11. Вдосконалення системи адміністративно-територіального устрою в Україні: автореф. дис... канд. екон. наук: 08.00.05 [Електронний ресурс] / О.В. Чернюк; НАН України. Рада по вивч. продукт. сил України. – К., 2007. – 20 с.
12. **Третяк А.М., Другак В.М., Третяк Р.А.** Формування меж адміністративно-територіальних утворень. Навчально-методичний посібник. К.: ТОВ ЦЗРУ, 2004. – 85 с
13. Державний устрій України: проблеми теорії і практики: Автореф. дис... д-ра політ. наук: 23.00.02 [Електронний ресурс] / С.О. Телешун; НАН України. Ін-т держави і права ім. В.М.Корецького. – К., 2000. – 34 с.
14. Реформування адміністративно-територіального устрою України: проблеми та перспективи реалізації [Електронний ресурс] / А.П. Павлюк // Стратегічні пріоритети, №1(2), 2007 р. – Режим доступу: http://old.niss.gov.ua/book/StrPryor/2/4-3-Pavliuk.pdf
15. Проблеми державного земельного кадастру в Україні [Електронний ресурс] / А.Г. Мартин. – Режим доступу: http://www.myland.org.ua/ userfiles/file/AGMartyn_cadastre.pdf
16. **N. Brown, I. Geisler** and L. Troyer RTK Rover Performance using the Master – Auxiliary Concept // Networked Reference Stations and Structural Monitoring Leica Geosystems, Heinrich – Wild – Strasse, Heerbrugg, 9435, Switzerland, 2006.–с.135 – 144.
17. **Кордуба Ю., Смірнов** Є. Фотограмметрія. – К. – 2007. – 205 с.
18. **А.Л. Островський, О.І. Мороз, В.Л. Тарнавський**. Геодезія. – Львів: 2007 – С.482 – 485.
19. Про порядок розроблення генеральних планів [Електронний ресурс] // Здолбунівська районна державна адміністрація. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: http://zdolbun.gov.ua/shema – rozroblennya – generalnyh – plani/.
20. Державні будівельні норми України "Склад та зміст генерального плану населеного пункту" ДБН Б.1.1 – 15:2012 [Електронний ресурс] // Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово – комунального господарства України. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: http://ndpi.com.ua/articles/22.pdf.
21. Закон України «Про Генеральну схему планування території України» від 7 лютого 2002 року № 3059 – III

Рукопис подано до редакції 18.04.2018

УДК 624.153.524

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СКЛАДЧАСТОГО ФУНДАМЕНТУ-ОБОЛОНКИ НА ВЕЛИЧИНУ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ОСНОВИ

Мета. Проектування оптимальних конструктивних рішень з урахуванням конкретних умов експлуатації одна з головних інженерних задач. Впровадження в роботу програмних комплексів на основі МКЕ при моделюванні ґрунтової основи, її взаємодії з фундаментною конструкцією, аналізу роботи системи в цілому. 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. Програмні комплекси на основі методу кінцевих елементів, наприклад: Feadam, Sage-Crisp, Plaxis, Ansys, LiraSapr, Nastran, ABAQUS та інш.

Наукова новизна. Встановлення залежності між зміною геометричних параметрів штампу та несучою здатністю ґрунтової основи.

Практична значимість. Дослідження дають змогу оцінити роботу структурних фундаментів при зміні геометричних параметрів, 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. Було виконано моделювання взаємодії складчастого фундаменту з основою в умовах плоскої задачі за допомогою програмного комплексу LiraSapr-2013. Проаналізовано характер роботи фундаменту при різних умовах взаємодії з основою та при різних розмірам опорних частин складки. В процесі аналізу було 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 данні результати є основою для подальшого аналізу та досліджень при моделюванні об'ємної задачі.

Ключові слова: складчастий фундамент, метод кінцевих елементів, напружено-деформований стан.

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-104-148-153

© Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Хоруженко І.В., 2018

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Проектування оптимальних конструктивних рішень з урахуванням конкретних умов експлуатації одна з головних інженерних задач. При вирішенні геотехнічних задач основною метою є вивчення умов взаємодії фундаментних конструкцій з основою, визначення факторів та чинників, що впливають на напружено-деформований стан основи. Одним із методів досліджень напружено-деформованого стану є математичне моделювання, завдяки якому можна проаналізувати вплив різних параметрів на несучу здатність онови. Основним інструментом для математичного моделювання є метод кінцевих елементів (МКЕ), що активно використовується для вирішення інженерних задач, зокрема геотехнічних. На сьогоднішній день існують різноманітні програмні комплекси на основі методу кінцевих елементів, наприклад: Feadam, Sage-Crisp, Plaxis, Ansys, LiraSapr, 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 у поєднанні з ґрунтовою основою має не достатню вивченість.

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідженням напружено-деформованого стану основи займалися багато вчених галузі, як вітчизняні, так і закордонні, використовуючи в своїх роботах різноманітні методи та інструменти аналізу [2-7]. Напружено-деформований стан суцільних фундаментів оболонок досить близько відповідає напружено деформованому стану оболонок у покриттях. Під час експериментальних досліджень заміри напружень в основі показали, що форма підошви фундаменту впливає, в основному, на розподіл напружень поблизу підошви [8]. Великим є вплив форми підошви на розподіл горизонтальних напружень на досить великому віддалені від підошви (рис. 1). Дослідження методом фотопружності на об'ємних моделях основ підтвердили вплив форми підошви на розподіл контактних тисків. Було встановлено, що розподіл напружень під плоским та увігнутими штампами в основному аналогічно, але під краями жорсткого увігнутого штампу спостерігається велика концентрація напружень . Великий вплив на розподіл контактних тисків має жорсткість фундаменту. Зміни жорсткості оболонки може призвести до якісної зміни форми епюри контактних тисків.

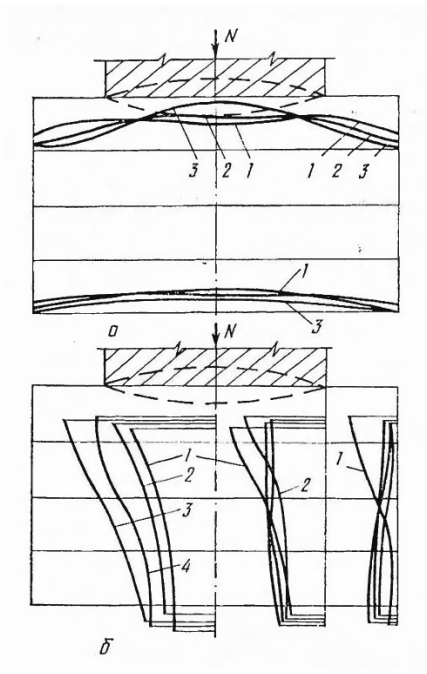

Рис. 1 Епюри напружень біля основи: *а* – у горизонтальних перерізах; *б* – у вертикальних перерізах; *1-3* – випуклий, плоский та увігнутий штампи; *4* – теоретичне рішення

На сучасному етапі розвитку наукових досліджень у сфері геотехнології актуальним є використання програмних комплексів на основі методу кінцевих елементів. Першочергово при аналізі наукових досліджень приділяється увага дослідженню використання програмних комплексів при математичному моделюванні фундаментів-оболонок 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 [9]. При математичному моделюванні використовувався програмний комплекс ABAQUS. У числовій моделі масив піщаного ґрунту описується 8-вузловим кубічним елементом трилінійного переміщення. Піщаний ґрунт моделюється як модель пружно-пластичного матеріалу з не пов'язаним правилом потоку з використанням моделі Кулона-Мора. Фундаментні опори моделюються як пластичний матеріал за допомогою лінійного елемента з кубічними об'ємними елементами з 8 вузлами і обмеженою інтеграцією (рис. 2). У висновку була виявлена мінімальна розбіжність між експериментальними та числовими результатами.

а) *б)*

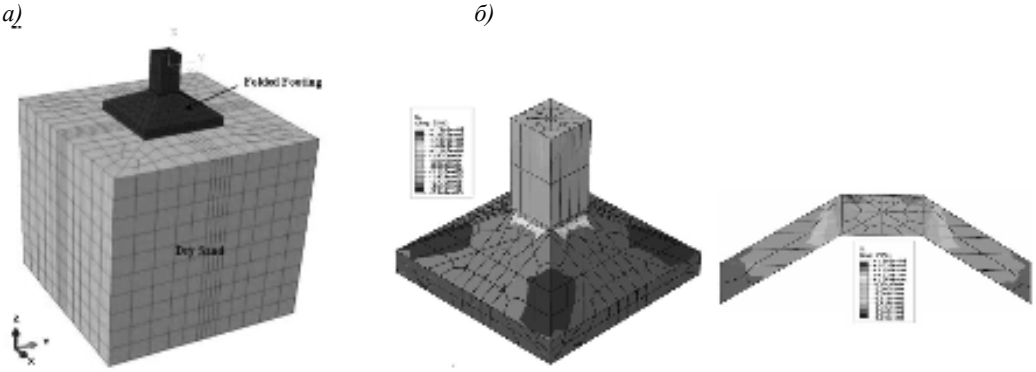

Рис. 2. Моделювання фундаменту та ґрунтової основи: *а* – сітка кінцевих елементів ґрунту основи та фундаменту; *б* – ізополя напружень для фундаменту типу «30 градусів»

Nisha P. Naik та Sabna Thilakan [10] 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. Піщана модель Кулона-Мора, що доступна в OptumG2, була використана для імітації трьох ґрунтових умов, а саме, пухких, середніх і щільних станів. Був проведений багаточисельний пружно-пластичний аналіз на моделях. В результаті були отримані загальні напруження, максимальні вертикальні переміщення. Результати показали, що фундамент з конфігурацією оболонки демонструє більшу несучу здатність ніж звичайні плоскі плитні фундаменти.

Mohammed Y. Fattah аналізував роботу конічного фундаменту-оболонки у програмному комплексі ANSYS [11]. Тривимірний кубічний елемент (Solid 65) був використаний для моделювання бетону з армованими прутами або без них. Сталеві арматурні прутки були представлені за допомогою 2-вузлового стрижня (Link8 в ANSYS) і включені у властивості 8-вузлів елементу куба. Тип кінцевого елементу 45 зазвичай використовується для 3-D моделювання твердих конструкцій. Елемент визначається вісьмома вузлами, що мають три ступені свободи на кожному із вузлів. Завдяки використанню симетрії навантаження, геометрії і розподілу армування, RPC-конічні фундаменти були розглянуті в аналізі методом кінцевих елементів. Вибраний сегмент був змодельований за допомогою ізопараметричних шестигранних об'ємних елементів Solid 65.

Вчені Китаю Dongxue Hao, Rong Chen та Guangsen Fan займалися дослідженням граничної несучої здатності фундаментів опор ліній електропередач на структурно нестійких ґрунтах [12]. Математичне моделювання основи та фундаменту були здійснені у програмному комплексі ABAQUS. Монолітний залізобетонний фундамент моделювався як лінійний пластичний матеріал з модулем пружності 40ГПа та коефіцієнтом Пуассона 0,2. Ґрунт основи вважається однорідним пружно-пластичним матеріалом, що описується моделлю Друкера-Прагера. Пружні параметри E = 30 МПа, ν = 0,3, γ=17 кН/м^3. Параметри моделі ґрунтової основи Кулона-Мора в тривісному напруженому стані, питоме зчеплення ґрунту та кут внутрішнього тертя можуть бути перетворені в параметри моделі Друкера-Прагера. При кінцево-елементному аналізі заглибленого фундаменту з розширеною основою поблизу розширеної бази завжди відбувається великі зміщення та деформації. Використання традиційних елементів Лагранжа в цих зонах можуть втратити точність [13]. На відміну від лагранжування, аналіз Ейлера є технікою кінцевих елементів, в яких матеріал може протікати через межі елементів у жорсткій сітці. Таким чином, Ейлерівська техніка може бути дуже ефективною при обробці задач, пов'язаних з дуже великими деформаціями, руйнуваннями матеріалу, з рідкими матеріалами. У цій роботі для дослідження ґрунту використовувався метод Ейлера.

Постановка завдання. Метою дослідження є вивчення впливу геометричних параметрів складчастого фундаменту-оболонки на величину несучої здатності основи, аналіз напружено-деформованого стану основи.

Викладення матеріалу та результати. Метою даного дослідження було вивчення напружено-деформованого стану фундаментної конструкцій та основи при їх контактній взаємодії. Завданням для даного етапу було проаналізувати вплив геометричних параметрів складчастого

фундаменту (ширина опорної частини) на несучу здатність ґрунтової основи та на осідання фундаментної конструкції.

Для математичного моделювання взаємодії фундаментної конструкції та ґрунтової основи було застосовано програмний комплекс LiraSapr-2013. Було виконано моделювання однієї призматичної складки фундаменту з відомими геометричними параметрами та фізичними характеристиками [14, 15], надалі досліджувалася робота одного типового призматичного штампу 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.

Для моделювання призматичної складки використовувався кінцевий елемент типу 2, що відповідає кінцевому елементу (КЕ) плоскої рами (в кожному вузлі присутні 3 ступені свободи: X – переміщення вздовж вісі X; Z – переміщення вздовж вісі Z; UY – поворот навколо вісі Y). Для моделювання ґрунтової основи використовувалися кінцеві елементи 21 та 22, що є прямокутними та трикутними КЕ плоскої задачі (балка-стінка). Даний кінцевий елемент призначений для міцнісного розрахунку пластин, що навантажені у своїй площині X1OZ1, за замовчуванням такий КЕ дозволяє моделювати плоский напружений стан. При цьому нижня частина 1/3 ґрунтової товщі була змодельована кінцевими елементами більшого розміру для оптимізації процесу розрахунку [1].

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. Основні геометричні параметри складки були незмінними, змінювалася тільки ширина опорної частини. Було обрано 3 варіанти – ширина опорної частини 10 см, 20 см і 30 см. 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 якості ґрунтової основи було обрано пісок звичайний з характеристиками c = 1,53кПа, e = 0,75, E = 11 МПа, φ = 25°.

На початковому етапі складка була розміщена на поверхні ґрунтової, по центру складки було прикладено навантаження, яке поступово збільшували. Моделювався процес поступового потрапляння ґрунту основи у порожнину складки зі збільшенням навантаженням. В процесі фіксувалися значення еквівалентних напружень, що виникали в тілі основи. Основним критерієм граничної несучої здатності основи було виникнення пластичних деформації основи. На рис. 3 зображено ізополя еквівалентних напружень при різних геометричних параметрах. При цьому фундамент з шириною опорної частини 10 см при взаємодії з основою витримав навантаження в 7,78 т, при ширині опорної частини 20 см – 7,54 т, при ширині опорної частини 30 см – 7,35 т.

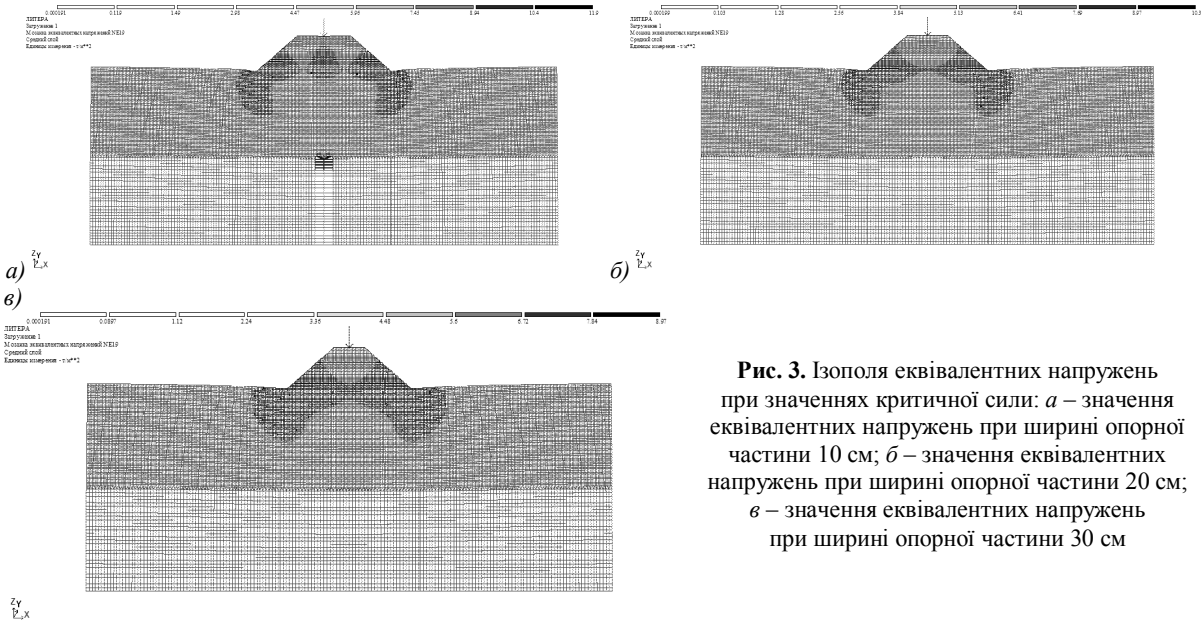

Рис. 3. Ізополя еквівалентних напружень при значеннях критичної сили: *а* – значення еквівалентних напружень при ширині опорної частини 10 см; *б* – значення еквівалентних напружень при ширині опорної частини 20 см; *в* – значення еквівалентних напружень при ширині опорної частини 30 см

В процесі поступово нарощення навантаження фіксувалися значення осідання фундаментної конструкції. В результаті було отримано графік залежності осідань від навантаження (рис. 4).

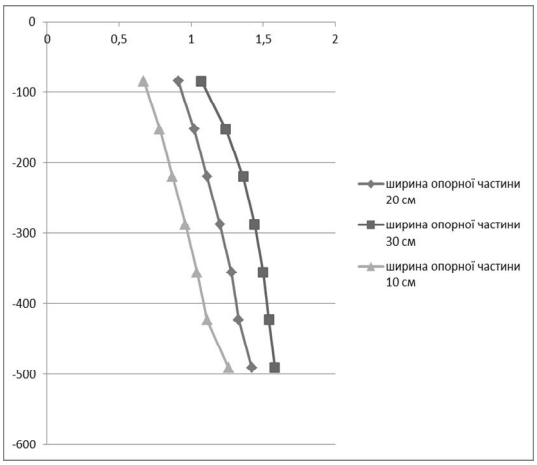

Рис. 4. Графік залежності осідань фундаменту від величини навантаження для трьох варіантів геометричних параметрів

На графіку видно, що залежність осідань від навантаження діє приблизно по лінійному закону і є прямопрапорційною. При цьому фундамент із шириною опорної частини має найменшу величину осідань при однакових навантаженнях. Проте при досяганні межі пружності всі три варіанти фундаментних складок працюють однаково, і в результаті ми отримали однакові фінальні значення осідань.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Наукова новизна дослідження полягає у встановленні залежності між значеннями геометричних параметрів та несучою здатністю ґрунтової 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 данні результати є основою для подальшого аналізу та досліджень при моделюванні об'ємної задачі.

Список літератури

1. **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.

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. **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.

4. **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.

5. **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, 2011. –С. 131-134.

6. **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.

7. **Huat B. K. B.** Finite Element Study Using FE Code (PLAXIS) on the Geotechnical Behavior of Shell Footings / **B. K. B. Huat, A. T. Mohammed** // Journal of Computer Science. – № 2 (1), 2006. – pp. 104-108.

8**. Тетиор А. Н.** Фундаменты-оболочки / **А. Н. Тетиор, А. Г. Литвиненко. –** М.: Стройиздат, 1975. –136 с.

9. **Mahmoud S. E.** Performance of isolated and folded footings / **S. E. Mahmoud, E. F. Badrawi** // Journal of Computational Design and Engineering 4 – 2017. – pp. 150-157. (doi.org/10.1016/j.jcde.2016.09.001).

10. **Nisha P. N.** Geotechnical behavior of shell foundations / **P. N. Nisha, S. Thilakan** // 50th Indian geotechnical conference. – Pune (India), 2015. – pp. 205-216.

11. **Fattah M. Y.** The Behavior of Conical Shell Foundation under Dynamic Loads / **M. Y. Fattah, W. A. Waryos, M. A. E. Al-Hamdani** // The 2nd International Conference of Buildings, Construction and Environmental Engineering (BCEE2-2015). – Volume:1. – At Beirut, Lebanon, 2015. – pp. 215-226.

12. **Hao D.** Ultimate Uplift Capacity of Transmission Tower Foundation in Undisturbed Excavated Soil / **D. Hao, R. Chen, G. Fan** // Energy Procedia 17, 2012. – pp. 1209 – 1216 (doi: 10.1016/j.egypro.2012.02.228).

13. **Tong L. C.** FE Simulation of Bulk Forming Processes with a Mixed Eulerian-Lagrangian Formulation. / **L. C. Tong** / PHD thesis. – Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 1995. – pp. 107-114.

14. Пат. 130294 Україна, МПК (2018.01) E02D 27/00. Фундамент під опори ліній електропередач / **Р. О. Тімченко, Д. А. Крішко, І. В. Хоруженко**; заявник і патентовласник – Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет». – № u201802105, заявл. 28.02.2018; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23. – 4 с.

15. **Тетиор А. Н.** Проектирование и сооружение экономичных конструкций фундаментов / **А. Н**. **Тетиор** – Киев: Изд-во «Будівельник», 1975. – 204 с.

Рукопис подано до редакції 16.04.2018