Регресійна модель для визначення несучої здатності бурових паль методом вдавлюючого ударного навантаження (Dynamic Load Testing)

Олександр САМОРОДОВ¹, Сергій ТАБАЧНІКОВ², Євген ГЕРАСИМОВИЧ³,

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова 17, вул. Чорноглазівська, Харків, Україна, 61002, Приватне підприємство «Пайл Тест Сістемс» 4/72, вул. Європейська, Харків, Україна, 61145, ¹osamorodov@ukr.net, orcid.org/0000-0003-4395-9417 ²s.v.tabachnikov@ukr.net, orcid.org/0000-0002-2619-8612 ³piletestsystems.gmail.com

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.227-242

Анотація. У статті проаналізовано досвід впровадження в Україні інноваційного методу вдавлюючого ударного навантаження (міжн. назва – Dynamic Load Testing (DLT) при випробуванні грунтів натурними палями, який базується на принципах хвильової теорії удару. Показано переваги і недоліки даного методу випробувань для різних видів паль і вказано проблеми, які виникають при випробуванні грунтів буровими палями, особливо буроін'єкійними. Вперше запропоновано використання статистичних методів для побудови регресійної моделі, що визначає несучу здатність паль на підставі паралельних випробувань ґрунтів палями методами статичного вдавлюючого навантаження (міжн. назва – Static Load Testing, SLT) та ударного (динамічного) вдавлюючого навантаження (DLT). Сформовано та визначено фактори, що суттєво впливають на механіку взаємодії палі з ґрунтовою основою при випробуванні грунтів палею методом DLT. Розроблено моделі множинної лінійної регресії для визначення граничного опору та несучої здатності за пружною деформацією бурових паль на підставі результатів випробування методом вдавлюючого ударного навантаження (DLT) для прогнозування залежності «навантаження – осідання», що є необхідним при проєктуванні пальових фундаментів. Проведено кореляційний та регресійний аналіз запропонованих моделей; вказано перспективи їх удосконалення. На даному етапі розробки кореляційних моделей маємо достатньо високі статистичні результати оцінювання, які вказують на технічно коректні моделі із сильними зв'язками між



Олександр САМОРОДОВ професор кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва д.т.н., проф.



Сергій ТАБАЧНІКОВ доцент кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва к.т.н., доц.



Евген ГЕРАСИМОВИЧ директор, головний інженер приватного підприємства «Пайл Тест Сістемс» (ексклюзивний представник в Україні компанії Allnamics, Нідерланди)

змінними та високою статистичною значимістю. У 2024-2025 роках на реальному об'єкті будівництва при випробуванні паль методом DLT запропоновані моделі пройшли апробацію, де відхилення визначених величин F_e та F_u для буроін'єкційних паль було у межах 5% від величин, що були визначенні за допомогою метода статичного вдавлюючого навантаження (SLT).

Ключові слова. паля, буроін'єкційна, буронабивна, випробування, метод, навантаження, динамічне, ударне, регресійна модель, кореляція, несуча здатність палі.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У країнах ЄС, США тощо для визначення несучої здатності дослідних паль широко застосовується та нормується один із методів динамічного навантаження - метод вдавлюючого ударного навантаження (міжн. назва - Dynamic Load Testing (DLT) (ASTM D 4945-16; ISO 22477-4:2018), що базується на принципах хвильової теорії удару. Суть методу полягає у тому, що випробування палі виконується серією ударних впливів для отримання експериментальних параметрів поширення хвилі напруження, що рухається уздовж ствола палі від голови палі до низу палі та у зворотному напрямку. Біля голови палі параметри хвилі фіксуються за допомогою спеціальних датчиків для вимірювання напружень та прискорень. Після цього, на підставі теорії розповсюдження ударної прямолінійному одновісному хвилі V

стрижні, що розташований у квазіпружному середовищі, за допомогою програмного забезпечення проводиться обробка експериментальних даних з інтерпретація отриманих результатів у вигляді прогнозованої залежності осідання голови палі від дії умовного статичного навантаження та граничної несучої здатності палі (Manual "Allnamics-PDA/DLT. Monitoring and Reporting. Pile Driving Analysis and Dynamic Load Testing", 2018).

Сьогодні метод вдавлюючого ударного навантаження (DLT) не нормується в Україні. Однак, починаючи з 2019 року, компанія ПП «Пайл Тест Сістемс» (м. Харків, Україна) при науковому супроводі д.т.н., проф. Самородова О.В. та к.т.н., доц. Табачнікова С.В. успішно проводить випробування грунтів різними видами паль методом DLT (Samorodov and oth, 2022) показано на Рис. 1.



- Рис.1. Загальні види процесу підготовки та проведення випробування грунтів буровими палями методом DLT в Україні
- Fig.1. Photos showing the test setup and test procedures to test piles using drilled piles according to the DLT method in Ukraine

Для випробувань застосовуються датчики та сучасне обладнання компанії Allnamics (Нідерланди). Реєструюче обладнання включає датчики PDA-Strain Sensor та PDA-Acceleration Sensor, які поєднані в єдиний вимірювальний прилад, реєстратор даних PDR-System і спеціалізований комп'ютер з ексклюзивним програмним забезпеченням (Manual "Allnamics-PDA/DLT. Monitoring and Reporting. Pile Driving Analysis and Dynamic Load Testing", 2018) фірми Allnamics (Нідерланди) показано на Рис. 2.

BASES AND FOUNDATIONS. 2025. Issue 50



Рис.2. Датчики та ресструюче обладнання Fig.2. Sensors and recording equipment

Сигнали, що надходить від вимірювальних приладів під час проходження ударної хвилі, обробляються за допомогою спеціального програмного забезпечення на комп'ютері. Нижче, на Рис. 3-5 наведено приклади деяких отриманих результатів для реальних бурових паль у вигляді графіків.



Рис.3. Графік залежності вертикальної деформації голови палі у часі від ударного впливу Fig.3. Graph of the vertical deformation of the pile head against time after the impact



- Рис.4. Розповсюдження низхідної (Downward) та висхідної (Upward) ударної хвилі по довжині палі у часі від ударного впливу
- Fig.4. Graph of the propagation of the downward and upward impact waves over the length of the pile against time after the impact



- Рис.5. Розповсюдження низхідної ударної хвилі по довжині палі та її швидкість у часі від ударного впливу (після обробки експериментальних даних)
- Fig.5. Graph of the propagation of the downward impact wave and its velocity over the length of the pile against time after the impact (after processing the experimental data)

Після обробки отриманих сигналів у програмному забезпечені Allnamics, що потребує значного втручання висококваліфікованого спеціаліста, отримані результати представляються у вигляді прогнозованої залежності осідання голови палі від дії умовного статичного вертикального вдавлюючого навантаження наведено на Рис. 6.



Рис.6. Прогнозована залежність осідання палі від вертикального вдавлюючого статичного навантаження *F*

Fig.6. Predicted relationship between the settlement of the pile and the vertical downward static load F

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Історія становлення та розвитку випробування паль за допомогою методу, що заснований на теорії розповсюдження хвилі напружень у палі від удару бере свій початок ще з 1931 року XX століття, про що ретельно описано у статті видатного голландського інженера та новатора Пітера Міддендорпа (Middendorp, 2022).

Сьогодні інновації та проблеми застосування подібних методів випробувань обговорюються та вирішуються на спеціалізованій міжнародній конференції (International Stress Waves Conference), що проводяться кожні 3 роки під егідою міжнародної геотехнічної організації ISSMGE (www.issmge.org). Особливістю цих конференцій, крім демонстрації нового обладнання тощо, є апробація приладів та обладнання різних виробників для випробування грунтів палями та порівняння результатів при інших рівних умовах, що проводяться на спеціально підготовленому демонстраційно-дослідному майданчику приведено на Рис. 7.

ОСНОВИ ТА ФУНДАМЕНТИ. 2025. Випуск 50



Рис.7. Фото демонстраційно-дослідного майданчику в м. Роттердамі (Нідерланди) у рамках проведення 11-тої міжнародної конференції (вересень, 2022 р.)

Fig.7. A photo of a demonstration and research site in Rotterdam, the Netherlands during the 11th International Conference (September, 2022)

Для аналітичного або наближеного чисельного розв'язку диференціального рівняння хвильового процесу при одномірному поширенні хвилі напружень у палі застосовуються наступні методи (Middendorp P. and Van Weele A., 1986; Phan Ta Le, 2013):

1. Метод Сміта (Smith's method) – чисельний метод, який використовується для моделювання динамічного навантаження на палю.

2. Метод характеристик (Method of characteristics) – це загальніший аналітичний метод у математиці для розв'язання квазілінійних рівнянь з частинними похідними першого порядку. Він дозволяє звести рівняння до звичайних диференціальних рівнянь уздовж характеристичних ліній.

3. Скінченно-різницева схема (Finite difference scheme) – чисельний підхід, що дискретизує рівняння хвилі та

використовується для його розв'язання.

Тут слід відмітити, що компанія Allnamics для аналізу експериментальних даних використовує аналітичний метод – метод характеристик (Manual "Stress Wave Theory", 2019), який реалізований в їхньому ексклюзивному програмному забезпеченні.

Так як метод DLT базується на теорії розповсюдження хвилі напружень у одновісному прямолінійному стрижні, що розташований у квазіпружному середовищі, то при проведені випробувань вимагається постійний поперечний переріз палі по довжині та фізико-механічна однорідність матеріалу палі: модуль пружності E та щільність ρ . В інших випадках (див. рис. 8) (Трощинський, 2021), якість сигналів знижується, що ускладнює їх обробку та призводить до суттєво різних суб'єктивних результатів при інших рівних умовах.



Рис.8. Дефектні буроін'єкційні палі, що були виконані з рівня денної поверхні, на будівельних майданчиках у м. Києві

Fig.8. Defective CFA piles that were drilled from the ground level at construction sites in Kyiv

Наприклад, компанією Allnamics (Manual "AllWave-DLT. Signal Matching Software. Allnamics Pile", 2019) наведено діаграму на Рис. 9, яка показує, що для однієї забивної палі прогнозована гранична несуча здатність (F_u^{DLT}) за методом DLT на підставі отриманих сигналів від різних датчиків, відповідного реєструючого обладнання та програмного забезпечення оцінена по різному та має значення, що можуть відрізнятися до 20% від величини F_u^{SLT} , яка отримана методом SLT (статичного навантаження). Причому, завищені значення F_u^{DLT} отримані лише користувачем 5, що вказує на явну суб'єктивність отриманих результатів. Тобто, на підставі даних наведеної діаграми на Рис. 9 без врахування результатів користувача 5, можна обгрунтовано призначати величину F_u. Тому закордонні норми проєктування обґрунтовано вводять коефіцієнт надійності у_k=1,2 для призначення розрахункового навантаження на палі N, що також відповідає національним нормам (Зміна №1 до ДБН В.2.1-10-2009, 2011) при визначенні N за результатами випробування паль методом статичного вдавлюючого навантаження, тобто для забивних паль надійність методу DLT прирівнюється до методу SLT.





Fig.9. Chart comparing the predicted ultimate resistances F_u^{DLT} for a driven pile according to the DLT method

Також компанією Allnamics (Manual "AllWave-DLT. Signal Matching Software. Allnamics Pile", 2019) наведено діаграму на Рис. 10, яка показує, що для однієї буроін'єкційної палі прогнозована гранична несуча здатність палі (F_u^{DLT}) за методом DLT на підставі отриманих сигналів від різних датчиків, відповідного реєструючого обладнання та програмного забезпечення оцінена по різному та має значення, що до 100% відрізняються від величини F_u^{SLT} , яка отримана методом SLT (статичного навантаження). Особливо слід звернути увагу на те, що на підставі сигналів В3 користувач 1 отримав величину граничної несучої здатності палі $F_u^{DLT} \approx 700$ кH, а користувач 6 на підставі сигналу В4 отримав в 3 (три) рази більше значення $F_u^{DLT} \approx 2100$ кH.





Fig.10. Chart comparing the predicted ultimate resistances F_u^{DLT} for a CFA pile according to the DLT method

Вищенаведене вказує та підтверджує, що метод DLT є непрямим методом, але достатньо надійним саме для забивних паль, для яких можливо забезпечити у заводських умовах постійний поперечний переріз палі по довжині та фізико-механічну однорідність матеріалу палі. Крім того, забивні палі, мають відносно низьку несучу здатність (до F_u =1500кH), тому при ударі молотом, як правило, повністю реалізуються (мобілізуються) сили опору ґрунтової основи.

Що стосується бурових паль, то недоліком для випробування методом DLT є «невитриманість» поперечного перетину (див. рис. 8) та «неоднорідність» фізико-механічних властивостей бетону по їх довжині, виходячи з особливостей влаштування бурових паль та нашарувань грунтів. До того ж, бурові палі, як правило, мають високі значення граничного опору палі по ґрунту (в основному, Fu=2000÷10000кН, але бувають $F_u \ge 20$ MH), що унеможливлює повну мобілізацію сил опору ґрунту від удару молотом, вагу якого рекомендується приймати не менше ніж 2% від потенційного величини *F*_u. Тому, вказаний недолік суттєво впливає на якість сигналів, що реєструються, а високе значення граничного опору бурових паль F_u – ускладнює прогнозування цієї величини методом DLT.

МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є розробка моделей множинної лінійної регресії для визначення граничного опору та несучої здатності за пружною деформацією бурових паль на підставі результатів випробування методом вдавлюючого ударного навантаження (DLT).

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Пропонується розглянути методичний підхід до створення регресійних моделей для прогнозування не тільки граничного опору бурової палі (F_u), а й для визначення її несучої здатності за пружною деформацією (F_e) для побудови графіка залежності «навантаження, F – осідання, S», який є необхідним при проєктуванні пальових фундаментів. На Рис. 11 для наочності представлено кінцевий результат використання запропонованих регресійних моделей: графік прогнозованої залежності «F-S» для реальної палі, що була випробувана у 2024 році інноваційним в Україні методом ударного вдавлюючого навантаження (DLT).



Рис.11. Прогнозована залежність осідання палі S від вдавлюючого статичного навантаження F Fig.11. Predicted relationship between the settlement of the pile S and the downward static load F

Насамперед, слід висунути наступну гіпотезу при випробуванні палі методом DLT: відносно мала вага падаючого молоту (у порівнянні з граничною несучої здатністю палі по ґрунту F_u) миттєво не передає напруження уздовж всього ствола палі, тому деформується лише частина ствола палі по довжині, уздовж якої виникає пружна деформація S_{max} (див. рис. 3). Залишкова деформація S_{res} (Residual deformation) (див. рис. 3) пов'язана з деформацією масиву ґрунту при його ущільненні навколо палі від динамічного впливу, що «тягне» палю вниз під дією

довантажувальних сил тертя ґрунту.

Тут слід також додати, що спроба мобілізувати більше сил опору ґрунтової основи палі за допомогою збільшення ваги молоту або підвищення висоти його скидання, насамперед, може призвести до негативних наслідків: втрати міцності локальних зон бетону голови палі приведено на Рис. 12, а), що значно знижує якість реєстрованих сигналів чи, взагалі, втрату стійкості ствола палі на Рис. 12, б.



Рис.12. Можливі проблеми, що пов'язані з використанням методу DLT: а) втрати міцності локальних зон бетону палі; б) втрата стійкості ствола палі

Fig.12. Possible issues arising from using the DLT method: (a) loss of strength in localized areas of the concrete of a pile; (b) loss of stability of the pile shaft

Тому пропонується побудова регресійних моделей, що базуються на результатах паралельних випробувань грунтів різними буровими палями методами статичного (Static Load Testing (SLT) та ударного (динамічного) навантажень (Dynamic Load Testing (DLT).

a)

Методичний підхід до створення регресійних моделей полягає в реалізації послідовних етапів:

1. Формування факторів (предикатів), що мають вплив на механіку взаємодії палі з грунтовою основою при випробуванні грунтів палею методом ударного вдавлюючого

навантаження (DLT), де паля сприймає динамічне (імпульсне, ударне) навантаження при скиданні на палю вільно падаючого молоту, вагою P значно меншою ($\leq 2\%$) за граничну несучу здатність палі F_u (див. рис. 1, 12).

2. Визначення факторів (предикатів), що суттєво впливають на визначення несучої здатності палі за пружними деформаціями *F*_e та граничної несучої здатності палі *F*_u.

3. Статистичний аналіз створених регресійних моделей.

Багатовимірну регресійну модель або модель множинної регресії (далі, регресійну модель) в загальному вигляді можна записати наступним чином (Sachs, 1972):

$$Y_{i} = \beta_{0} + \beta_{1}X_{i1} + \beta_{2}X_{i2} \dots + \beta_{p}X_{ip} + \varepsilon_{i}, (1)$$

 $i = 1, \dots, n,$

де *Y_i* – залежна змінна в спостереженні;

X_{ip} – незалежна змінна (фактор, предиката або регресор) в спостереженні;

 β_0 – вільний член;

 $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_p$ — коефіцієнти регресії для $X_{i1}, X_{i2} \dots X_{ip};$

 ε_i – залишок у спостереженні (похибка моделі).

При побудові регресійної моделі для наочності введемо позначення факторів (див. рис. 11, 13):

 F_e (див. рис. 11) позначимо як першу залежну змінну Y – несуча здатність палі за пружними деформаціями за результатами польових випробувань методом SLT (умовна межа лінійної залежності між вертикальним навантаженням на палю F та її осіданням S, прийнятий нами $S\approx0,01d$, де d – діаметр палі, м), кH;

 F_u (див. рис. 11) позначимо як другу залежну змінну Y – граничний опір палі за результатами польових випробувань методом SLT (втрата стійкості ґрунтової основи від вертикального навантаження на палю F, зазвичай, при осіданні $S\approx0,05d$ (Самородов, 2018), де d – діаметр палі, м), кН;

DW (Downward Wave, див. рис. 4) позначимо як незалежну змінну X_1 – низхідна ударної хвилі, кH;

UW (Upward Wave, див. рис. 4) позначимо як незалежну змінну X_2 – висхідна ударної хвилі, кН;

 $\frac{l}{d}$ (див. рис. 13) позначимо як незалежну змінну X_3 – співвідношення довжини палі lу грунті до її діаметру d, од.;

 S_{max} (див. рис. 3) позначимо як незалежну змінну X_4 – максимальна деформація голови палі від ударного впливу, м.;

 S_{res} (див. рис. 3) позначимо як незалежну змінну X_5 — залишкова деформація голови палі після ударного впливу, м.;

 G_s (див. рис. 13) позначимо як незалежну змінну X_6 – жорсткість системи «паля -

ґрунтова основа» з нехтуванням жорсткості палі, кН, яка визначається за формулою:

$$G_s = G_f + G_b, \tag{2}$$

де G_f – середня жорсткість на зсув ґрунтової основи в межах бічної поверхні палі, кH, що дорівнює:

$$G_f = \pi \cdot d \cdot l \cdot \frac{\sum_{i=1}^n G_i \cdot h_i}{\sum h_i},$$
 (3)

де G_i – модуль зсуву *i*-го шару ґрунту в межах бічної поверхні палі, кПа, що дорівнює:

$$G_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)},\tag{4}$$

*Е*_{*i*} – модуль деформації *i*-го шару ґрунту, кПа;

v_i – коефіцієнт поперечної деформації *i*-го шару ґрунту, од.;

 h_i – товщина *i*-го шару ґрунту, м;

G_b – жорсткість на зсув ґрунтової основи під підошвою палі, кН, що дорівнює:

$$G_b = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{E_b}{2(1+\nu_b)}, \qquad (5)$$

де *E_b* – модуль деформації грунту під підошвою палі, кПа;

v_b – коефіцієнт поперечної деформації грунту під підошвою палі, од.;

d – діаметр палі або її розширення D=d, м, згідно зі схемою на рис. 13;

 F_b (див. рис. 13) позначимо як незалежну змінну X_7 – гранична несуча здатність ґрунтової основи під підошвою палі, кН, що дорівнює:

$$F_b = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \left(N_\gamma \cdot \gamma_b \cdot \frac{d}{2} + N_q \cdot q + N_c \cdot c_b \right), (6)$$

де N_{γ} , N_q , N_c – коефіцієнти, що залежать від кута внутрішнього тертя ґрунту φ_b під підошвою палі, од., та визначаються згідно з рішенням проф. В.Г. Березанцева;

d(D) – діаметр палі або її розширення, м, згідно зі схемою на рис. 13;

 γ_b — питома вага грунту під підошвою палі, к H/m^3 ;

 q – вертикальне навантаження у рівні підошви палі від власної ваги масиву ґрунту з урахуванням виважуючої дії ґрунтових вод, кПа;

c_b – питоме зчеплення ґрунту під підошвою палі, кН/м².



Рис.13. Розрахункова схема системи «паля – грунтова основа» для визначення факторів регресійних моделей

Fig.13. Calculation scheme of the pile-soil system for determining the factors of regression models

Із урахуванням зроблених нами позначень регресійна модель залежності несучої здатності палі за пружними деформаціями F_e (див. рис. 11) від факторів, що впливають, матиме вигляд:

$$F_e = \beta_0 + \beta_1 DW + \beta_2 UW + \beta_3 \frac{l}{d} + \beta_4 S_{max} + \beta_5 S_{res} + \beta_6 G_s + \beta_7 F_b + \varepsilon_i, \quad (7)$$

Всі подальші розрахунки і результати для простоти викладення і виключення складних математичних операцій виконувалися за допомогою програми EXCEL.

Для початку проаналізуємо кореляційну матрицю, тобто матрицю парних коефіцієнтів кореляції (матриця є симетричною, тому наведені не всі значення):

(
		Fe	DW	UW	l/d	Smax	Sres	Gs	Fb
	Fe	1,000							
	DW	0,952	1,000						
	UW	0,913	0,994	1,000					
r =	l/d	0,224	0,420	0,502	1,000				
	Smax	-0,687	-0,525	-0,447	0,133	1,000			
	Sres	-0,578	-0,338	-0,236	0,424	0,924	1,000		
	Gs	0,947	0,958	0,939	0,402	-0,709	-0,509	1,000	
	Fb	0,420	0,538	0,581	0,763	-0,295	-0,036	0,646	1,000
(

Як видно з матриці (8), найбільший вплив на значення F_e мають фактори: DW, UW, S_{max} та G_s . Тому, на підставі 7-ми результатів паралельних випробувань грунтів палями методами SLT та DLT можна запропонувати наступну регресійну модель для визначення величини несучої здатності палі за пружними деформаціями F_e :

 $F_e = \beta_0 + \beta_1 DW - \beta_2 UW + \beta_4 S_{max} + \beta_4 S_{max}$ $+\beta_6 G_s$, $(9)^{*}$ яка має наступні результати статистичного оцінювання: коефіцієнт кореляції R=0,99672728; коефіцієнт детермінації **R²=0,99346528**; скорегований коефіцієнт детермінації R²_{adj}=0,98039584; значення ста-F=76,014; тистики рівень значущості регресійної моделі **р=0,0130267**; стандартна помилка оцінювання: **180,519**;

* - значення коефіцієнтів β_0 , β_1 , β_2 , β_4 , β_6 не наводяться, так як є комерційною таємницею компанії ПП «Пайл Тест Сістемс» (Україна).

Із урахуванням зроблених нами позначень регресійна модель залежності граничного опору палі *F*_u (див. рис. 11) від факторів, що впливають, матиме вигляд:

 $F_{u} = \beta_{0} + \beta_{1}DW + \beta_{2}UW + \beta_{3}\frac{l}{d} + \beta_{4}S_{max} + \beta_{5}S_{res} + \beta_{6}G_{s} + \beta_{7}F_{b} + \varepsilon_{i}, \quad (10)$

Проаналізуємо кореляційну матрицю, тобто матрицю парних коефіцієнтів кореляції (матриця є симетричною, тому наведені не всі значення):



Як видно з матриці (11), найбільший вплив на значення F_u мають фактори: *DW*, *UW*, *l/d*, G_s та F_b . Однак, приймемо тільки 4 фактори, які найбільш впливають на механіку взаємодії палі з ґрунтовою основою при втраті стійкості палі по ґрунту. Тому, на підставі 6-ти результатів паралельних випробувань грунтів палями методами SLT та DLT можна запропонувати наступну регресійну модель для визначення величини граничного опору палі *F*_u:

$$F_u = \beta_0 + \beta_1 DW - \beta_2 UW + \beta_3 \frac{l}{d} - \frac{1}{(12)}$$

яка має наступні результати статистичного оцінювання: коефіцієнт кореляції R=0,99962133; коефіцієнт детермінації $R^2=0,9992428$; скорегований коефіцієнт детермінації $R^2_{adj}=0,99621402$; значення статистики F=329,916; рівень значущості регресійної моделі p=0,041265; стандартна помилка оцінювання: 127,56;

* - значення коефіцієнтів β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_7 не наводяться, так як є комерційною таємницею компанії ПП «Пайл Тест Сістемс» (Україна).

На даному етапі розробки кореляційних моделей (9, 12) маємо достатньо високі статистичні результати оцінювання, які вказують на технічно коректні моделі із сильними зв'язками між змінними та високою статистичною значимістю. Однак, у зв'язку з незначною кількістю спостережень (до 7-ми) на даному етапі не виконувалася перевірка моделей на мультиколінеарність (яка тут присутня), не аналізувалися стандартні помилки, t-статистика та p-значення окремих коефіцієнтів для вдосконалення моделей. Удосконалення моделей буде робитися у подальшому зі збільшенням результатів паралельних випробувань грунтів палями методами DLT та SLT.

У 2024-2025 роках на реальному об'єкті будівництва при випробуванні паль методом DLT запропоновані моделі пройшли апробацію (Самородов та Табачніков, 2025), де відхилення визначених величин F_e та F_u для буроін'єкційних паль було у межах 5% від величин, що були визначенні за допомогою метода статичного вдавлюючого навантаження (SLT).

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Проаналізовано досвід впровадження в Україні інноваційного методу вдавлюючого ударного навантаження (міжн. назва – Dynamic Load Testing (DLT) при випробуванні грунтів натурними палями, який базується на принципах хвильовій теорії удару. Показано переваги і недоліки даного методу випробувань для різних видів паль і вказано проблеми, які виникають при випробуванні грунтів буровими палями, особливо буроін'єкійними.

Вперше запропоновано використання статистичних методів для побудови регресійної моделі, що визначає несучу здатність паль на підставі паралельних випробувань ґрунтів палями методами статичного вдавлюючого навантаження (Static Load Testing, SLT) та ударного (динамічного) вдавлюючого навантаження (Dynamic Load Testing, DLT).

Розроблено моделі множинної лінійної регресії для визначення граничного опору та несучої здатності за пружною деформацією бурових паль на підставі результатів випробування методом вдавлюючого ударного навантаження (DLT) для прогнозування залежності «навантаження – осідання», що є необхідним при проєктуванні пальових фундаментів. Проведено кореляційний та регресійний аналіз запропонованих моделей; вказано перспективи їх удосконалення.

У 2024-2025 роках на реальному об'єкті будівництва при випробуванні паль методом DLT запропоновані моделі пройшли апробацію (Самородов та Табачніков, 2025), де відхилення визначених величин F_e та F_u для буроін'єкційних паль було у межах 5% від величин, що були визначенні за допомогою метода статичного вдавлюючого навантаження (SLT).

Рекомендується широке впровадження в практику геотехнічних вишукувань в Україні випробування грунтів натурними палями методом DLT, що вимагає невідкладної актуалізації ДСТУ (ДСТУ Б В.2.1-1-95, 1997) з гармонізацією відповідного європейського стандарту (ISO 22477-4:2018, 2018).

ЛІТЕРАТУРА

- 1. ASTM International. (2016). Standard test method for high-strain dynamic testing of piles: ASTM D 4945-16.
- International Organization for Standardization. (2018). Geotechnical investigation and testing – Testing of geotechnical structures – Part 4:

Testing of piles: dynamic load testing: ISO 22477-4:2018.

- 3. Allnamics. (2018). Manual "Allnamics-PDA/DLT. Monitoring and reporting. Pile driving analysis and dynamic load testing" (Software version: 3.6.44).
- Samorodov, O., Tabachnikov, S., & Gerasimovych, I. (2022). Ukrainian experience of comparing the test results of CFA piles by SLT and DLT method. *Naukovyy visnyk budivnytstva (Scientific Bulletin of Civil Engineering)*, 2(108), 32-35. <u>https://doi.org/10.29295/2311-7257-2022-108-</u> <u>2-32-35</u>
- Middendorp, P. (2022). More than 80 years of experience with the method of characteristics from graphical analyses to advanced driveability analyses by scripts. *11th International Conference on Stress Wave Theory and Design and Testing Methods for Deep Foundations (SW2022)*, Rotterdam, The Netherlands. <u>https://doi.org/10.5281/zenodo.7148669</u>
- 6. Middendorp, P., & Van Weele, A. (1986). Application of characteristic stress wave method in offshore practice. In *Proceeding of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling* (pp. 6-18), Nantes.
- 7. Phan Ta Le. (2013). *Numerical and experimental studies on dynamic load testing of open-ended pipe piles and its applications* (Dissertation for the degree of PhD). Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Japan.
- 8. Allnamics. (2019). *Manual "Stress wave theory"*. Allnamics Pile Testing Experts B.V.
- Трощинський, Б. О. (2021). Комп'ютеризована система діагностики залізобетонних паль на основі акустичних методів (Дис. ... канд. техн. наук). Київський національний університет будівництва і архітектури; Інститут електродинаміки.
- 10. Allnamics. (2019). Manual "AllWave-DLT. Signal matching software. Allnamics Pile Testing Experts B.V.".
- 11. Мінрегіонбуд України. (2011). Основи та фундаменти споруд: Зміна №1 до ДБН В.2.1-10-2009.
- Sachs, L. (1972). Statistischen auswertungsme-thoden. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York.
- 13. Самородов, О. В. (2018). Розвиток наукових основ вибору раціональних параметрів ком-бінованих пальових і плитних фундаментів багатоповерхових будівель (Дис. ... докт. техн. наук). Державний вищий навчальний

заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», Дніпро.

- 14. Самородов, О., & Табачніков, С. (2025). Дослідження несучої здатності п'яти буроін'єкційних паль методом вдавлюючого ударного навантаження (Dynamic Load Testing (DLT) у межах пальових полів фундаментів ВЕУ 6.1, 6.2, 6.3 на об'єкті будівництва: «Нове будівництво ВЕС «Волинь» на території Іваничівської селищної ради». Науково-технічний звіт ПП «Пайл Тест Сістемс», Харків.
- 15. Держстандарт. (1997). Грунти. Методи польових випробувань палями: ДСТУ Б В.2.1-1-95. Київ: Укрархбудінформ.

REFERENCES

- 1. ASTM International. (2016). Standard test method for high-strain dynamic testing of piles: ASTM D 4945-16.
- 2. International Organization for Standardization. (2018). Geotechnical investigation and testing – Testing of geotechnical structures – Part 4: Testing of piles: dynamic load testing: ISO 22477-4:2018.
- 3. Allnamics. (2018). Manual "Allnamics-PDA/DLT. Monitoring and reporting. Pile driving analysis and dynamic load testing" (Software version: 3.6.44).
- Samorodov, O., Tabachnikov, S., & Gerasimovych, I. (2022). Ukrainian experience of comparing the test results of CFA piles by SLT and DLT method. Naukovyy visnyk budivnytstva (Scientific Bulletin of Civil Engineering), 2(108), 32-35. <u>https://doi.org/10.29295/2311-7257-2022-108-</u> <u>2-32-35</u>
- Middendorp, P. (2022). More than 80 years of experience with the method of characteristics from graphical analyses to advanced driveability analyses by scripts. 11th International Conference on Stress Wave Theory and Design and Testing Methods for Deep Foundations (SW2022), Rotterdam, The Netherlands. https://doi.org/10.5281/zenodo.7148669
- Middendorp, P., & Van Weele, A. (1986). Application of characteristic stress wave method in offshore practice. In Proceeding of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling (pp. 6-18), Nantes.
- 7. Phan Ta Le. (2013). Numerical and experimental studies on dynamic load testing of open-ended pipe piles and its applications (Dissertation for the degree of PhD). Graduate School of Natural

Science and Technology, Kanazawa University, Japan.

- 8. Allnamics. (2019). Manual "Stress wave theory". Allnamics Pile Testing Experts B.V.
- Troshchynskyi, B. O. (2021), Kompiuteryzovana systema diahnostyky zalizobetonnykh pal na osnovi akustychnykh metodiv [Computerized system for diagnostics of reinforced concrete piles based on acoustic methods]. *Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Kyiv. (in Ukrainian).
- 10.Allnamics. (2019). Manual "AllWave-DLT. Signal matching software. Allnamics Pile Testing Experts B.V.".
- 11.Osnovy ta fundamenty sporud [Bases and Foundations of Structures]:Amendment No. 1 to DBN B.2.1-10-2009. (2011). K.: Ministry of Regional Development of Ukraine. (in Ukrainian).
- 12. Sachs, L. (1972). Statistischen auswertungsmethoden. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York. (in German).
- 13.Samorodov, O. V. (2018). Rozvytok naukovykh osnov vyboru ratsionalnykh parametriv kombinovanykh palovykh i plytnykh fundamentiv bahatopoverkhovykh budivel. [Development of scientific bases for the selection of rational parameters of combined pile and slab foundations of multi-storey buildings]. Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. Dnipro. (in Ukrainian).
- 14.Samorodov O., & Tabachnikov S. (2025). Doslidzhennia nesuchoi zdatnosti piaty buroiniektsiinykh pal metodom vdavliuiuchoho udarnoho navantazhennia (Dynamic Load Testing (DLT) u mezhakh palovykh poliv fundamentiv VEU 6.1, 6.2, 6.3 na obiekti budivnytstva: «Nove budivnytstvo VES «Volyn» na terytorii Ivanychivskoi selyshchnoi rady». [Investigation of the bearing capacity of five CFA piles using Dynamic Load Testing (DLT) within the pile fields of the foundations of WTGs 6.1, 6.2, 6.3 at the construction site New Construction of Volyn WPP on the Territory of Ivanychi Village Council]. Scientific and Technical Report Pile Test Systems PE; Scientific Kharkiv. (in Ukrainian).
- Hrunty. Metody polovykh vyprobuvan paliamy [Soils. Methods of field tests by piles]: DSTU B V.2.1-1-95. (1997) K: Ukrarhbudinform. (in Ukrainian).

A Regression Model for Determining the Bearing Capacity of Drilled Piles Using the Dynamic Load Testing Method

Oleksandr SAMORODOV Sergii TABACHNIKOV Yevgen HERASYMOVYCH

Abstract. The paper considers the experience in implementing an innovative method of press-in impact loading (internationally known as Dynamic Load Test (DLT) in Ukraine when testing soils using full-scale piles, which is based on the principles of the wave theory of impact. The advantages and disadvantages of this test method for different types of piles are shown, and the issues that arise when testing soils using drilled piles, in particular CFA piles, are noted. The paper proposes for the first time the use of statistical methods to build a regression model that determines the bearing capacity of piles based on parallel soil tests by piles using the methods of static press-in loading (internationally known as Static Load Test, SLT) and impact (dynamic) press-in loading (DLT). The factors that significantly affect the mechanics of the interaction between the pile and the soil base when testing soils by piles using the DLT method were formulated and identified. Multiple linear regression models were developed to determine the ultimate resistance and bearing capacity from the elastic deformation of drilled piles based on the DLT results to predict the load-settlement relationship, which is essential for the design of pile foundations. Both correlation and regression analyses of the proposed models were performed; prospects for their improvement were suggested. At this stage of the development of correlation models, we have obtained sufficiently high statistical evaluation results, which indicate technically correct models with strong relationships between variables and high statistical significance. In 2024-2025, the proposed models were field-tested at a real construction site when testing piles using the DLT method, where the deviations of the determined values of F_e and F_u for CFA piles were within 5% of the values determined using the SLT method.

Keywords. Pile, CFA, drilled, testing, method, load, dynamic, impact, regression model, correlation, bearing capacity.