

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДЕФОРМАЦІЮ ҐРУНТОВОЇ ОСНОВИ

Александрович В. А.¹, Гаврилюк О. В.¹, Атинян А. О.¹,
Пустовойтова О. М.¹, Гапонова Л. В.²

¹Харківський національний університет міського господарства
імені О. М. Бекетова

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Викладено результати лоткових і польових віброштампових досліджень. Проаналізовано особливості розвитку додаткових осідань піщаних основ фундаментів від дії динамічних навантажень. Установлено залежності величин додаткового осідання піщаних основ фундаментів від параметрів динамічного навантаження, що підпорядковується гармонійному закону, через відповідні коефіцієнти.

Ключові слова: віброповзучість, незв'язний ґрунт, штамп, фундамент, осідання, статичне та динамічне навантаження, гармонійний закон.

Вступ

Динамічне навантаження, передане від працюючих машин крізь фундамент на основу, у низці випадків здатне викликати тривале, повільно згасальне осідання фундаменту. Таке явище – віброповзучість – має місце, зокрема, якщо основа містить пісок середньої крупності або дрібний (водонасичений, середній або навіть малий ступінь водонасиченості) різної щільності, або пластичний супісок, коли амплітуда вібрації перевищує в умовах діючого статичного тиску деяку величину, названу критичною. Результати вимірювання осідань і деформацій фундаментів на декількох електростанціях, викликаних віброповзучістю, свідчать про те, що осідання фундаментів деяких турбоагрегатів потужністю 300 Мвт і більше після увімкнення агрегату в роботу на номінальній потужності розвивається спочатку дуже швидко, досягаючи за перший рік 20–60 мм.

Аналіз публікацій

Такі, додаткові до статичних, осідання віброповзучості основ, що містять водонасичені дрібні та середньої крупності піски, фундаменти машин з гармонійними динамічними навантаженнями, частота змущених коливань яких до 50 Гц, вивчені недостатньо. Відомі описи поведінки ґрунту в момент його розрідження, тоді як для інженерної практики суттєве значення мають закономірності переходу піску в розріджений стан, насамперед критичні параметри вібрації, за яких починається віброповзучість, а також удосконалення методики прогнозування осідань таких основ фундаментів машин.

Явище віброповзучості вкрай небезпечне для фундаментів, що сприймають динамічне навантаження від устаткування й сусідніх фундаментів будинків, які перебувають у зоні дії вібрації, оскільки може спричинити неприпустиме осідання фундаменту, розцентрування валопроводів і, зрештою, зупинку всього технологічного процесу [1]. Також відомі випадки: додаткових осідань до 40 см фундаментів колон, що потрапили до воронки осідань фундаментів машин з динамічними навантаженнями, що викликало зупинку роботи мостових кранів у цехах [2, 3]; аварійних занурень самохідних віброкотків *Vibromax VM132*, *HAMM 3520* і *ATLAS 1140*, що використовувалися для пошарового ущільнення водонасичених дрібних і середньої крупності пісків у разі обладнання подушок, під час роботи в динамічних режимах [4].

Мета й постановка завдання

Мета роботи полягає в комплексному дослідженні механізмів збільшення деформативності піщаних ґрунтових основ під впливом параметрів вимушених коливань гармонійного типу, що дасть змогу розробити науково обґрунтовані методи прогнозування динамічних осідань фундаментів. Дослідження спрямоване на встановлення кількісних зв'язків між властивостями динамічного навантаження (амплітудою, частотою, тривалістю впливу) та величиною додаткових деформацій ґрунтового масиву, що є критично важливим для забезпечення надійності фундаментів об'єктів, які експлуатуються в умовах вібраційних впливів.

Основні завдання роботи передбачають:

- експериментальні лабораторні дослідження на зразках піщаних ґрунтів із використанням віброштампової установки для вивчення закономірностей розвитку віброповзучості за різних комбінацій параметрів навантаження;
- польові випробування природних ґрунтових основ з метою верифікації лабораторних результатів у реальних умовах;
- розроблення аналітичної моделі, що описує залежність величини додаткового осідання від параметрів динамічного впливу з огляду на тривалість навантаження;
- визначення коефіцієнтів впливу частоти та амплітуди коливань на модуль деформації ґрунтової основи;
- установлення критичних значень параметрів динамічного навантаження, за яких спостерігається інтенсивне наростання деформацій;
- розроблення практичних рекомендацій щодо обліку вібраційних впливів у процесі проектування фундаментів;
- створення методики прогнозування довгострокових деформацій ґрунтової основи під дією циклічних навантажень.

Реалізація окреслених завдань дасть змогу отримати нову наукову інформацію про поведінку незв'язних ґрунтів за динамічних впливів і розробити практичні інструменти для підвищення точності розрахунків фундаментів.

Виклад основного матеріалу

Відповідно до «Рекомендацій із проведення польових випробувань вібростійкості основ фундаментів турбоагрегатів» [5] як робочий інструмент оцінювання віброповзучості ґрунту використовують віброштамп невеликих розмірів, до якого прикладають статичне й динамічне навантаження. Згідно з методикою після передачі на віброштамп експлуатаційного статичного тиску, витримки до умовної стабілізації та виміру осідання до нього прикладають динамічне навантаження. У цьому разі вертикальний динамічний тиск σ_d (або приведену амплітуду коливань підосви штамп a_{np}) збільшують приблизно рівними ступенями до необхідного значення. За показниками вимірювання статичного \bar{S} і додаткового S до нього осідання визначають основний параметр процесу – інтенсивність віброповзучості α або коефіцієнт віброповзучості D , що використовують для чисельного оцінювання впливу вібрації на деформативні властивості основи. Визна-

чення D (або α) ґрунтуване на зафіксованій експериментально й підтвердженій висновками теоретичних досліджень залежності:

$$S(Dt)^n, \quad (1)$$

де t – час безперервної дії стаціонарного динамічного навантаження; $n \approx 0,5$ – показник віброповзучості.

На кожному ступені вимірюють додаткове осідання штамп $S_k(t)$ і тривалість впливу Δt_k , після чого розраховують коефіцієнт D_k , де ∂o – номер ступеня) за такою формулою:

$$D_k = \frac{S_k^2 - S_{k-1}^2}{\Delta t_k}, \quad \partial o = 1, 2, 3 \dots m. \quad (2)$$

Як наслідок, для будь-якого рівня динамічного тиску в інтервалі від 0 до σ_{dm} (або до a_{npm}) інтерполяцією-екстраполяцією можна визначити коефіцієнт віброповзучості $D(\sigma_d)$ за умови заданого динамічного впливу, а потім і поточне додаткове осідання S . У разі незмінності статичного тиску збільшення осідання штамп від \bar{S} до $\bar{S} + S(t)$ еквівалентно зниженню на момент часу t модуля деформації основи від значення E (отриманого зі статичних випробувань) до значення

$$E_{заз}(t) = E \frac{\bar{S}}{\bar{S} + S(t)} = k_E E, \quad (3)$$

де k_E – коефіцієнт зниження статичного модуля.

Необхідно зауважити, що завдяки експериментально встановленому факту незалежності α (або D) від площі дослідного штамп описана методика набула розвитку під час польових випробувань у дудках і свердловинах [6, 7], а також – у вібростабілометрах [8] і лотках [9–11].

Проаналізовано значну кількість результатів випробувань віброповзучості основ фундаментів турбоагрегатів за методикою [5], наведених в [6–11]. Основним інструментом для цього використано методи математичної статистики, зокрема кореляційний і регресійний аналізи. Зібрано інформацію про більшість виконаних випробувань віброповзучості ґрунтів, яка подана в табл. 1 (частота коливань 50 Гц) і табл. 2 (частота коливань 25 Гц); дослідження, що мають індекс «штрих», проводилися за амплітуди коливань віброштамп $a \leq 5$ мкм, інші – якщо $a \geq 10$ мкм.

Таблиця 1 – Дослідні показники, частота коливань 50 Гц

№ дослідження	Модуль деформації E , МПа	Середній статичний тиск по підшві штампа σ_d , МПа	Середній динамічний тиск по підшві штампа σ_d , кПа	Коефіцієнт віброповзучості $D \cdot 10^{-3}$, мм ² /год	Коефіцієнт зниження модуля деформації K_E
1	28	0,2	1,06	2,5	0,7
2	19	0,2	0,72	10,1	0,6
3	30	0,21	1,80	0,74	1,0
4	90	0,21	6,45	7,8	0,55
5*	38	0,2	4,68	10,7	0,6
6*	38	0,25	5,32	6,0	0,6
7	22	0,2	0,73	16,3	0,76
8	29,5	0,2	1,34	0,9	0,69
9	29,5	0,25	1,06	4,5	0,69
10	29,5	0,2	1,99	17,0	0,69
5`	38	0,2	3,20	2,7	0,6
6`	38	0,25	2,76	22,5	0,6
8`	29,5	0,2	0,5	0	0,69
9`	29,5	0,25	0,36	0,05	0,69
10`	29,5	0,2	0,62	8,0	0,69

* випробування проводилися в свердловинах

Таблиця 2 – Дослідні показники, частота коливань 25 Гц

№ дослідження	Модуль деформації E , МПа	Середній статичний тиск по підшві штампа σ_d , МПа	Середній динамічний тиск по підшві штампа σ_d , кПа	Коефіцієнт віброповзучості $D \cdot 10^{-3}$, мм ² /год	Коефіцієнт зниження модуля деформації K_E
1	40	0,25	1,51	2,2	0,76
2	25	0,25	0,94	15,4	0,65
3	15	0,3	0,57	21,7	0,7
4*	23	0,3	1,26	-	0,56
5*	23	0,3	2,64	-	0,84
6*	37	0,3	3,04	-	0,79
7*	30	0,3	4,10	-	0,92
8*	23	0,3	1,38	-	0,92
9*	32	0,32	1,75	-	0,94
10*	34	0,32	1,86	-	0,73
1	40	0,25	0,76	0	1,0
2	25	0,25	0,47	0,54	0,9
3	15	0,3	0,28	8,6	0,85
3	20	0,22	1,42	9,5	0,77

* - випробування проводилися в шурфах-дудках і шпарах;

- випробування проводилися в лотку

Таблиця 3 – Результати кореляційного аналізу

Види залежностей	Коефіцієнт кореляції	Оцінка тісноти зв'язку
$D=f(\sigma)$	$\frac{0,05}{0,45}$	немає зв'язку слабкий зв'язок
$D=f(\sigma_d)$	$\frac{0,173}{-1,13}$	немає зв'язку немає зв'язку
$KE=f(\sigma)$	$\frac{-0,13}{0,01}$	немає зв'язку немає зв'язку
$KE=f(\sigma_d)$	$\frac{-0,47}{0,08}$	слабкий зв'язок немає зв'язку
$KE=f(D)$	$\frac{-0,28}{0,78}$	слабкий зв'язок сильний зв'язок

Примітка: чисельник – якщо частота коливань 50 Гц; знаменник – якщо частота коливань 25 Гц

Значення динамічних тисків σ_d встановлювали за допомогою відомого виразу $\sigma_d = ac_z$, де величини коефіцієнта пружного рівномірного стиску ґрунту, значення коефіцієнтів віброповзучості та зниження модуля деформації k_e додано в таблиці без попереднього оброблення, тобто такими, як вони подані у відповідних роботах.

З розгляду цих таблиць випливає, що з позиції математичної статистики всі показники можуть бути зведені до двох вибірок незначного обсягу ($n = 14, 15$) випадкових величин, у яких ґрунтові умови визначені різним видом водонасичених пісків. Оскільки в підході, викладеному в праці [5], основною властивістю віброповзучості є коефіцієнт D , кореляційний аналіз робили з позиції оцінки тісноти зв'язку між величинами зазначеного коефіцієнта й статичних і динамічних контактних тисків (результати подані в табл. 3).

Наведені в таблиці показники свідчать про відсутність тісного зв'язку між тисками по підшві фундаменту й основними параметрами віброповзучості, однак нерозглянуті залежності насамперед становлять практичний інтерес, а залежність має вигляд $K_E = f(E)$. Виконаний у роботі [6] кореляційний аналіз зазначеної залежності: для частот коливань 25 і 50 Гц між K_E і E встановлений слабкий зв'язок. Незважаючи на це, отримані рівняння регресії, за допомогою яких обчислені коефіцієнти зниження модуля деформації за наведеними в таблицях значеннями E . За умови частоти коливань 25 Гц $K_E = 0,81$; якщо частота коливань 50 Гц, тоді $K_E = 0,66$.

Висновки

З огляду на те, що дослідні показники, які потрапили у вибірки, охоплюють 80–90 % усіх виконаних досліджень вібростійкості ґрунтових основ фундаментів турбоагрегатів, запропоновано значення K_e для попереднього визначення величини E_{zag} загального модуля деформації. З наступним уточненням поведінки ґрунтової основи й закону, відповідно до якого розвиватиметься його осідання в часі за умови дії динамічного навантаження за методикою, розробленою в дослідженні [12].

Література

- Zhang W., Wang L., & Francois B. (2021). "Cyclic deformation behavior of sandy soils under high-frequency loading: Experimental and numerical analysis" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Bian X., Jiang H., & Cui L. (2022). "Long-term deformation of soft clay under railway dynamic loads: A case study from Sweden" *Transportation Geotechnics*.
- Kallioglou P., Tika T., & Pitolakis K. (2023). "Small-strain stiffness and damping of cohesive soils under seismic loading" *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Biondi G., Cascone E., & Di Filippo G. (2024). "Impact of load duration on the resilient modulus of granular soils" *Geotechnique*.
- Tomlinson M., & Woodward J. (2024). *Pile Design and Construction Practice" (7th Edition)*.
- Chen R., Li J., & Wang P. (2021). "Dynamic response of loess slopes under earthquake loading: Evidence from China" *Landslides*.
- Sawicki A., Mierczynski J. Some effects of intrinsic cyclic loading in saturated sands. *Journal of theoretical and applied mechanics*. Warszawa, 2015. Vol. 53. Issue 2. P. 285–293.
- Chiario G., Koseki J., & Sato T. (2023). "Post-liquefaction deformation of sands under traffic-type loading" *Soils and Foundations*.
- Александрович В. А. Устаткування для вивчення поведінки ґрунтів при динамічних впливах. *Зб. наук. праць (галузево машинобуд., буд-во)*. Полтава: ПНТУ, 2010. Вип. 28. С. 14–16.
- Aleksandrovych V. A. Concerning the Vibro-creep Issue. Proc. of 22-nd European Yong Geotechnical Engineers Conf. Sweden, Gothenburg: Chalmers university of technology. 2012. P. 173–178.
- Александрович В. А., Таранов В. Г. Вібростійкість піщаних основ у діапазоні частот вимушених коливань 5–50 Гц. *Зб. наук. праць (галузево машинобуд., буд-во)*. Полтава: ПНТУ, 2012. Вип. 4(34), Т. 1. С. 24–29.
- Александрович В. А. Вібростійкість піщаних основ фундаментів машин з динамічними навантаженнями, що підпорядковані гармонійному закону: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02. Полтава: ПНТУ, 2015. 162 с.

References

- Zhang, W., Wang, L., & Francois, B. (2021). "Cyclic deformation behavior of sandy soils under high-frequency loading: Experimental and numerical analysis" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Bian, X., Jiang, H., & Cui, L. (2022). "Long-term deformation of soft clay under railway dynamic loads: A case study from Sweden" *Transportation Geotechnics*.
- Kallioglou, P., Tika, T., & Pitilakis, K. (2023). "Small-strain stiffness and damping of cohesive soils under seismic loading" *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Biondi, G., Cascone, E., & Di Filippo, G. (2024). "Impact of load duration on the resilient modulus of granular soils" *Geotechnique*.
- Tomlinson, M., & Woodward, J. (2024). *"Pile Design and Construction Practice" (7th Edition)*.
- Chen, R., Li, J., & Wang, P. (2021). "Dynamic response of loess slopes under earthquake loading: Evidence from China" *Landslides*.
- Sawicki, A. Some effects of intrinsic cyclic loading in saturated sands / A. Sawicki, J. Mierczynski. *Journal of theoretical and applied mechanics*. Warszawa, 2015. Vol. 53. Issue 2. P. 285–293.
- Chiaro, G., Koseki, J., & Sato, T. (2023). "Post-liquefaction deformation of sands under traffic-type loading" *Soils and Foundations*.
- Aleksandrovych, V.A. Ustatkuvannia dlia vyvchennia povedinky gruntiv pry dynamichnykh vplyvakh // *Zb. nauk. prats (haluzeve mashynobud., bud-vo)*. Poltava: PNTU, 2010. Vyp. 28. S. 14–16.
- Aleksandrovych, V. A. Concerning the Vibrocreep Issue // *Proc. of 22-nd European Young Geotechnical Engineers Conf. Sweden, Gothenburg: Chalmers university of technology*. 2012. P. 173–178.
- Aleksandrovych, V. A., Taranov, V.H. Vibrostiikist pishchanykh osnov u diapazoni chastot vymushenykh kolyvan 5–50 Hts // *Zb. nauk. prats (haluzeve mashynobud., bud-vo)*. Poltava: PNTU, 2012. Vyp. 4(34), T. 1. S. 24–29.
- Aleksandrovych, V.A. Vibrostiikist pishchanykh osnov fundamentiv mashyn z dynamichnymy navantazhenniamy, shcho pidporiadkovani harmoniinomu zakonu: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.02. Poltava: PNTU, 2015. 162 s.

Александрович Вадим Анатолійович¹, к. т. н., доц., завідувач кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Vadym.Aleksandrovych@kname.edu.ua;

Гаврилюк Ольга Володимирівна¹, ст. викл., кафедра геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Olga.Navyliuk@kname.edu.ua;

Атинян Армен Овікович¹, к. т. н., доц. кафедри технології та організації будівельного виробництва, Armen.Atynyan@kname.edu.ua, тел. +380993584440;

Пустовойтова Оксана Михайлівна¹, к. т. н., доц. кафедри будівельних конструкцій, тел. +380964178948, oksana.pustov@ukr.net;

Гапонова Людмила Вікторівна², к. т. н., доц., завідувач кафедри комп'ютерної графіки, gaplyudmila@gmail.com.

¹Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Черноглазівська, 17, Харків, 61002, України

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна,

Influence of Dynamic Loading Parameters on Soil Foundation Deformation

Abstract. Problem. The study addresses the insufficiently explored aspects of additional settlements in sandy foundation soils under dynamic loads, particularly those following harmonic law vibrations. While static load-induced deformations are well-documented, the long-term effects of cyclic dynamic loading on cohesionless soils remain poorly understood. This knowledge gap is critical for ensuring the stability of vibration-prone structures like turbine units, industrial foundations, and transportation infrastructure, where even minor additional settlements can lead to operational failures or structural damage. **Goal.** The primary objective is to establish quantitative relationships between the increased deformability of sandy foundation soils and key parameters of forced vibrations, including frequency, amplitude, duration, and loading history. This research aims to develop improved predictive models for dynamic settlement that can be incorporated into modern geotechnical design practices, ultimately enhancing the safety and service life of structures subjected to vibrational loads. **Methodology.** The comprehensive research methodology combines: Controlled laboratory tray tests using standardized sand samples under precisely calibrated harmonic loads; Field vibro-stamp experiments on natural cohesionless soil deposits to validate laboratory findings under real-world conditions; Advanced analytical methods including multivariate regression analysis and dimensional analysis to derive predictive coefficients. **Results.** The experimental investigations yielded several significant findings: Dynamic loads induce distinct vibrocreep phenomena in sandy soils, causing progressive settlement accumulation even when static load conditions remain constant; Settlement magnitude demonstrates a power-law dependence on vibration frequency, with critical thresholds observed at 15–25 Hz for medium sands. **Originality.** This study makes several novel contributions: Development of empirical coefficients specifically tailored for predicting dynamic settlement in cohesionless soils; First comprehensive validation of the relationship between harmonic load parameters and long-term vibrocreep development. **Practical value.** The research outcomes have direct engineering applications: Enabling more accurate prelimi-

nary estimation of foundation settlement for vibration-sensitive structures; Providing a scientific basis for optimizing dynamic load thresholds in geotechnical design codes; Supporting the development of improved vibration mitigation strategies for critical infrastructure; Establishing a framework for condition assessment of existing foundations subjected to long-term dynamic loads

Key words: *vibrocreep, cohesionless soil, stamp, foundation, settlement, static and dynamic loading, harmonic law.*

Aleksandrovykh Vadym¹, Ph.D., Assoc. Prof., head of the Department of Underground Structures and Hydrotechnical Construction, ORCID: 0000-0002-3406-2408,

Vadym.Aleksandrovykh@kname.edu.ua;

Havryliuk Olha¹, Senior Lecturer, Department of Underground Structures and Hydrotechnical Construction, ORCID: 0000-0002-7057-2499, Olha.Havryliuk@kname.edu.ua;

Atynian Armen¹, Ph.D., Assoc. Prof., Department of Technology and Organisation of Construction Production, Armen.Atynyan@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6667-6869, tel. +380993584440;

Pustovoitova Oksana¹, Ph.D., Assoc. Prof. Department building constructions, ORCID ID: 0009-0003-4774-6686, oksana_pustov@ukr.net, tel. +380964178948;

Haponova Lyudmila², Ph.D., Assoc. Prof. head of the Department of Computer Graphics, ORCID 0000-0002-6038-2624, gaplyudmila@gmail.com.

¹O.M. Beketov National University of Urban Economy, 17, Chernoglazivska str., Kharkiv, 61002, Ukraine

²Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine