

Р. О. ТИМЧЕНКО, д-р техн. наук, проф., Д. А. КРИШКО, канд. техн. наук, ст. викладач,  
В.О.САВЕНКО, аспірант, І.В.ХОРУЖЕНКО, асистент  
Криворізький національний університет

## ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ФІЗИЧНИХ МОДЕЛЕЙ КОНСТРУКЦІЙ (ПІДПІРНИХ СТІН ТА ФУНДАМЕНТІВ-ОБОЛОНОК) ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Мета.** Проектування оптимальних конструктивних рішень з урахуванням конкретних умов експлуатації одна з головних інженерних задач. Для підірних стін, застосовуваних на підроблюваних територіях з горизонтальними і вертикальними переміщеннями ґрунту, це завдання є особливо важливою. На сучасному етапі фундаментобудування виникає необхідність розробки більш прогресивних конструкцій фундаментів, які будуть більш економічні, технологічно досконаліші, здатні бути використані в складних інженерно-геологічних умовах. До таких фундаментів відносяться багатохвилові фундаменти-оболонки, різноманітні за формою, умовами роботи та сферою використання. Метою дослідження є визначення найбільш оптимального конструктивного рішення фундаменту під опори ліній електропередач (ЛЕП), що використовують на водонасичених, болотистих та слабких ґрунтах.

**Методи дослідження.** Теоретичною основою для моделювання методом еквівалентних матеріалів служить вчення про подібність, яке є науковим методом постановки експерименту, обробки його результатів і поширення цих результатів на натуральні явища. Три теореми теорії подібності дозволяють проаналізувати рівняння, що описують натурний і модельний процес, вивести умови моделювання у вигляді критеріїв подібності і вибрати масштабні коефіцієнти (константи подібності).

**Наукова новизна.** Актуальність даної роботи пов'язана із розв'язанням поставленої задачі. Її результатом є визначення оптимальних інженерних рішень з моделювання і виготовлення фізичних моделей підірних стін та фундаментів-оболонки для подальшого їх застосування в лоткових випробуваннях згідно із положеннями теорії планування експерименту.

**Практична значимість.** Фізичне моделювання дозволяє розробнику створювати моделі, які можуть бути використані багаторазово і спільно з іншими інженерами. Можливість імпортувати дані і моделі з інших середовищ розробки допомагає забезпечити точність моделей. Завдяки інтеграції цих моделей з алгоритмами управління і обробки сигналів розробник може перевірити помилки інтеграції на початку процесу проектування.

**Результати.** Використовуючи положення теорії подібності, були виготовлені фізичні моделі підірних стін і фундаментів-оболонки, що мають характеристики жорсткості та міцності відповідні натурним конструкціям. Надалі це дозволить вивчити процес контактної взаємодії цих конструкцій та деформованої основи, а також отримати математичні закономірності їх спільної роботи.

**Ключові слова:** складчастий фундамент, підпірна стіна спеціального типу, фізичні моделі, теорія подібності.

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-103-65-70

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Проектування оптимальних конструктивних рішень з урахуванням конкретних умов експлуатації одна з головних інженерних задач. В процесі наукових досліджень виникає необхідність у використанні різних методів проведення експерименту, або у створенні власної методики, яка б задовольняла всім вимогам наукового дослідження. За допомогою традиційних методів дослідження часто не вдається забезпечити необхідну модернізацію або проектування будівель і споруд, тому в науці при вирішенні конкретних задач використовують новітні ефективні методи досліджень. При цьому особлива увага приділяється моделюванню об'єктів та процесів в цілому. Невід'ємною задачею при дослідженні роботи технічних систем є саме фізичне моделювання будівельних конструкцій для їх подальшого застосування в лабораторних лоткових випробуваннях. Тому значної уваги набуває пошук оптимальних рішень при виготовленні фізичних моделей підірних стін спеціального типу та фундаментів-оболонки із застосуванням сучасних технологій, які б задовольняли всім вимогам проведення наукового експерименту.

**Аналіз досліджень і публікацій.** При вивченні методів та способів фізичного моделювання особливу увагу слід звертати на те, щоб вони відповідали основним критеріям теорії подібності. При дослідженні наукових публікацій було проаналізовано способи фізичного моделювання різних структур із використанням новітніх технологій. В роботі [1,2] для проведення лоткового експерименту було виготовлено модель круглого фундаменту, частково використовуючи матеріал натурального фундаменту. Для виготовлення моделей використовували бетон дрібної фракції на портландцементі М400 з  $B / Ц = 0,37$ . Як дрібний заповнювач використовували кварцовий пісок.

Армували зразки штукатурною сіткою, імітуючи армування сталевую арматурою. Натурний круглий фундамент у проекті мав вкладиші з низькомодульного матеріалу, що розташовані в заглибленнях на контактній поверхні фундаментної плити. При фізичному моделюванні ці вкладиші виготовляли окремо з резини, глини та насиченого водою піску. Геометричні розміри самої конструкції були зменшені у порівнянні з натурним у 74 рази. Метою проведення активного експерименту була оптимізація конструктивних параметрів фундаментної плити.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є визначення оптимальних інженерних рішень з моделювання і виготовлення фізичних моделей підпірних стін та фундаментів-оболонок для подальшого їх застосування в лоткових випробуваннях згідно із положеннями теорії планування експерименту.

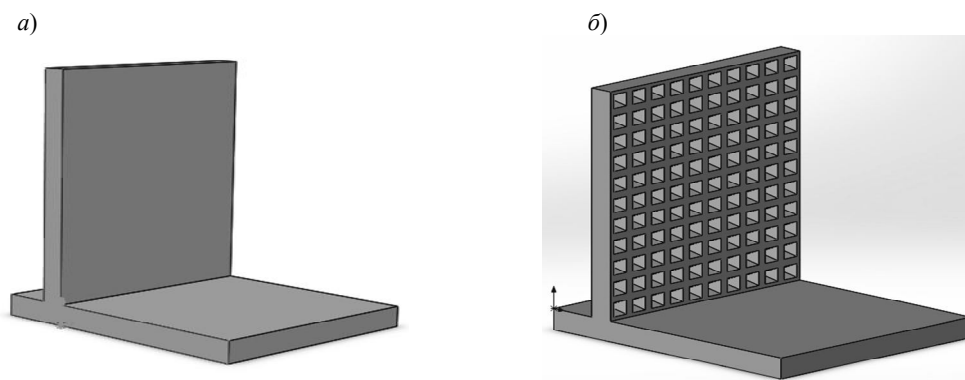
**Викладення матеріалу та результати.** Фізичне моделювання до цього часу, незважаючи на бурхливий розвиток чисельних методів, і обчислювальної техніки, у ряді випадків, залишається вельми ефективним методом дослідження, що дає вирішальні за своєю значущістю результати. Для проведення експериментальних досліджень, згідно з теорією планування експерименту, необхідне застосування конкретних моделей (підпірні стіни та фундаменти), які мають задані параметри і відповідають іншим вимогам. На даний момент у процесі наукових досліджень вивчається робота підпірних стін спеціального типу, а також складчастих фундаментів-оболонок під опори ліній електропередач в умовах нерівномірної деформації основи та в складних інженерно-геологічних умовах. Метод фізичного моделювання полягає в створенні лабораторної фізичної моделі об'єкта в зменшених масштабах і проведенні експериментів на цій моделі [3]. Висновки і дані, отримані в цих експериментах, поширюються потім на об'єкт в реальних масштабах.

Теорія подібності є вченням про методи наукового узагальнення експерименту. Вона вказує, як треба ставити досліди і як обробляти їх результати, щоб при проведенні невеликого числа експериментів мати можливість узагальнювати дослідні дані, отримуючи поодинокі рівняння для всіх подібних явищ [3].

При моделюванні використовувався метод розширеної подібності, в якому витримуються геометричні, механічні та силові аналоги з реальним об'єктом.

Теоретичною основою для моделювання методом еквівалентних матеріалів служить вчення про подібність, яке є науковим методом постановки експерименту, обробки його результатів і поширення цих результатів на натуральні явища [4]. Три теореми теорії подібності дозволяють проаналізувати рівняння, що описують натурний і модельний процес, вивести умови моделювання у вигляді критеріїв подібності і вибрати масштабні коефіцієнти (константи подібності) [5, 6].

Моделями підпірних стін є кутникова підпірна стіна та підпірна стіна спеціального типу (ПССТ) (рис. 1 а, б). Підпірна стіна спеціального типу – це монолітна підпорна стіна кутникового типу, яка має вертикальний та горизонтальний елементи на поверхні яких, з контактної сторони, розміщені опорні частини та пустоти у вигляді усічених пірамід однакового розміру і направлених меншою основою вглиб вертикального і фундаментного елементів. Під підшовою фундаментної плити та з тильної сторони вертикального елемента розташовані два листа пружнопіддатливого матеріалу з біополімеру [7].



**Рис. 1.** Моделі підпірних стін: а – кутникова підпірна стіна; б – підпірна стіна спеціального типу

З розвитком деформуючого навантаження у часі, тобто з вертикальними і горизонтальними

переміщеннями ґрунту по відношенню до монолітної стіни кутникового типу, після її установки, відбувається поступове проникнення ґрунту в порожнини. Передчасне заповнення пустот не відбувається завдяки листам пружнопіддатливого матеріалу.

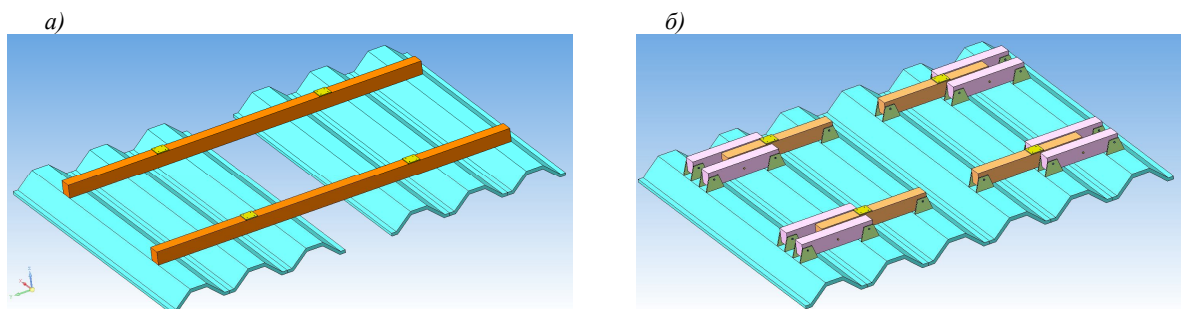
Конструктивне рішення моделі підпірної стінки спеціального типу має такий набір факторів, який є оптимальним для заданої основи.

Цифрова модель проектувалась з використанням програмного комплексу SolidWorks.

SolidWorks — продукт компанії SolidWorks Corporation (зараз — дочірня компанія Dassault Systèmes), САПР, інженерного аналізу та підготовки виробництва будь-якої складності та призначення.

SolidWorks є ядром інтегрованого комплексу автоматизації підприємства, за допомогою якого здійснюється підтримка життєвого циклу виробу згідно з концепцією CALS — технологій, включаючи двонаправлений обмін даними з іншими Windows-застосунками та створення інтерактивної документації [8].

Прототипом нового фундаменту-оболонки є складчастий фундамент у вигляді окремих тонкостінних залізобетонних складок, що з'єднуються між собою по верху сталеву чи залізобетонною балкою [9]. Альтернативною конструкцією фундаменту був складчастий фундамент, що складається з шести окремих тонкостінних призматичних залізобетонних складок, три з яких розташовані симетрично іншим трьом відносно осі опори ЛЕП. Дві крайні призматичні складки з'єднуються по верху з двома допоміжними залізобетонними балками за допомогою металевого шарнірного закріплення. Третя призматична складка з'єднується з першими двома через опорну залізобетонну балку, з однієї сторони опорна балка кріпиться до складки за допомогою металевого шарнірного закріплення, з іншої сторони опорна балка кріпиться безпосередньо до допоміжних залізобетонних балок за допомогою болтового з'єднання (рис. 2).



**Рис.2.** 3D моделювання конструкції складчастого фундаменту: *а* – модель прототипного фундаменту; *б* – модель альтернативної конструкції фундаменту

Заявлена конструкція фундаменту реалізується за рахунок особливості сумісної роботи конструктивних елементів складчастого фундаменту. Завдяки застосуванню шарнірного з'єднання призматичних складок з опорними балками досягається більш рівномірне розподілення зовнішнього навантаження на елементи фундаментної системи. Порожнини складок мають призматичну форму, що забезпечують утворення ущільненого ядра визначеної величини і здійснюють перерозподіл тиску на основу [10,11].

Комп'ютерне моделювання фундаментів виконувалось в прикладному програмному комплексі КОМПАС 3D V16, звідки було вилучено всі елементи фундаменту для їх подальшого друку на 3D принтері. КОМПАС 3D V16 – це система тривимірного проектування з потужними функціональними можливостями твердотільного і поверхневого моделювання [12]. Зручність цього програмного комплексу полягає у підтримці найбільш поширених форматів 3D-моделей (STEP, ACIS, IGES, DWG, DXF), що дозволяє організовувати ефективний обмін між програмними комплексами, що використовують будь-які CAD / CAM / CAE-системи в роботі. Однією з особливостей програми є використання додатку АРМ FEM, призначене для виконання експрес-розрахунків твердотільних об'єктів в системі КОМПАС-3D, і візуалізації результатів цих розрахунків. Це дозволить у майбутньому виконати необхідні розрахунки конструкції безпосередньо у тілі програмного комплексу КОМПАС-3D. До складу АРМ FEM входять інструменти підготовки деталей і зборок до розрахунку, завдання граничних умов і навантажень, а також вбудовані генератори звичайно-елементної сітки (як з постійним, так і зі змінним кроком) і постпроцесор. Цей функці-

ональний набір дозволяє змоделювати твердотільний об'єкт і комплексно проаналізувати поведінку розрахункової моделі при різних впливах з точки зору статички, стійкості та ін. Для створення кінцево-елементного представлення об'єкту в АРМ FEM передбачена функція генерації KE-сітки, при виклику якої відбувається відповідне розбиття об'єкта із заданим кроком. Якщо створена розрахункова модель має складні нерівномірні геометричні переходи, то може бути проведено так зване адаптивне розбиття. Для того щоб результат процесу був більш якісним, генератор KE-сітки автоматично (з урахуванням заданого користувачем максимального коефіцієнта згущення) варіює величину кроку розбиття.

Згідно до теорії подібності необхідно дотримуватись геометричній подібності натурної конструкції фундаменту та моделі фундаменту. Тому всі геометричні розміри моделі фундаменту для проведення лоткового експерименту було зменшено в 50 разів. У висновку ми отримали модель фундаменту розмірами у плані 245×200 мм, і висотою 22 мм.

Для виготовлення моделей фундаментів було вирішено використовувати саме пластик, а не матеріал натурального фундаменту. Це пов'язано з тим, що метою лоткових досліджень було вивчення не міцнісних характеристик фундаменту в цілому, а характеру його роботи сумісно із ґрунтом основи.

Створення моделі фундаменту виконувалося за допомогою використання технології 3D друку. Елементи фундаменту роздруковувалися на 3D принтері XYZprinting da Vinci 1.0 Pro із пластику з відомими характеристиками (діаметр нитки – 1,75 мм; овальність - +/- 0,03; щільність (густина) – 1250 кг/м<sup>3</sup>; в'язкість плавлення – 2000 Па·с; точка плавлення – 230 С°; стійкість до згину – 20 разів; технологія друку – FDM). Всі елементи фундаменту склеювалися за допомогою спеціального клею; деталі, в яких необхідно було зберегти шарнірні з'єднання, поєднувалися за допомогою металевих стрижнів необхідного діаметру.

Перший комплект деталей був виготовлений для моделювання прототипу складчастого фундаменту. Тут опорна балка має жорстко поєднуватися з всіма шістьма складками фундаменту (рис. 3 а). Другий комплект був виготовлений для моделювання оптимальної конструкції складчастого фундаменту (рис. 3 б).

а)



б)



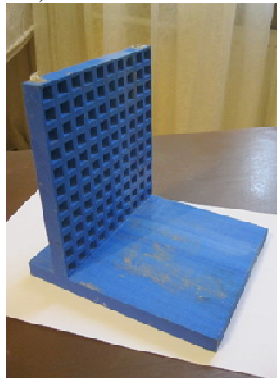
**Рис.3.** Моделі конструкцій фундаменту з пластику у зібраному вигляді: *а* – модель прототипної конструкції складчастого фундаменту; *б* – модель оптимальної конструкції складчастого фундаменту

Моделі підпорних стін виготовлялися із застосуванням методу пошарового створення фізичного об'єкта по цифровій 3D-моделі. Для цього був використаний 3D-принтер Graber i3 [13] (рис. 4 а, б).

а)



б)



**Рис. 4.** Фізичні моделі підпорних стін: *а* – кутникова підпірна стіна; *б* – підпірна стіна спеціального типу

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Фізичне моделювання дозволяє розробнику створювати моделі, які можуть бути використані багаторазово. Можливість імпортувати дані і моделі з інших середовищ розробки допомагає забезпечити точність моделей. Завдяки інтеграції цих моделей з алгоритмами управління і обробки сигналів розробник може перевірити помилки інтеграції на початку процесу проектування. Використовуючи положення теорії подібності, були виготовлені фізичні моделі підірних стін і фундаментів-оболонки, що мають характеристики жорсткості та міцності відповідні натурним конструкціям. Надалі це дозволить вивчити процес контактної взаємодії цих конструкцій та деформованої основи, а також отримати математичні закономірності їх спільної роботи.

#### *Список літератури*

1. **Богатынский А.В.** Использование расчётного комплекса Nastran для решения контактной задачи улучшенного круглого фундамента / **Богатынский А.В., Тимченко Р.О., Кришко Д.А.**, // Строительство, материаловедение, машиностроение//Сб. научн. трудов. Вып. 94. – Днепр: ДВНЗ ПДАБА, 2016. – с.12-17
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. **Гатапова Н.Ц.** Основы теории и техники физического моделирования и эксперимента [Электронный ресурс]: учебное пособие / **Н.Ц. Гатапова, А.Н. Колиух, Н.В. Орлова, А.Ю. Орлов.** – Тамбов, 2014. – 77 с.
4. **Козлов В. П.** О переходных коэффициентах при моделировании взаимодействия подрабатываемых сооружений с основанием на естественном грунте /**В. П. Козлов**// Сборник науч. труд. в ДонпромстройНИИ проекта. – 1965. – № 6. – С. 31-43.
5. **Кирпичев М. В.** Теория подобия // **М. В. Кирпичев**. – М.: Издательство АН СССР. – 1953 – 94 с.
6. **Седов Л. И.** Методы подобия и размерности в механике. // **Л. И. Седов** / – М.: Государственное издательство технической литературы. – М.: 1954. – 326 с.
7. Пат. UA 100212 U Україна, МПК E02D 29/02. Монолітна підпірна стінка кутникового типу. **Тимченко Р. О., Кришко Д. А., Савенко В. О., Настич О. Б.** (Україна). – UA 100212 U; Заявл. 26.02.2015; Опубл. 10.07.2015, Бюл. № 13. – 4 с.
8. <https://uk.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>
9. **Тетиор А.Н.** Проектирование и сооружение экономичных конструкций фундаментов / **А.Н. Тетиор.** – Киев: Изд-во «Будівельник», 1975. – 204 с.
10. **Тимченко Р.О.** Конструктивне рішення багатошарового фундаменту-оболонки під водоскидні споруди шламосховища / **Тимченко Р.О., Кришко Д.А., Хоруженко І.В.** // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Механіка ґрунтів та фундаментобудування» - Вип.83: В 2-х кн.: Книга 2. – Київ, ДП НДІБК, 2016. – С. 674-678
11. **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.
12. <http://kompas.ru>
13. [https://uk.wikipedia.org/wiki/Prusa\\_i3](https://uk.wikipedia.org/wiki/Prusa_i3)

Рукопис подано до редакції 13.04.2018

УДК 622.272: 622.354.3

А. В. КОСЕНКО, аспірант, Криворізький національний університет

### **ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБКИ ПОКЛАДІВ ПРИРОДНО-БАГАТИХ ЗАЛІЗНИХ РУД В УМОВАХ ВЕЛИКИХ ГЛИБИН**

**Мета.** Доведення ефективності застосування на практиці ресурсозберігаючої технології підповерхового обвалення, на основі техніко-економічного порівняння з традиційною технологією, в залежності від потужності та коефіцієнту міцності рудного покладу, що розробляється.

**Методи.** Конструктивно-функціональний аналіз варіантів технології підповерхового обвалення, чисельне та фізичне моделювання технологічного процесу випуску руди під обваленими пустими породами, економіко-математичне моделювання і порівняльна оцінка варіантів системи розробки.

**Наукова новизна.** Показники вилучення чистої руди з обвалених запасів очисних панелей визначаються в залежності від глибини та інтенсивності ведення очисних робіт, коефіцієнту міцності рудного покладу та його потужності.

**Практична значимість.** Отримані аналітичні залежності економічної ефективності від потужності рудного покладу та коефіцієнту міцності руди при впровадженні на практиці ресурсозберігаючої технології підповерхового обвалення, що дасть змогу окреслити найефективнішу область застосування розроблених проектних рішень.

**Результати.** Незважаючи на великі амортизаційні відрахування та інші витратні показники ресурсозберігаючої технології очисного виймання з використанням сучасної самохідної гірничої техніки, було доведено ефективність її