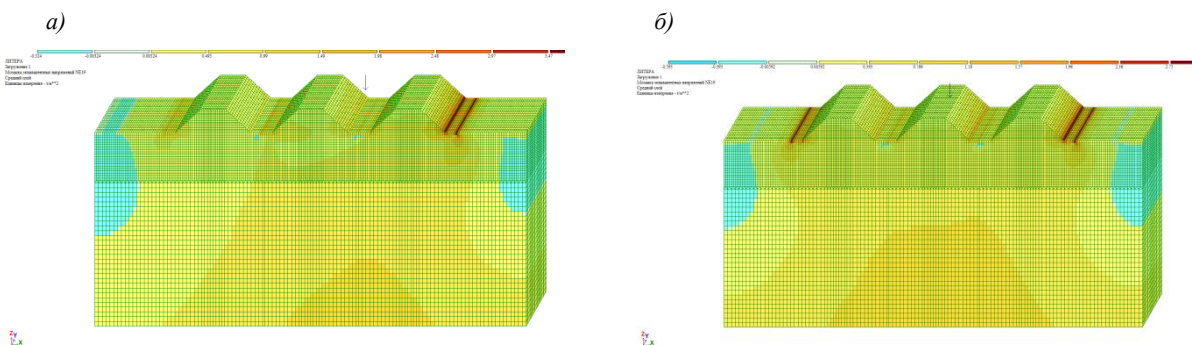


Рис. 1. Мозаїка еквівалентних напружень: а – для фундаменту-прототипу при граничному навантаженні в 10 т; б – для нового типу фундаменту при граничному навантаженні в 14 т

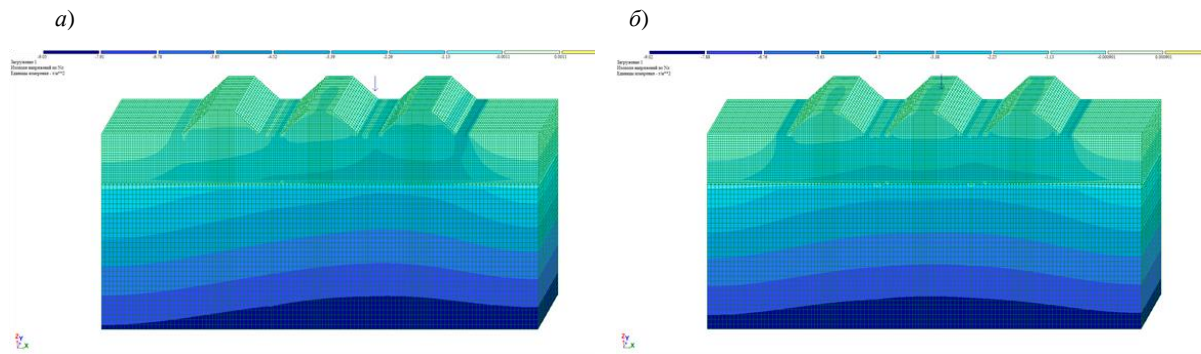


Рис. 2. Мозаїка напружень N_z : *a* – фундаменту-прототипу при граничному навантаженні в 10 т; *б* – нового типу фундаменту при граничному навантаженні в 14 т

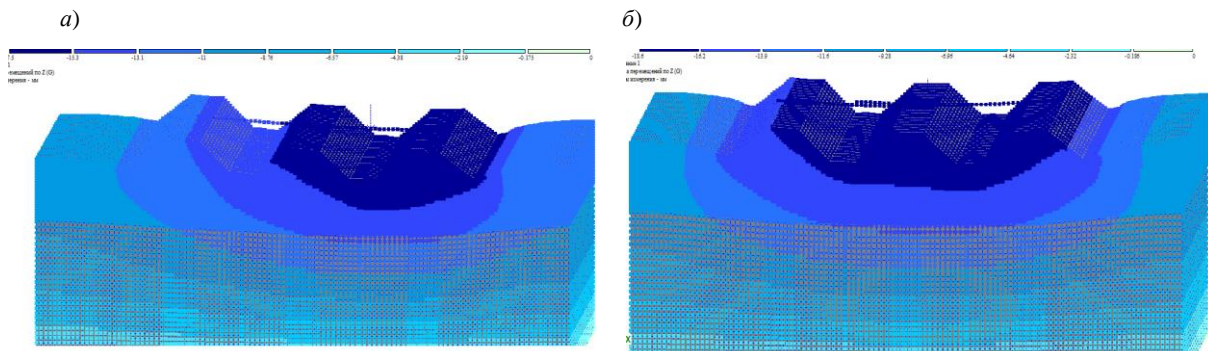


Рис. 3. Мозаїка вертикальних переміщень: *a* – фундаменту-прототипу при граничному навантаженні в 10т; *б* – нового типу фундаменту при граничному навантаженні в 14 т

В процесі поступового нарощення навантаження фіксувалися значення осідання фундаментної конструкції. В результаті було отримано графік залежності осідань від навантаження (рис. 4). На графіку видно, що залежність осідань від навантаження діє приблизно по лінійному закону і є прямопропорційною.

Аналізуючи графік осідань моделі фундаменту-прототипу (рис. 4 *a*) можна побачити розбіжність значень осідань у кожній точці на складках. Це свідчить про нерівномірність розподілу навантаження в даній системі. Тип передачі навантаження через суцільну опорну балку не забезпечує повноцінну та рівномірну роботу всього ґрунтового масиву під кожною складкою одночасно. Напруження N_z , що виникли в ґрунтовому масиві (рис. 2 *a*), аналогічно мають нерівномірних характер показників.

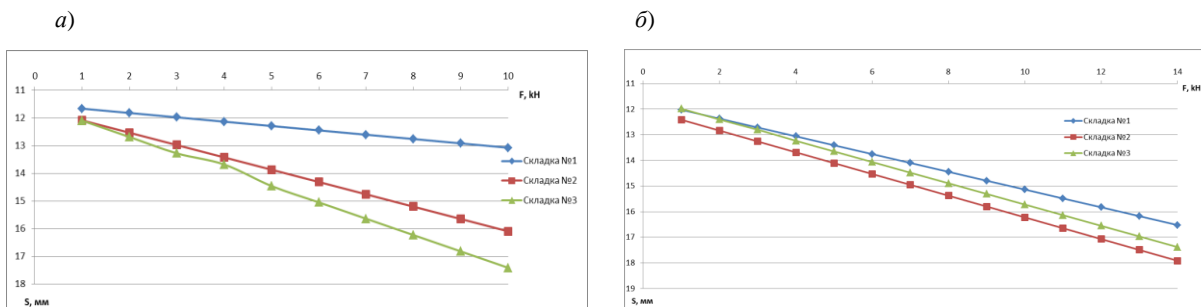


Рис. 4. Графік залежності осідань від зовнішнього навантаження: *a* – прототипної моделі складчастого фундаменту; *б* – оптимальної моделі складчастого фундаменту

В той же час на графіку осідань оптимальної моделі фундаменту (рис. 4 *б*) видно, що криві осідань за показаннями трьох різних точок системи мають практично аналогічні значення. Це свідчить про те, що дана модель фундаменту реалізується за рахунок особливості сумісної роботи конструктивних елементів складчастого фундаменту. Завдяки застосуванню шарнірного з'єднання призматичних складок з опорними балками досягається більш рівномір-

рне розподілення зовнішнього навантаження на елементи фундаментної системи. Напруження N_z , що виникли в ґрунтовому масиві (рис. 2 б), мають аналогічний рівномірний характер значень показників.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Наукова новизна дослідження полягає у встановленні залежності між зовнішнім навантаженням та осіданням фундаментної конструкції двох типів. Аналізуючи графіки осідань обох фундаментних конструкцій було встановлено, що модель фундаменту-прототипу має більше нерівномірний характер осідань у кожній контрольній точці, в той час як криві осідань за показниками трьох різних точок оптимальної фундаментної конструкції мають практично аналогічні значення. Додатково, більше значення гранично допустимого навантаження в 14 тонн було отримано для оптимальної конструкції фундаменту. Проте для більш досконалого вивчення сумісної роботи фундаментної конструкції та основи при їх контактній взаємодії наступний етап математичного моделювання буде виконуватися для повно розмірної фундаментної моделі.

Список літератури

1. **Тимченко Р.А.** Совершенствование фундаментов-оболочек для высотных сооружений / **Р.А.Тимченко, В.В. Васильченко** // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ, 2003. – Вип. 1. – С. 104-107.
2. **Тимченко Р.А.** Осадки фундаментных конструкций на нелинейно-деформируемых основаниях / **Р.А. Тимченко, Д.А. Кришко** / Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ, 2012. – Вип. 29. – С. 110-114.
3. **Пронозин Я.А.** Экспериментальные исследования взаимодействия мембранного фундамента с грунтовым основанием / **Я.А. Пронозин, Л.Р. Епифанцева** // Всероссийская науч.-практ. конф. Молодых ученых и специалистов, посвященная XX-летию создания ООО НПО «Фундаментстройаркос»: Стратегия инновационного развития, строительства и освоения севера. – Тюмень, 2011г.- С.131-134.
4. **Kurian N.P.** Behaviour of shell foundations under subsidence of core soil / **N.P. Kurian** // Proc. 13 Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engrg., New Delhi, India, 1994.- №2,- pp.591-594.
5. **Huat B. K. B.** Finite Element Study Using FE Code (PLAXIS) on the Geotechnical Behavior of Shell Footings / **В. К. В. Huat , А.Т. Mohammed** // Journal of Computer Science, 2 (1), 2006. - pp.104-108.
6. **Тетиор А.Н.** Фундаменты-оболочки / **А.Н. Тетиор, А.Г. Литвиненко.** - Москва: Стройиздат, 1975. -136 с.
7. **Mohammed Y. Fattah.** The Behavior of Conical Shell Foundation under Dynamic Loads / **Mohammed Y. Fattah, Waleed A. Waryos, Mohammed A. E. Al-Hamdani** // The 2nd International Conference of Buildings, Construction and Environmental Engineering (BCEE2-2015), Volume:1 – At Beirut, Lebanon, 2015.
8. **Mahmoud Samir El-kadya.** Performance of isolated and folded footings / **Mahmoud SamirEl-kadya, Essam Farouk Badrawi** // Journal of Computational Design and Engineering 4 - 2017. - pp.150-157. (doi.org/10.1016/j.jcde.2016.09.001)
9. **Nisha P. Naik.** Geotechnical behavior of shell foundations / **Nisha P. Naik, Sabna Thilakan** // 50th Indian geotechnical conference. – Pune (India), 2015. – pp. 205-216.
10. **Dongxue Hao.** Ultimate Uplift Capacity of Transmission Tower Foundation in Undisturbed Excavated Soil / **Dongxue Hao, Rong Chen, Guangsen Fan** // Energy Procedia 17, 2012. – pp. 1209 – 1216 (doi: 10.1016/j.egypro.2012.02.228)
11. **Timchenko R.A.** Mathematical modeling of the folded foundation interaction with the base by varying the structure stiffness / **R.A. Timchenko, D.A., Krishko, I.V. Khoruzhenko** // Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering. – Issue 2 (51), 2018. – pp. 145-150.
12. **Тімченко Р.О.** Дослідження впливу геометричних параметрів складчас-того фундаменту-оболонки на величину несучої здатності основи / **Р.О.Тімченко, Д.А. Кришко, І.В. Хоруженко** // Гірничий Вісник – Вип.104 – Кривий Ріг: КНУ, 2019 – с.65-69.
13. **Timchenko R.A.** Construction solution of folded-plate shell foundation for power transmission towers / **R.A. Timchenko, D.A., Krishko, I.V. Khoruzhenko** // Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering. – 2 (49), 2017. – pp. 207-214.
14. Пат. 130294 Україна, МПК (2018.01) E02D 27/00. Фундамент під опори ліній електропередач / **Р.О. Тімченко, Д.А. Кришко, І.В. Хоруженко**; заявник і патентовласник – Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет». – u201802105, заявл. 28.02.2018; опубл. 10.12.2018, Бюл. №23.
15. **Гензерский Ю.В.** ЛИРА – САПР 2011. Учебное пособие / **Ю.В., Гензерский, Д.В. Медведенко, О.И. Паличенко, В.П. Титок** – Киев: Электронное издание, 2011, – 396 с.

Рукопис подано до редакції 27.09.2019