

№ 1. – С. 8-11.

3. Давид М. Геостатистические методы при оценке запасов руд. – Л.: Недра, 1980.
4. Де Гроот М. Оптимальные статистические решения. – М., – 1974. – 481 с.
5. Девис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии. Книга 1. – М.: Недра. – 1990. – 246 с.
6. Калинин В.М. Многомерная геометрия форм и качественных свойств месторождений // Маркшейдерское дело и геодезия. Межвузовский сборник. – 1979. – вып. 6. – с. 99-105.
7. Крамбейн У., Грейбилл Ф. Статистические модели в геологии. – М.: Мир. – 1969. – 400 с.
8. Крамбейн У., Кауфман М., Мак-Кеммон Р. Модели геологических процессов – М.: Мир. – 1973. – 150 с.
9. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. – М.: Мир, 1982.
10. Миллер Р.Л., Кан Дж. С. Статистический анализ в геологических науках. – М.: Мир. – 1965. – 482 с.
11. Низгурецкий З.Д. К приложению теории нестационарных случайных функций для оценки результатов геометризации месторождений. – Л.: изд. ВНИМИ. – 1974. – Сб. № 93. – С. 99–113.
12. Низгурецкий З.Д. Использование элементов теории случайных функций для оценки точности определения содержания полезного компонента и мощности залежи при геометризации. – Тр. ВНИМИ. – Т. 40. – 1963. – С. 292-311.
13. Переметчик А.В. Разработка эвристического алгоритма прогнозирования геологических показателей месторождений полезных ископаемых // Разработка рудных месторождений: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Кривой Рог: КТУ. – 2004. – Вып. 85 – С. 194 – 200.
14. Krige D.G. A review of development of geostatistics in South Africa // In: Advanced Geostatistics in the Mining Industry. Reidel, Dordrecht, Netherlands. 1976. P. 279-294.
15. Marechal A., Serra J. Random kriging // In: D.F. Merriam (Editor), Geostatistics. A Colloquium. Plenum Press, New York. 1970. P. 91-112.
16. Matheron G. Kriging or polynomial interpolation procedures. – CIMM Trans., 70. 1967. P. 240-244.
17. Matheron G. The intrinsic random functions and their applications. – Adv. Appl. Prob., 5. 1973. P. 439-468.

Рукопис подано до редакції 18.03.2020

УДК 624.153.524

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

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ СКЛАДЧАСТИХ ФУНДАМЕНТІВ ПРІ НЕРІВНОМІРНИХ ДЕФОРМАЦІЯХ ОСНОВИ

Мета. 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. Метою було проаналізувати значення та характер осідань фундаментних конструкцій, а також дослідження напружено-деформованого стану основи, аналіз перерозподілу напружень під подошвою фундаменту за умов виникнення нерівномірних деформацій основи.

Методи дослідження. Для виконання дослідження необхідно досконало володіти інструментами спеціалізованих програмних комплексів, що використовують в своїх алгоритмах метод кінцевих елементів. Завдяки аналітичним методам ми маємо змогу дослідити роботу фундаменту при математичному моделюванні, проаналізувати результати та зробити висновки для подальших досліджень.

Наукова новизна. Актуальність даної роботи пов'язана із розв'язанням поставленої задачі. Її результатом є встановлення залежності між зовнішнім навантаженням та осіданням фундаментних конструкцій двох типів при нерівномірних деформаціях основи.

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. Було виконано математичне моделювання в програмному комплексі Ліра-САПР двох типів фундаментів в об'ємній постановці. В результаті було встановлено, що поле осідань більш рівномірне для альтернативної фундаментної системи в об'ємній картині вертикальних переміщень. Дві крайні складки прототипної конструкції фундаменту мають менші межі значень вертикальних переміщень. При моделюванні нерівномірних деформацій основи аналогічно було доведено переваги альтернативної моделі фундаменту. Загальний принцип розподілення вертикальних напружень узгоджується із місцями найбільших зовнішніх сил, при цьому дана фундаментна система не дозволяє перерозподілити напруження рівномірно під кожною із складок. Якщо порівнювати числову складову нормальних напружень, що виникли в тілі ґрунту основи, то абсолютні максимальні значення нормальних вертикальних напружень N_z в площині XOZ було отримано для прототипної моделі фундаменту на рівні $1,56 \text{ т/м}^2$, в той час як для альтернативної конструкції фундаменту це значення склало $1,42 \text{ т/м}^2$.

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

© Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Хоруженко І.В., 2020

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. В процесі наукових досліджень в області інженерних геотехнологій невід'ємним є використання сучасних засобів математичного моделювання. Ускладненням для дослідження роботи складчастих фундаментів під опори ліній електропередач є недостатня вивченість проблеми математичного моделювання таких фундаментів в спеціальних програмних комплексах.

При проектуванні та розрахунку фундаментів особливу увагу слід приділяти питанню роботи фундаментів у складних інженерно-геологічних умовах, коли можливі виникнення нерівномірних деформацій основи, локальні осідання основи, і, внаслідок цього, можливе утворення безопорних зон.

Одним із ускладнень при математичному моделюванні складчастих фундаментів під опори ліній електропередач (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.

Аналіз досліджень і публікацій. Завдяки стрімкому розвитку використання спеціалізованих програмних комплексів для вирішення геотехнічних задач на сьогоднішній день є можливість дослідити роботу фундаментних систем при взаємодії їх з основою, використовуючи математичне моделювання. Застосування програмних комплексів на базі методу кінцевих елементів є незамінним інструментом при наукових дослідженнях як вітчизняних, так і закордонних вчених [1-5].

Пронозін Я.О. у своїй науковій роботі представив теоретичні дослідження напружено-деформованого стану (НДС) основи, що моделювалася лінійно-деформованим середовищем [6]. У якості інструменту реалізації методу кінцевих елементів була використана геотехнічна програма PLAXIS 2D. Навантаження приймалось гнучким, по полосі, що діє до нормалі поверхні, задача виконувалася у плоскому середовищі.

Вчені Nisha P. Naik та Sabna Thilakan [7] 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.

В своїй науковій роботі [8] вчені Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Вержиковський В.В., Заритовський Д.С. розробили кінцево-елементну модель «ґрунт – фундаментна плита – верхня будова» в програмному комплексі Ліра-САПР. Було досліджено напружено-деформований стан фундаментної плити з урахуванням моделей Вінклера і Пастернака. За результатами розрахунку отримані графіки осідання фундаментної плити. Кінцево-елементна модель містить наступні кінцеві елементи: стрижневий універсальний просторовий KE 10, оболонковий універсальний чотирикутний

KE 44, спеціальний законтурний елемент пружної основи KE 53 для моделі Пастернака.

В своїх наукових дослідженнях 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 [9]. При цьому для математичного моделювання було використано програмний комплекс Ліра-САПР. 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. 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.

Паралельно з попереднім було проведено дослідження впливу геометричних параметрів складчастого фундаменту-оболонки на величину несучої здатності [10]. Було виконано моделювання однієї призматичної складки фундаменту з відомими геометричними параметрами та фізичними характеристиками [11, 12], надалі досліджувалася робота одного типового призматичного штампу при зміні умов роботи та взаємодії з ґрунтовою основою. В якості змінного параметру на даному етапі дослідження було обрано ширину опорної частини 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. Дані результати стали основою для подальшого аналізу та досліджень при моделюванні об'ємної задачі.

Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Хоруженко І.В. виконали дослідження роботи структурного фундаменту при взаємодії із основою у об'ємній постановці задачі за допомогою програмного комплексу Ліра-САПР [13]. Для моделювання призматичної складки використовувався кінцевий елемент КЕ 41. Для моделювання ґрунтової основи було використано універсальний просторовий восьмивузловий ізопараметричний КЕ 36.

Для моделювання балок було використано універсальний просторовий стрижневий КЕ 10 [14]. Була встановлена залежність між зовнішнім навантаженням та осіданням фундаментної конструкції двох типів. Визначено, 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 т було отримано для оптимальної конструкції фундаменту.

Постановка завдання. Метою дослідження є вивчення контактної взаємодії фундаментної конструкції та ґрунту основи за допомогою математичного моделювання при нерівномірних деформаціях основи

Викладення матеріалу та результати. Для моделювання нерівномірних деформацій необхідно було обрати тип основи, в тілі якої містяться прошарки слабкого ґрунту. Згідно відомих класифікацій [15] в залежності від розміщення шарів або лінз слабкого ґрунту, було обрано тип основи, стислива товща якої в межах зони забудови містить декілька вклинюючих лінз, складених слабкими ґрунтами.

Як основний тип ґрунту основи при математичному моделюванні було використано суглинок із межами текучості $0,5 \leq IL \leq 0,75$ із наступними фізико-механічними характеристиками: $E = 600 \text{ т/м}^2$; $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$; $e = 0,95$; $c = 14 \text{ кПа}$; $\varphi = 14^\circ$. У якості прошарку слабкого ґрунту було використано ґрунт із характеристиками: $E = 340 \text{ т/м}^2$; $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$; $c = 30 \text{ кПа}$; $\varphi = 10^\circ$.

Задачею даного етапу моделювання було проаналізувати значення та характер осідань фундаментних конструкцій, а також дослідження напружено-деформованого стану основи, аналіз перерозподілу напружень під підшовою фундаменту за умов виникнення нерівномірних деформацій основи.

Для моделювання призматичної складки використовувався кінцевий елемент КЕ 41. Даний кінцевий елемент призначений для міцнісного розрахунку тонких пологих оболонок (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 (w) – 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 [14].

Для моделювання ґрунтової основи було використано універсальний просторовий восьмивузловий ізопараметричний КЕ 36. Даний тип КЕ призначений для міцнісного розрахунку континуальних об'єктів та масивних просторових конструкцій.

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, знаття кутового зв'язку – вільний поворот, тобто циліндричний шарнір).

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

Основним критерієм граничної несучої здатності основи було виникнення пластичних деформацій основи. Для визначення головних та еквівалентних напружень було обрано теорію Кулона-Мора (модель ґрунтової основи) у якості теорії міцності при оцінці несучої здатності ґрунтової основи.

Кінцево-елементні моделі для обох типів фундаментів зображені на рис. 1. При цьому темнішим кольором виконані кінцеві елементи прошарок слабого ґрунту.

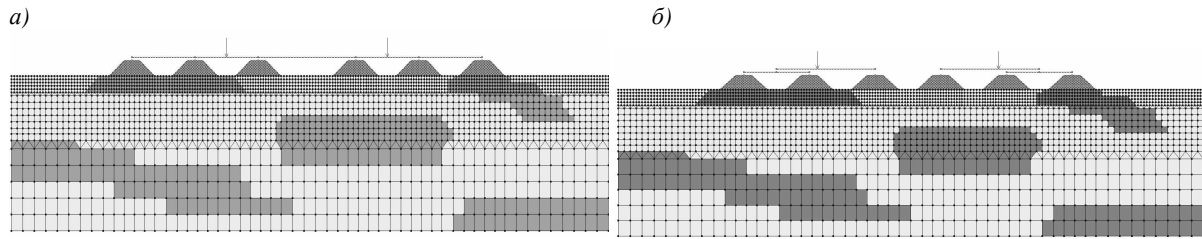


Рис. 1. Кінцево-елементні моделі ґрунтового масиву і фундаментної системи та схема навантаження: *a* – прототипної моделі фундаменту; *б* – альтернативної моделі фундаменту

Навантаження прикладалося поступово з кроком 1 т у вигляді зосередженої сили, місцерозташування якої визначалося за місцем встановлення бази опори ЛЕП. Далі фіксувалися значення вертикальних переміщень (осідання) при кожному етапі навантаження. Значення вертикальних переміщень фіксувалися під верхньою полицею складки, на кожній із шести складок в місцях спирання на них опорної балки (всього шість контрольних точок).

В результаті було отримано значення вертикальних переміщень (осідань) кожної із контрольних точок при зміні зовнішнього навантаження для обох типів фундаментних систем. Для візуального аналізу переміщень було зафіксовано картину виникнення осідань в контрольному перерізі під опорними балками для кожного фундаменту. На рис. 2 можна побачити ізолінії вертикальних переміщень у ґрунтовій товщі під складками та поблизу них під дією навантаження у 6 т на кожну із опорних точок.

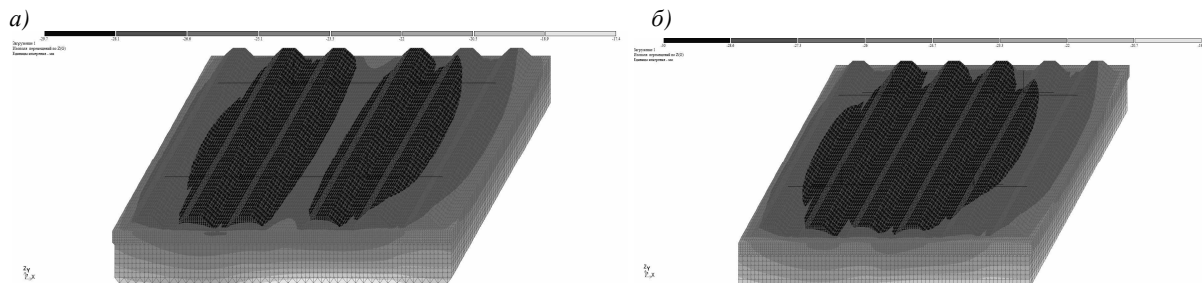


Рис. 2. Ізолінії вертикальних переміщень під дією зовнішнього навантаження в 6 т в ізометричній проекції: *a* – прототипної моделі фундаменту; *б* – альтернативної моделі фундаменту

На рис. 3 зображені ізолінії вертикальних переміщень в площині XOZ під дією зовнішнього навантаження в 6 т для обох типів фундаментів.

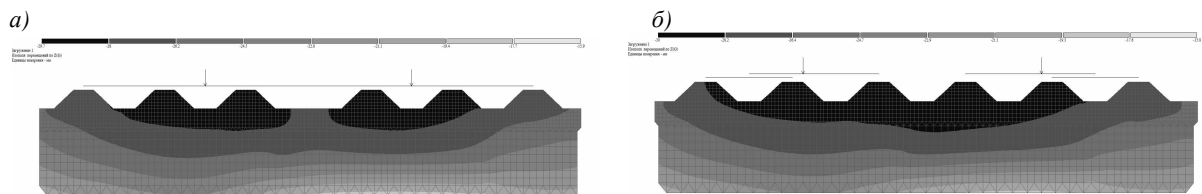


Рис. 3. Ізолінії вертикальних переміщень в площині XOZ під дією зовнішнього навантаження в 6 тон: *a* – прототипної моделі фундаменту; *б* – альтернативної моделі фундаменту

Аналізуючи об'ємну картину вертикальних переміщень (рис. 2) можна побачити, що поле осідань більш рівномірне для альтернативної фундаментної системи. Дві крайні складки прототипної конструкції фундаменту мають менші межі значень вертикальних переміщень згідно зі шкалою. Більш чітко різниця у роботі фундаментів видно на рис. 3, де максимальні значення вертикальних переміщень мають більш рівномірний характер для альтернативної конструкції фундаменту.

В результаті фіксації значень вертикальних переміщень в кожній із контрольних точок для кожного із етапу навантажень було отримано графіки залежності осідань від зовнішнього навантаження (рис. 4).

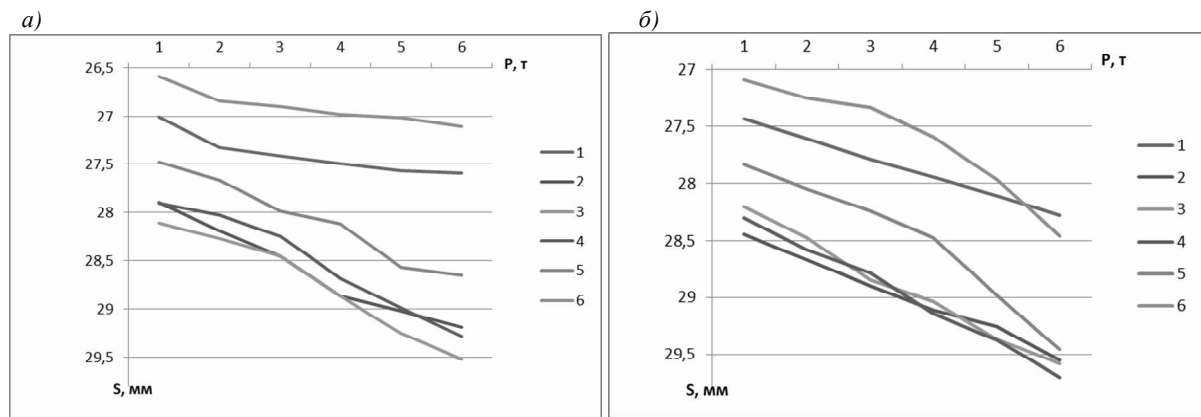


Рис. 4. Графіки залежності осідань від зовнішнього навантаження при математичному моделюванні: *a* – прототипної моделі складчастого фундаменту; *б* – альтернативної моделі складчастого фундаменту; 1...6 – контрольні точки на складках фундаменту

Аналізуючи характер осідань фундаментних конструкцій згідно графіків на рис. 4 можна побачити, що прототипна модель фундаменту має менші значення осідань в кожній із контрольних точок у порівнянні із альтернативною моделлю фундаменту. Проте тут важливі не кількісні значення, а якісні. Суттєвим є рівномірність вертикальних переміщень для кожної із контрольних точок. Важливим є розміщення кожної із кривих на графіку по відношенню одна до одної – чим далі криві у площині графіку, тим менша рівномірність вертикальних переміщень. Більша сукупність кривих на графіку спостерігаються для альтернативної моделі фундаменту (рис.4б). Також точки 1 та 6 прототипної моделі фундаменту (рис. 4а) майже не реагують на зміну зовнішнього навантаження.

Аналогічно було отримано значення нормальних напружень N_z для обох типів фундаментів. На рис. 5, 6 зображено ізолінії нормальних напружень для прототипної та альтернативної конструкцій фундаментів. При цьому для порівняння зміни нормальних вертикальних напружень із збільшенням навантаження для аналізу було обрано результати математичного моделювання під дією навантаження в 2 т та 6 т на кожну точку.

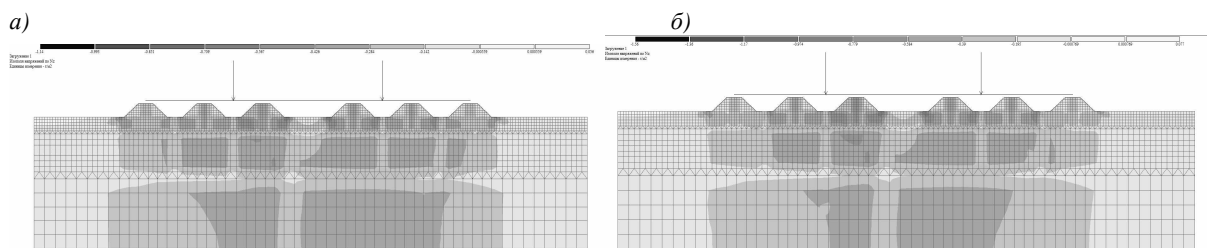


Рис. 5. Ізолінії нормальних напружень N_z в площині XOZ для прототипної моделі фундаменту: *a* – під дією навантаження в 2 т; *б* – під дією навантаження в 6 т

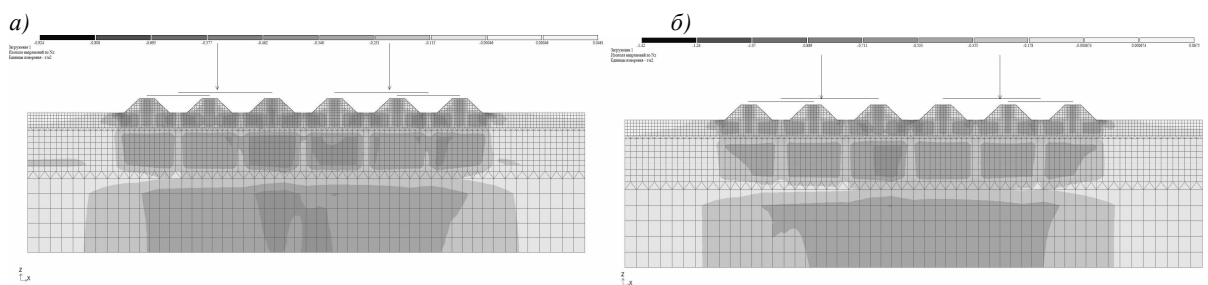


Рис. 6. Ізолінії нормальних напружень N_z в площині XOZ для альтернативної моделі фундаменту: *a* – під дією навантаження в 2 т; *б* – під дією навантаження в 6 т

Аналізуючи ізолінії нормальних напружень прототипної моделі фундаменту (рис. 5) можна побачити значну концентрацію напружень у місцях спирання складок на поверхню ґрунтової основи (приопорна зона) та під верхніми горизонтальними полицями складок (у місцях спирання на них опорних балок). В центральній зоні фундаменту напруження мають значно нижчі

значення, ізолінії нормальних напружень не розповсюджуються на цю зону, що свідчить про те, що ґрунт основи в цьому місці майже не включається в роботу. При цьому інтенсивність напружень наявна переважно під центральними складками; під двома крайніми складками напруження мають значно менші значення, що свідчить про нерівномірність розповсюдження нормальних напружень під кожною із складок при центральному навантаженні. Розподілення напружень відбувається нерівномірно, без утворення спільного ядра.

В той же час спостерігається відмінність у характері ізоліній нормальних напружень N_z для альтернативної моделі фундаменту (рис. 6). Аналогічно можна побачити концентрацію напружень у місцях спирання складок на поверхню ґрунтової основи та під верхніми горизонтальними полицями складок. На глибині до 0,7 м ізолінії напружень біля основи мають локальний характер, незамкнутий під центром кожною із складок. Вирівнювання ізоліній напружень разом із замкненням під віссю кожною із складок відбувається на глибині 2,4 м. Відбувається вирівнювання вертикальної компоненти напруженого стану N_z на глибині нижче 2,4 м згідно з характером утворення ізоліній. При цьому чітко видно, що характер утворення ізоліній однаковий під кожною із складок, що свідчить про рівномірність перерозподілу нормальних напружень під всією фундаментною системою.

Якщо порівнювати числову складову нормальних напружень, що виникли в тілі ґрунту основи, то абсолютні максимальні значення нормальних вертикальних напружень N_z в площині XOZ було отримано для прототипної моделі фундаменту на рівні $1,56 \text{ т/м}^2$, в той час як для альтернативної конструкції фундаменту це значення склало $1,42 \text{ т/м}^2$.

Висновки та напрямок подальших досліджень. При аналізі НДС основи прототипної моделі фундаменту утворення трикутних та трапецевидних ущільнених ядер відбувається переважно під 3, 4 та 5 складками, і має нечіткий, нерівномірний характер. Розподілення напружень відбувається нерівномірно, без утворення спільного ядра. Загальний принцип розподілення вертикальних напружень узгоджується із місцями найбільших зовнішніх сил, при цьому дана фундаментна система не дозволяє перерозподілити напруження рівномірно під кожною із складок.

При аналізі значень вертикальних переміщень було встановлено, що максимальні значення осідань в 29,7 мм спостерігаються у альтернативної моделі фундаменту при дії навантаження в 6 т. Проте саме у прототипної моделі фундаменту різниця показань вертикальних переміщень більша і становить 2,424 мм, в той час як у альтернативної моделі цей показник – 1,422 мм. Це свідчить про більш рівномірне розподілення навантаження при нерівномірних деформаціях основи в даній системі.

Якщо порівнювати числову складову нормальних напружень, що виникли в тілі ґрунту основи, то абсолютні максимальні значення нормальних вертикальних напружень N_z в площині XOZ було отримано для прототипної моделі фундаменту на рівні $1,56 \text{ т/м}^2$, в той час як для альтернативної конструкції фундаменту це значення склало $1,42 \text{ т/м}^2$.

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. **Тетиор А.Н.** Фундаменты-оболочки / **А.Н. Тетиор, А.Г. Литвиненко.** – Москва: Стройиздат, 1975. –136 с.
3. **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.
4. **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.
5. **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.
6. **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.
7. **Nisha P. Naik.** Geotechnical behavior of shell foundations / **Nisha P. Naik, Sabna Thilakan** // 50th Indian geotechnical conference. – Pune (India), 2015. – pp. 205-216.
8. **Кравченко Г.М.** Исследование напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты выставочного павильона Технопарка РГСУ с учетом различных моделей основания / **Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, В.В. Вержиковский, Д.С. Заритовский** // Инженерный вестник Дона, №4 – 2015, с.30-38.
9. **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.

10. **Тімченко Р.О.** Дослідження впливу геометричних параметрів складчас-того фундаменту-оболонки на величину несучої здатності основи / **Р.О.Тімченко, Д.А. Крішко, І.В. Хоруженко** // Гірничий Вісник – Вип.104 – Кривий Ріг: КНУ, 2019 – с.65-69.

11. **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.

12. 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.

13. **Тімченко Р.О.** Дослідження напружено-деформованого стану основи під структурними фундаментами за допомогою математичного моделювання / **Р.О. Тімченко, Д.А. Крішко, І.В. Хоруженко** // Вісник Криворізького національного університету – Вип.49 – Кривий Ріг: КНУ, 2019. – С.74-79.

14. **Гензерский Ю.В.** ЛИРА – САПР 2011. Учебное пособие / **Ю.В., Гензерский, Д.В. Медведенко, О.И. Пащенко, В.П. Титок** – Киев: Электронное издание, 2011, – 396 с.

15. ДСТУ-Н Б В.1.1-40:2016 Настанова щодо проектування будівель і споруд на слабких ґрунтах. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 70с.

Рукопис подано до редакції 17.03.2020

УДК [622.271:338.32-048.34]:622.012

І.В. БАРАНОВ, **Є.М. ШВЕЦЬ**, кандидати техн. наук, ст. викладачі,
Є.В. ЧЕРЕДНИЧЕНКО, **Д.В. ПОЛЬЩІН**, магістранти
Криворізький національний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧОЇ ПОТУЖНОСТІ ГРУПИ КАР'ЄРІВ У СКЛАДІ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ

Мета статті. Метою роботи є обґрунтування методів визначення оптимальних показників відкритої розробки, з урахуванням оптимізації роботи групи кар'єрів, які дозволяють підвищити ефективність розробки залізрудних родовищ відкритим способом.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач у статті було використано методи: узагальненого аналізу досягнень науки та практичного досвіду роботи гірничо-видобувних підприємств, щодо розробки родовищ корисних копалин відкритим способом групою кар'єрів у складі гірничо-збагачувального комбінату; аналітичного та графоаналітичного аналізу; економіко-математичного моделювання спільної роботи кар'єрів, як єдиної системи, або єдиного комплексу; факторного аналізу; техніко-економічного аналізу показників роботи окремих кар'єрів та гірничо-збагачувального комбінату в цілому.

Наукова новизна результатів. В роботі запропоновано кар'єри, які розробляють залізрудні родовища та входять до складу гірничо-збагачувального комбінату, розглядати як єдиний комплекс, або єдину систему. При цьому їх технологічні показники необхідно визначати по взаємозв'язаному впливу на технічні та економічні показники роботи гірничо-збагачувального комбінату до складу якого вони входять.

Практична значимість результатів. Запропоновано розрахунковий метод визначення продуктивності кар'єрів у складі гірничо-збагачувального комбінату, на основі якого можна визначити найкращий варіант сумісної роботи цих кар'єрів з забезпеченням таких техніко-економічних показників гірничо-збагачувального комбінату, які дозволяють підвищити ефективність розробки залізрудних родовищ. Результати досліджень можуть бути використані гірничими підприємствами та проектними організаціями при плануванні гірничих робіт та проектування кар'єрів.

Результати досліджень. Виконано оптимізацію роботи групи кар'єрів за критеріями мінімального коефіцієнту розкриття та мінімальної повної собівартості видобутку руди кожного кар'єру на основі якої визначено пріоритетність роботи кожного кар'єру. Встановлено, що затрати на видобуток однієї тони руди в цілому по гірничо-збагачувальному комбінату можуть бути знижені на 6 %, якщо оптимізацію роботи групи кар'єрів виконувати за критерієм мінімальної повної собівартості видобутку руди.

Ключові слова: кар'єр, руда, розкритві породи, коефіцієнт розкриття, продуктивність, собівартість, техніко-економічні показники.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-42-48

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. При розробці родовищ групою кар'єрів, які входять в систему гірничо-збагачувального комбінату, існує ряд відмінних особливостей, притаманних періодам досягнення оптимальних потужностей і експлуатації групи кар'єрів при їх спільній роботі. Таким чином, задачі експлуатації і введення групи