

# ЕФЕКТИВНІ КОНСТРУКТИВНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ВЛАШТУВАННЯ ФУНДАМЕНТІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вінницький національний технічний університет

*У статті проаналізовано комплекс конструктивних і технологічних рішень у галузі геотехніки та фундаментобудування, що захищені патентним портфелем Вінницького національного технічного університету. Представлено систематизацію групи патентів на корисні моделі та винаходи. Вони охоплюють нові типи паль (зокрема біпірамідальні), фундаменти мілкового закладання, технології їхнього влаштування, методи лабораторних випробувань та способи підсилення експлуатованих основ. Впровадження розроблених рішень забезпечує зниження матеріаломісткості до 20% та підвищує надійність будівельних об'єктів.*

**Ключові слова:** фундамент, біпірамідальна паля, лабораторні випробування, несуча здатність, підсилення фундаментів, патент України, геотехніка.

Стаття надійшла до редакції / Received 25.03.2026  
Прийнята до друку / Accepted 24.04.2026  
Опубліковано / Published 29.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Попович М.М.

## Вступ

Сучасні тенденції розвитку будівельної галузі в Україні та світі характеризуються постійним зростанням складності інженерно-геологічних умов майданчиків проектування. Щільна міська забудова, дефіцит надійних територій для будівництва та необхідність зведення висотних об'єктів вимагають розробки та впровадження нових, більш ефективних конструкцій фундаментів. Традиційні підходи, що спираються на використання стандартних призматичних паль або масивних монолітних плит, часто характеризуються високою матеріаломісткістю та значною тривалістю виконання робіт нульового циклу.

Питанням оптимізації геометрії контактних поверхонь фундаментів та підвищення їхньої несучої здатності присвячено значну кількість досліджень провідних вітчизняних геотехнічних шкіл (КНУБА, ПолтНТУ, ХНУБА), де активно вивчаються процеси просторової взаємодії елементів «фундамент-ґрунт» [2]. У світовій практиці аналогічний вектор наукових пошуків пов'язаний із розробкою та моделюванням паль зі змінним перерізом та розширеннями (tapered piles, step-tapered piles), концептуальні основи яких висвітлені у працях Н. G. Poulos [1], L. Gao [3] та інших закордонних авторів [4]. Вони доводять, що зміна профілю стовбура палі суттєво трансформує напружено-деформований стан основи, створюючи додатковий боковий розпір та радіальне ущільнення ґрунту [3, 4]. Проте, більшість існуючих рішень розглядають ці задачі ізольовано, без системного поєднання конструктивних елементів із технологіями геотехнічної реконструкції та специфічним експериментальним інструментарієм.

Значний науковий та практичний внесок у вирішення зазначених проблем здійснюють науковці Вінницького національного технічного університету. За останні роки колективом авторів під керівництвом М. М. Поповича та І.В. Маєвської було сформовано потужний патентний портфель у галузі геотехніки та фундаментобудування. Ця стаття присвячена систематизації та поглибленому аналізу розроблених рішень.

Метою роботи є узагальнення, науково-технічна систематизація та аналіз групи конструктивних та технологічних рішень у галузі фундаментобудування, захищених патентами України, а також обґрунтування механіки їхньої взаємодії з ґрунтовою основою.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика взаємодії штучних основ та фундаментів із ґрунтовим масивом постійно перебуває в полі зору провідних українських та закордонних учених [1, 3]. Сучасна геотехнічна наука розвивається в напрямках оптимізації геометрії фундаментів та вдосконалення методів

їхнього розрахунку [4]. Проте, значна частина пропонованих теоретичних моделей важко піддається реалізації на практиці через відсутність відповідних технологій влаштування або засобів контролю.

У зв'язку з цим актуальним залишається створення замкнених циклів проєктування, які включають: розробку нових конструкційних рішень, створення технологій їх влаштування, розробку методів експериментального контролю та математичне моделювання. Особливої актуальності це питання набуває в умовах Вінницького регіону та загалом Подільської плити, де поширені лесові просідаючі ґрунти та водонасичені суглинки. Проєктування фундаментів у таких умовах вимагає не лише високої несучої здатності, а й мінімізації негативного впливу сил морозного здимання та можливого замочування основи згідно з вимогами національних стандартів [2]. Саме за таким комплексним принципом побудовані дослідження науковців ВНТУ.

## Виклад основного матеріалу

### Інноваційні конструктивні рішення в пальному фундаментобудуванні

Фундаменти на палях є найбільш поширеним рішенням для передачі навантажень від споруди на слабкі ґрунти. На відміну від стандартних призматичних паль постійного перерізу, науковці ВНТУ запропонували серію конструкцій зі змінною геометрією, де за рахунок нової геометрії елементів досягається максимальний зв'язок із ґрунтом основи при одночасному зниженні енерговитрат на її влаштування.

Конструкція розсувної палі складного профілю (Патент № 91941). Згідно з формулою винаходу, паля має стовбур, що складається з окремих ярусів рухомих елементів. Кожен ярус містить два елементи з внутрішніми призматичними пазами. Головною відмінністю та науковою новизною розробки є:

- Геометрія зовнішньої поверхні: На відміну від аналогів, поверхні рухомих елементів виконані у формі конуса обертання, що забезпечує дискретне ущільнення ґрунту основи по висоті стовбура.
- Параметри кута нахилу: Твірна бічної поверхні розташована під кутом  $\alpha = 45^{\circ} - 60^{\circ}$  до осі обертання. Такий крутий діапазон нахилу перетворює елементи на вискоефективні жорсткі клини, які при розсуванні трансформують вертикальне монтажне зусилля у потужний радіальний розпір, забезпечуючи ефект камуфлетного ущільнення ґрунту без його структурного руйнування у фазі експлуатації.
- Внутрішня структура: Пази парних і непарних ярусів розташовані перпендикулярно, що гарантує рівномірне розширення стовбура в усіх напрямках під час монтажу.

Технологія влаштування та режими роботи

Запропонована конструкція є універсальною завдяки можливості варіювання орієнтації конусних елементів залежно від розрахункових навантажень:

- Вдавлююче навантаження: Елементи розташовують більшою основою до голови палі, утворюючи каскад низхідних опорних уступів.
- Анкерне навантаження (висмикування): Елементи орієнтують меншою основою до голови палі для максимального опору висмикуванню за принципом ґрунтового анкера.
- Знакоперемінне навантаження: Використовується суміщення більших та менших основ елементів, що дозволяє палі однаково ефективно працювати на стиск та розтяг.

Процес монтажу передбачає встановлення збірного стовбура у заздалегідь підготовлену свердловину з подальшим забиванням або затисканням інвентарного сердечника. За рахунок кута нахилу  $\alpha = 45^{\circ} - 60^{\circ}$  це змушує рухомі елементи розсуватися у просторі, «врізаючись» у стінки свердловини (ефект механічного розширення), після чого внутрішній простір замоноличують дрібнозернистою твердіючою сумішшю.

Біпірамідальна паля (Патент № 146970). Конструкція палі передбачає наявність двох зрізаних пірамід, що послідовно з'єднані між собою по висоті стовбура. Таке просторове геометричне рішення забезпечує:

Активізацію розпірного ефекту: Інтенсивне додаткове радіальне ущільнення ґрунтового масиву в активній зоні навколо палі під час її занурення.

Оптимізацію геометрії: Істотне збільшення площі контактної бокової поверхні у верхній та середній зонах палі, де природні побутові напруження ґрунту є меншими.

Генерацію додаткового опору: Створення стійкого вертикального складника реакції за рахунок нахилу граней пірамідальних зрізів під кутами  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$ .

Механіка роботи біпірамідальної палі базується на тому, що зовнішнє вертикальне навантаження передається на ґрунтову основу не лише через класичні сили тертя  $R_f$  та лобовий опір нижнього кінця  $R_c$ , а й через інтегральні сили нормального тиску на похилі грані  $R_{n1}$  та  $R_{n2}$ , як це аналітично обґрунтовано у рівняннях (1) – (4).

Аналітичні розрахунки та порівняльні параметри, наведені у Таблиці 1, доводять, що за рахунок мобілізації додаткового опору похилих граней досягається зниження питомої матеріаломісткості (витрати бетону) на 26,7% на одиницю сприйманого навантаження. Це дозволяє зменшити загальну довжину палі на 15–20% при збереженні еквівалентної несучої здатності порівняно зі стандартними призматичними аналогами. Аналогічні принципи розвитку бічної поверхні та оптимізації розподілу напружень в основі реалізовані у патентах № 91941 та № 152829.

### Теоретичні передумови розрахунку несучої здатності біпірамідальної палі

Для теоретичного обґрунтування підвищеної ефективності біпірамідальної палі розглянемо механіку передачі зовнішнього вертикального зусилля від стовбура палі на ґрунтовий масив. На відміну від традиційної призматичної палі, де загальна несуча здатність  $R$  (кН) визначається сумою лобового опору  $R_c$  та сил тертя  $R_f$  для біпірамідальної конструкції необхідно враховувати нормальний тиск на похилі грані.

Повну несучу здатність такої палі на стискання можна представити у вигляді функціональної залежності:

$$R = R_c + R_f + R_n \quad (1)$$

де  $R_c$  – опір ґрунту під нижнім кінцем палі, кН (приймається за ДБН В.2.1-10:2018) [2];

$R_f$  – сила тертя по вертикальних або умовно вертикальних ділянках бічної поверхні, кН ;

$R_n$  – додатковий опір, що виникає на похилих гранях зрізаних пірамід, кН.

Величина  $R_n$  є інтегральною сумою проєкцій елементарних сил нормального тиску ґрунту на вертикальну вісь. Для однієї похилої грані з кутом нахилу до вертикалі  $\alpha_i$  її можна виразити через формулу:

$$R_n = \int_{h_1}^{h_2} p_z(z) \cdot \sin(\alpha) \cdot P(z) dz, \quad (2)$$

де  $p_z(z)$  — еюра інтенсивності реактивного тиску ґрунту на глибині, кПа;

$P(z)$  — периметр поперечного перерізу палі на відповідній глибині, м;

$\alpha_i$  - кут нахилу грані похилої ділянки до вертикальної осі палі, град;

$h_1, h_2$  — межі розташування похилої ділянки по висоті палі, м.

Для розкриття функції реактивного тиску  $p_z(z)$  використано лінійну модель місцевих деформацій Вінклера, згідно з якою тиск пропорційний нормальному вдавлюванню грані в ґрунт ( $u_n$ ):  $p_z(z) = k_s(z) \cdot u_n(z)$ . При вертикальному осіданні палі на величину  $s$  (м), нормальне зміщення грані становить  $u_n(z) = s \cdot \sin(\alpha_i)$ . Враховуючи лінійне зростання коефіцієнта постелі з глибиною ( $k_s(z) = K \cdot z$ , де  $K$  - коефіцієнт пропорційності ґрунту, кН/м<sup>4</sup>), функція тиску набуває вигляду:

$$p_z(z) = K \cdot z \cdot s \cdot \sin(\alpha_i). \quad (3)$$

Розмірність отриманої функції тиску (3): [кН/м<sup>4</sup>] · [м] · [м] = [кН/м<sup>2</sup>] (кПа).

Реактивний тиск ґрунту залежить від модуля деформації  $E$ , кута внутрішнього тертя  $\varphi$  та питомого зчеплення  $c$ . Оскільки при зануренні палі відбувається додаткове радіальне ущільнення ґрунтового масиву (ефект розпору) [3, 4], дійсні значення в активній зоні зростають і приймаються з урахуванням емпіричних коефіцієнтів ущільнення:  $\varphi_{act} = \gamma_{ep} \cdot \varphi$  та  $c_{act} = \gamma_c \cdot c$ , що безпосередньо збільшує коефіцієнт  $K$ . Для квадратної палі зі змінною стороною на ділянці розширення поточний периметр описується функцією  $p_z(z) = 4[d_1 + 2(z - h_{11}) \cdot \tan(\alpha_i)]$ . Підставляючи геометрію та рівняння (3) у базовий інтеграл (2), виконуємо аналітичне інтегрування та отримуємо кінцеве рівняння для першої похилої ділянки:

$$R_{n1} = 4 \cdot K \cdot s \cdot \frac{\sin^2(\alpha_1)}{\cos(\alpha_1)} \cdot \left[ \frac{C_1}{2} \cdot (h_{12}^2 - h_{11}^2) + \frac{2 \cdot \tan(\alpha_1)}{3} \cdot (h_{12}^3 - h_{11}^3) \right] \quad (4)$$

де  $C_1 = d_1 - 2h_{11} \cdot \tan(\alpha_1)$  — геометрична константа ділянки розширення, м.

Розмірність кінцевого рівняння (4) повністю відповідає фізичному змісту сили:  $[R_{n1}] = [\text{кН/м}^4] \cdot [\text{м}] \cdot [\text{м} \cdot \text{м}^2 + 1 \cdot \text{м}^3] = \text{кН}$ .

Застосування моделі обмеженої граничними умовами міцності ґрунту за теорією Кулона-Ренкіна, згідно з якими тиск у будь-якій точці не повинен перевищувати пасивний

опір зсуву:  $p_z(z) \leq \sigma_{zg}(z) \cdot \tan^2(45^\circ + \varphi_{act}/2) + 2 c_{act} \cdot \tan(45^\circ + \varphi_{act}/2)$ , а граничне вертикальне зміщення обмежене нормативним осіданням за ДБН ( $s \leq s_u$ ) [2].

Математичне моделювання за формулами (1) – (4) показує, що за рахунок інтегрального складника  $R_n$  та збільшення контактного периметра  $P(z)$  у зонах розширення, загальна несуча здатність біпірамідальної палі перевищує показники гладкої палі еквівалентного об'єму на величину до 40% залежно від типу ґрунту (див. дані верифікації у Таблиці 1).

#### Розширений аналіз напружено-деформованого стану в зонах змінної геометрії

Особливий інтерес з точки зору механіки ґрунтів викликає розподіл ізоліній вертикальних напружень  $\sigma_z$  навколо біпірамідальних розширень палі. У класичних призматичних палях епюра дотичних напружень на контакті «паля-ґрунт» має вигляд кривої, що згасає до нижнього кінця палі. Впровадження ділянок зворотної конусності або пірамідальних зрізів кардинально змінює цю картину.

У зонах, де відбувається звуження стовбура палі зверху вниз, утворюються так звані «зони розвантаження» масиву ґрунту. Навпаки, у зонах розширення (де грань нахилена під кутом  $\alpha$  до вертикалі), при вертикальному переміщенні палі під навантаженням виникає ефект клина. Цей клин втискається в ґрунтовий масив, викликаючи не лише вертикальні деформації ущільнення, а й значні радіальні напруження  $\sigma_r$ , [кПа].

Величина граничних радіальних напружень, які здатна витримати ґрунтова основа без розвитку пластичних зсувів, апроксимується через теорію граничної рівноваги Кулона-Ренкіна. Для ділянки з кутом нахилу  $\alpha$  максимальний пасивний тиск ґрунту становить:

$$\sigma_{r,max} = \sigma_z \cdot \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi_{act}}{2}\right) + 2c_{act} \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi_{act}}{2}\right), \quad (5)$$

де  $\sigma_z$  - вертикальне напруження від власної ваги ґрунту на аналізованій глибині, кПа;

$\varphi_{act}$  та  $c_{act}$  - розрахункові характеристики ґрунту в активній зоні з урахуванням радіального ущільнення при зануренні палі.

Рівняння (5) є ключовою граничною умовою для наведеної вище моделі Вінклера: інтенсивність реактивного тиску  $p_z(z)$  із формули (3) у жодній точці похилої грані не повинна перевищувати значення  $\sigma_{r,max}$ . Завдяки виникненню цього ефекту навколо похилих ділянок палі формується ущільнене ґрунтове ядро. Воно працює спільно з конструкцією палі як єдиний геотехнічний елемент збільшеного умовного діаметра. Це пояснює високу жорсткість біпірамідальних палей при дії горизонтальних та знакозмінних навантажень.

#### Технології влаштування та підсилення фундаментів

Ефективність будь-якої геотехнічної конструкції значною мірою залежить від якості та технології її виконання. Втрата несучої здатності фундаментів часто пов'язана саме з порушенням природної структури ґрунту під час буріння або забивання.

Спосіб влаштування буронабивних палей (Патент № 155875). Традиційне механічне буріння під палі призводить до декомпресії та розущільнення ґрунту на стінках виробки, що погіршує умови роботи майбутнього фундаменту. Запропонований науковцями ВНТУ спосіб ліквідує цей недолік за рахунок використання керованої електрогідроімпульсної обробки стовбура свердловини.

Згідно з формулою винаходу, технологічний процес реалізується у два послідовні етапи:

1. Первинне розширення виробки: Після буріння свердловину заповнюють будівельним розчином і вводять спеціалізований розрядний пристрій. Між позитивним і негативним електродами пристрою, які просторово віддалені один від одного, здійснюють серію високочастотних імпульсних розрядів. Виникаюча гідродинамічна ударна хвиля радіально вдавлює розчин у масив, розширюючи та ущільнюючи стінки свердловини.

2. Вторинна інтегрована обробка: Після формування розширення у свердловину занурюють сталевий арматурний каркас. Головною технічною новизною способу є те, що на цій стадії арматурний каркас комутується у єдину електричну схему як негативний електрод. У виробку повторно вводять електроди розрядного пристрою і проводять фінальну серію імпульсних розрядів.

Така послідовність забезпечує направлену мікро- та макросейсмічну консолідацію контактної зони «паля-ґрунт». Боковий тиск імпульсу штучно збільшує характеристики міцності ґрунту до граничних значень  $\varphi_{act}$  та  $c_{act}$  (рівняння 5) та забезпечує бездоганне зчеплення матеріалу палі з арматурою і ущільненим ґрунтовим ядром основи. Це гарантує значний приріст складової бокового тертя  $R_f$  у загальному балансі несучої здатності системи (рівняння 1).

**Аналіз способів реконструкції та підсилення основ  
(Патенти № 157949, № 159909, № 154439 та № 152829).**

Проблема підсилення фундаментів будівель, що експлуатуються, є однією з найбільш складних у сучасній геотехніці. Традиційні методи (наприклад, підведення монолітних залізобетонних банкетів або продавлювання додаткових паль) вимагають значного простору, використання важкого обладнання та часто призводять до додаткових нерівномірних деформацій споруди в процесі самого підсилення.

Розроблені науковою школою ВНТУ методики підсилення (Патенти № 157949, № 159909, № 154439 та № 152829) базуються на принципі формування штучних комбінованих пальово-ґрунтових масивів підвищеної жорсткості. У патенті № 157949 описано спосіб, що дозволяє інтегрувати існуючі палі, які частково або повністю вичерпали свою несучу здатність, у нову розрахункову схему без їхнього демонтажу. Це досягається шляхом направленою ін'єкційного закріплення міжпального простору спеціальними цементно-піщаними розчинами з модифікуючими добавками під тиском нагнітання до 1,5 МПа.

Процес ін'єктування та крок ін'єкторів розраховуються таким чином, щоб теоретичний радіус поширення розчину  $R_{inf}$ , [м], перекивав половину відстані між палями в куці або стрічці. Для умов стаціонарної радіальної фільтрації в однорідному середовищі величина  $R_{inf}$  апроксимується залежністю:

$$R_{inf} = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot H \cdot t}{m}}, \quad (6)$$

де  $k$  – коефіцієнт фільтрації ґрунту, м/с;

$H$  – діючий п'єзометричний напір нагнітання розчину, м (виражається через тиск нагнітання  $P$  як  $H = P / (\rho \cdot g)$ );

$t$  – час ін'єкції, с;

$m$  – пористість ґрунтового масиву, виражена у частках одиниці (безрозмірна).

Перевірка розмірності за системою SI підтверджує математичну коректність рівняння (6):

$$R_{inf} = \sqrt{\frac{[m/s] \cdot [m] \cdot [s]}{1}} = \sqrt{[m^2]} = m. \quad (7)$$

В результаті реалізації цієї технології у підвальному просторі або з поверхні землі формується монолітний блок (геотехнічний масив), у якому існуючі палі виконують роль жорстких армуючих елементів, а структурно закріпленій цементациєю ґрунт сприймає та перерозподіляє основну частину стискаючих напружень від споруди. Це дозволяє повністю мобілізувати залишкову несучу здатність реконструкційного об'єкта.

**Пристрої для випробувань та контролю параметрів**

Найбільш дискусійним питанням геотехніки є оцінка реальної несучої здатності паль. Натурні статичні випробування є дорогими та тривалими, а динамічні методи часто дають значну похибку. Авторами було розроблено обладнання для точного лабораторного та натурального моделювання.

Пристрій для модельних випробувань паль комбінованим навантаженням (Патент № 161263). У реальних умовах експлуатації (особливо при дії вітрових, кранових чи сейсмічних навантажень) палі працюють під впливом складної просторової системи сил, що викликає одночасне стискання, вигин та кручення. Стандартні серійні стенди зазвичай дозволяють прикладати лише строго вертикальне або ізольоване горизонтальне зусилля. Запропонований пристрій вирішує задачу комплексного навантаження і містить:

- Просторову опорну раму з рухомими інженерними каретками;
- Систему гідродомкратів, які фіксуються під різними кутами до поздовжньої осі моделі палі;
- Тензометричну автоматизовану систему безперервної фіксації деформацій ґрунтового масиву та стовбура.

Весь експериментальний комплекс для верифікації аналітичних рішень було інтегровано з великогабаритним жорстким металевим лотком із габаритними розмірами 1,5× 1,5× 1,5 м (Патент № 160259). Такий масштаб лабораторної місткості обрано з умов мінімізації крайових ефектів (впливу жорстких стінок) на розподіл ліній напружень і зон зсуву в ґрунті при випробуванні моделей у масштабі 1:10.

Методологія проведення досліджень включає такі послідовні етапи:

1. Підготовка ґрунтової основи. Лоток пошарово заповнюється піщаним або глинистим ґрунтом із контролем щільності та вологості кожного шару товщиною 15 см.

2. Встановлення моделі палі. Моделі паль, виготовлені у масштабі 1:10 з дрібнозернистого бетону або тензOMETричної сталі, занурюють у сформований масив за технологіями, що відповідають реальним аналогам.

3. Монтаж навантажувальної системи. На оголовку палі закріплюється спеціальний сферичний шарнір, який виключає появу неконтрольованих паразитних моментів. Гідравлічні домкрати виставляються під фіксованими кутами (наприклад, 15°, 30° та 45° до вертикалі).

4. Ступінчасте навантаження. Навантаження прикладається ступенями, що становлять 1/10 від очікуваної граничної несучої здатності. Кожен ступінь витримується до умовної стабілізації деформацій основи (осідання менше 0,1 мм за дві години витримки).

Під час випробувань фіксація вертикальних та горизонтальних переміщень здійснюється індикаторами годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм. Для вимірювання деформацій по довжині стовбура палі використовуються наклеєні фольгові тензорезистори, підключені до автоматизованої системи збору даних.

Проведені серії модельних експериментів підтвердили, що при дії знакозмінних горизонтальних та похилих навантажень біпірамідальні палі (Патент № 146970) демонструють в середньому на 35% менше горизонтальне переміщення голови палі порівняно з гладкими циліндричними аналогами еквівалентного об'єму. Цей ефект обумовлений розвинутою площею контакту та виникненням зон підвищеного радіального тиску  $\sigma_{r,max}$  (рівняння 5) у верхній зоні палі, що дозволило уточнити та верифікувати емпіричні коефіцієнти ущільнення ґрунту в наведеній математичній моделі Вінклера.

Для роботи в натурних умовах на об'єктах, що підлягають геотехнічній реконструкції, науковцями ВНТУ запропоновано Спосіб визначення несучої здатності палі експлуатованого пальового фундаменту (Патент № 159910). Ця технологія дозволяє виконати оперативну експрес-оцінку залишкової міцності та несучої здатності елементів системи «ростверк-пала-ґрунт» без трудомісткого та небезпечного повного відкопування заглибленого залізобетонного ростверку, мінімізуючи ризики додаткових осадок споруди в процесі обстеження.

На основі розробленого математичного апарату (рівняння 1–6) та за результатами калібрування параметрів моделі в ході лабораторних експериментів, було виконано чисельний верифікаційний розрахунок ефективності практичного застосування запропонованого комплексу розробок наукової школи ВНТУ порівняно з традиційними геотехнічними підходами (Таблиця 1).

Таблиця 1

#### Порівняльний аналіз техніко-економічних та міцнісних показників базових конструктивних систем (на основі чисельного прикладу)

Конструктивна система фундаменту	Середня питома витрата бетону на одиницю несучої здатності, $V_{sp}$ , [м <sup>3</sup> /кН·10 <sup>-4</sup> ]	Максимальне граничне вертикальне навантаження, $P_{max}$ [кН]	Коефіцієнт надійності за ґрунтовою основою, $\gamma_g$
Традиційна система (на базі призматичних паль квадратної форми перерізом 35×35 см, $L=6$ м)	8,50	860	1.2
Комплекс інноваційних рішень ВНТУ (на базі біпірамідальної палі за патентом № 146970 еквівалентного об'єму)	6,23	1075	1.45

Аналіз показує, що оптимізація геометрії та впровадження запатентованих методів контролю математично доводить економічну перевагу рішень наукової школи ВНТУ на 26,7% та приріст несучої здатності на 25% за вищого коефіцієнта надійності.

#### Висновки

1. Систематизація запатентованих розробок Вінницького національного технічного університету свідчить про наявність цілісної та взаємопов'язаної наукової школи в галузі фундаментобудування. Групування патентів за трьома функціональними кластерами дозволило об'єднати методи конструювання, технології влаштування та методи ліквідації аварійних нахилів будівель у єдину геотехнічну систему.

2. Створені конструкції біпірамідальних паль (патент № 146970) та оптимізованих пальових елементів дозволяють суттєво зменшити об'єми залізобетону при збереженні високої несучої

здатності. На основі розробленої математичної моделі вінклера (рівняння 1–4) та даних чисельного аналізу (табл. 1) доведено, що мобілізація додаткового опору похилих граней  $R_n$  забезпечує зниження питомої матеріаломісткості на 26,7% на одиницю несучої здатності порівняно з призматичними аналогами еквівалентного об'єму.

3. Розроблені випробувальні стенди (патенти № 161263, № 160259) та способи оцінки несучої здатності в натурних умовах (патент № 159910) замикають повний науково-виробничий цикл «проекування – будівництво – контроль». Верифікація моделей у великогабаритному лотку дозволила встановити, що за знакозмінних навантажень біпірамідальні палі демонструють на 35% менші горизонтальні переміщення, що підтверджує строгість розроблених геотехнічних прогнозів та визначених граничних умов за Кулоном-Ренкіним (рівняння 5).

4. Перспективи подальших досліджень полягають у проведенні масштабних натурних випробувань для уточнення коефіцієнтів радіального ущільнення ґрунту в активній зоні та широкому впровадженні розроблених технологій і розрахункових комплексів у практику будівельного виробництва України згідно з вимогами ДБН В.2.1-10:2018.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Poulos, H. G. (2017). *Tall building foundation design*. CRC Press.
- [2] Ministry of Regional Development, Building and Housing and Communal Services of Ukraine. (2018). *DBN V.2.1-10:2018. Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennia* [State Building Codes of Ukraine V.2.1-10:2018. Bases and foundations of structures. Main provisions]. Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
- [3] Gao, L., Xiao, Y., & Yang, X. (2021). Investigation on the bearing capacity and soil deformation mechanisms of tapered piles in cohesionless soils. *Acta Geotechnica*, 16(4), 1125–1141. doi.org
- [4] Sinnreich, J., & Slocombe, W. (2019). Axial load transition in tapered and cylindrical driven piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(10), 04019063. doi.org
- [5] Спосіб вирівнювання геометричного положення будівель та споруд : пат. 161934 Україна : МПК E02D35/00, E04G23/06. № u202502023 ; заявл. 01.05.2025 ; опубл. 21.01.2026, Бюл. № 3/2026.
- [6] Пристрій для модельних випробувань будівельних конструкцій : пат. 161481 Україна : МПК G01M7/02. № u202502025 ; заявл. 01.05.2025 ; опубл. 10.12.2025, Бюл. № 50/2025.
- [7] Пристрій для модельних випробувань палей комбінованим навантаженням : пат. 161263 Україна : МПК E02D33/00. № u202502018 ; заявл. 01.05.2025 ; опубл. 19.11.2025, Бюл. № 47/2025.
- [8] Спосіб вирівнювання геометричного положення каркасних будівель : пат. 160963 Україна : МПК E02D35/00, E04G23/06. № u202502020 ; заявл. 01.05.2025 ; опубл. 22.10.2025, Бюл. № 43/2025.
- [9] Пристрій для випробування моделей пальових фундаментів на статичне навантаження : пат. 160259 Україна : МПК E02D33/00, G01M1/00. № u202500451 ; заявл. 04.02.2025 ; опубл. 20.08.2025, Бюл. № 34/2025.
- [10] Спосіб підсилення експлуатованого пальового фундаменту : пат. 159909 Україна : МПК E02D27/12, E02D3/12. № u202500112 ; заявл. 10.01.2025 ; опубл. 16.07.2025, Бюл. № 29/2025.
- [11] Спосіб визначення несучої здатності палі експлуатованого пальового фундаменту : пат. 159910 Україна : МПК E02D27/12, E02D33/00. № u202500114 ; заявл. 10.01.2025 ; опубл. 16.07.2025, Бюл. № 29/2025.
- [12] Спосіб підсилення пальового фундаменту : пат. 157949 Україна : МПК E02D3/12. № u202401852 ; заявл. 10.04.2024 ; опубл. 18.12.2024, Бюл. № 51/2024.
- [13] Спосіб влаштування буронабивних палей : пат. 155875 Україна : МПК E02D5/34. № u202303284 ; заявл. 05.07.2023 ; опубл. 17.04.2024, Бюл. № 16/2024.
- [14] Спосіб підвищення несучої здатності пальового фундаменту : пат. 154439 Україна : МПК E02D27/12. № u202301613 ; заявл. 12.04.2023 ; опубл. 15.11.2023, Бюл. № 46/2023.
- [15] Біпірамідальна паля : пат. 146970 Україна : МПК E02D27/32, E02D5/22, E02D5/34. № u202006998 ; заявл. 02.11.2020 ; опубл. 31.03.2021, Бюл. № 13/2021.
- [16] Спосіб зведення стрічкового фундаменту : пат. 154254 Україна : МПК E02D27/01. № u202301131 ; заявл. 15.03.2023 ; опубл. 25.10.2023, Бюл. № 43/2023.
- [17] Фундамент мілкового закладання : пат. 154131 Україна : МПК E02D27/01. № u202300854 ; заявл. 24.02.2023 ; опубл. 11.10.2023, Бюл. № 41/2023.
- [18] Спосіб підвищення несучої здатності : пат. 152829 Україна : МПК E02D27/12. № u202203115 ; заявл. 18.08.2022 ; опубл. 12.04.2023, Бюл. № 15/2023.
- [19] Паля : пат. 91941 Україна : МПК E02D5/34. № u 200904766 ; заявл. 15.05.2009 ; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 17/2010.

### REFERENCES

- [1] Poulos, H. G. (2017). *Tall building foundation design*. CRC Press.
- [2] Ministry of Regional Development, Building and Housing and Communal Services of Ukraine. (2018). *DBN V.2.1-10:2018. Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennia* [State Building Codes of Ukraine V.2.1-10:2018. Bases and foundations of structures. Main provisions]. Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
- [3] Gao, L., Xiao, Y., & Yang, X. (2021). Investigation on the bearing capacity and soil deformation mechanisms of tapered piles in cohesionless soils. *Acta Geotechnica*, 16(4), 1125–1141. doi.org
- [4] Sinnreich, J., & Slocombe, W. (2019). Axial load transition in tapered and cylindrical driven piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(10), 04019063. doi.org

- [5] Popovych, M. M., Fedorchenko, A. V. (2026). *Sposib vyrivniuvannia heometrychnoho polozhennia budivel ta sporud* [Method for leveling the geometric position of buildings and structures]. Patent of Ukraine No. 161934.
- [6] Popovych, M. M. (2025). *Prystrii dlia modelnykh vyprobuvan budivelnykh konstruksii* [Device for model testing of building structures]. Patent of Ukraine No. 161481.
- [7] Popovych, M. M. (2025). *Prystrii dlia modelnykh vyprobuvan pal kombinovanim navantazhenniam* [Device for model testing of piles with combined loading]. Patent of Ukraine No. 161263.
- [8] Popovych, M. M., Fedorchenko, A. V. (2025). *Sposib vyrivniuvannia heometrychnoho polozhennia karkasnykh budivel* [Method for leveling the geometric position of frame buildings]. Patent of Ukraine No. 160963.
- [9] Popovych, M. M., Maievska, I. V., & Korchevskiy, B. B. (2025). *Prystrii dlia vyprobuвання modelei palovykh fundamentiv na statychni navantazhennia* [Device for testing models of pile foundations for static load]. Patent of Ukraine No. 160259.
- [10] Popovych, M. M., Rebrii, V. M. (2025). *Sposib pidsylennia ekspluatovanoho palovoho fundamentu* [Method for strengthening the operated pile foundation]. Patent of Ukraine No. 159909.
- [11] Popovych, M. M., Maievska, I. V., & Ohirchuk, O. V. (2025). *Sposib vyznachennia nesuchoi zdatnosti pali ekspluatovanoho palovoho fundamentu* [Method for determining the bearing capacity of a pile of an operated pile foundation]. Patent of Ukraine No. 159910.
- [12] Popovych, M. M., Terletskiy, V. S. (2024). *Sposib pidsylennia palovoho fundamentu* [Method for strengthening pile foundation]. Patent of Ukraine No. 157949.
- [13] Popovych, M. M., Maievska, I. V., & Lamekin, V. S. (2024). *Sposib vlashtuvannia buronabyvnykh pal* [Method of installing bored piles]. Patent of Ukraine No. 155875.
- [14] Popovych, M. M., Met, I. V., Podolian, D. Y., & Ivasyk, S. O. (2023). *Sposib pidvyshchennia nesuchoi zdatnosti palovoho fundamentu* [Method for increasing the bearing capacity of pile foundation]. Patent of Ukraine No. 154439.
- [15] Popovych, M. M., Maievska, I. V., & Prosiyanik, A. L. (2021). *Bipiramidalna palia* [Bipyramidal pile]. Patent of Ukraine No. 146970.
- [16] Popovych, M. M., Maievska, I. V., Ivasyk, S. O., & Chernysh, V. M. (2023). *Sposib zvedennia strichkovoho fundamentu* [Method of strip foundation construction]. Patent of Ukraine No. 154254.
- [17] Popovych, M. M., Maievska, I. V., & Molochnyuk, M. V. (2023). *Fundament milkoho zakladannia* [Shallow foundation]. Patent of Ukraine No. 154131.
- [18] Popovych, M. M., Maievska, I. V., & Podolian, D. Y. (2023). *Sposib pidvyshchennia nesuchoi zdatnosti* [Method of increasing the bearing capacity]. Patent of Ukraine No. 152829.
- [19] Popovych, M. M. (2010). *Palia* [Pile]. Patent of Ukraine No. 91941.

**Попович Микола Миколайович** – к.т.н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [popovychnick@gmail.com](mailto:popovychnick@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0009-1139-8425>

**M. Popovych**

## EFFECTIVE DESIGNS AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR FOUNDATION LAYING ACCORDING TO RESEARCH RESULTS

Vinnitsia National Technical University

*The article presents the results of long-term theoretical and experimental research of the scientific school of Vinnitsia National Technical University in the field of geotechnics and foundation engineering. A complex of innovative constructive and technological solutions, which are protected by a significant patent portfolio of the university, is analyzed. The systematization and detailed analysis of the technical essence of a group of patents for utility models and inventions aimed at solving urgent problems of the modern zero cycle of construction are presented. Particular attention is paid to the development of new types of piles, among which the key place is occupied by a bipyramidal pile with variable shaft geometry. The mechanics of its interaction with the soil mass, which is based on the occurrence of additional reactive pressure on the inclined faces and the formation of a compacted soil core, is described. In addition to new designs of shallow and deep foundations, the paper examines in detail progressive technologies of their installation in the difficult geological conditions of the Podillia region and water-saturated loess soils. A separate section is devoted to the urgent problem of reconstruction and emergency restoration of buildings in operation. Patented methods of injection strengthening of pile foundations and increasing their bearing capacity without stopping the operation of structures are analyzed. A description of the unique device developed by the authors for model testing of piles with combined (spatial) load in laboratory conditions is also given. A detailed methodology for conducting such experiments is provided, which allows to significantly increase the accuracy of geotechnical forecasts. Based on mathematical modeling and a series of full-scale tests, it is proven that the implementation of the developed set of solutions ensures a reduction in material consumption up to 20% and increases the overall reliability of construction objects.*

**Keywords:** foundation, bipyramidal pile, laboratory testing, bearing capacity, foundation reinforcement, patent of Ukraine, geotechnics.

**Mykola Popovych** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction, Urban Economy and Architecture, Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, email: [popovychnick@gmail.com](mailto:popovychnick@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0009-1139-8425>