

## **МОДЕЛЮВАННЯ НДС ОСНОВИ БУРОІН'ЄКЦІЙНОЇ ПАЛІ, НЕЗ'ЄДНАНОЇ З РОСТВЕРКОМ, ПРИ ПОВТОРНИХ СТАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

Сєдін В.Л., Бікус К.М., Ковба В.В., Волнянський Ю.Ю.

ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури"  
м. Дніпро, Україна

**АНОТАЦІЯ.** У статті наведено результати натурних випробувань бурюін'єкційної палі в умовах зростаючої поверховості будівлі та порівняння з ними результатів числового моделювання напружено-деформованого стану багатопшарової ґрунтової основи при повторному статичному навантаженні у ПК Plaxis 3D.

**АННОТАЦИЯ.** В статье приведены результаты натурных испытаний бурюин'єкционных свай в условиях возрастающей этажности здания и сравнение с ними результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния многослойного грунтового основания при повторном статическом нагружении в ПК Plaxis 3D.

**ABSTRACT.** The results of field tests of CFA piles in conditions of increasing number of storeys of the building have been introduced and have been compared with the results of numerical modeling of stress-strain state of multilayered soils at repeated static loading in computer program Plaxis 3D.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** бурюін'єкційна паля, натурні випробування палі, повторні статичні навантаження палі, числове моделювання

### **ВСТУП**

За сучасних умов геотехнічного будівництва, на перший план виходить проблема розробки ресурсозберігаючих методів проектування та ефективного застосування пальових фундаментів, за умови забезпечення рівня надійності будівель і споруд протягом всього строку експлуатації, а головним завданням геотехніків є використання максимального потенціалу ґрунтової основи для передачі на неї максимально допустимих

навантажень, а також зменшення різниці осідань у межах однієї будівлі. Сьогодні вирішення поставлених завдань безпосередньо залежить від достовірності числового моделювання натурних випробувань у програмних комплексах, таких як ABAQUS, ANSYS, PLAXIS, SOFISTIK, FEM-models та ін., бо лише за умови задовільної збіжності результатів з даними випробувань можна говорити про адекватність ґрунтової моделі, її характеристик інтерпретованих для програми та можливість їх застосування для подальшого проектування з надземними конструкціями.

## ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ

Значний досвід у вирішенні цих питань висвітлено у роботах В. М. Улицького [5], З. Г. Тер-Мартиросяна [6]. Серед вітчизняних вчених привертають увагу роботи І. П. Бойка [1], Ю.Л. Винникова [2] та О.В. Самородова [3]. За результатами аналізу з'ясовано, що формування резервів несучої здатності пальових фундаментів закладено в самій ідеї їх роботи, зокрема складових, які задіюються до роботи при різних величинах осідання. Враховуючи те, що будівля зазвичай зумовлює якусь одну величину осідання, ця система не може бути мобілізована одночасно, це означає те, що щось обов'язково недораховується, це підтверджує і моніторинг напружено-деформованого стану пальових фундаментів зведених будівель. Формування резервів несучої здатності починається з недосконалості інженерно-геологічних вишукувань [8] і супроводжує весь процес проектування і будівництва.

**Завдання роботи.** В зв'язку з цим, виникає необхідність дослідити зміну осідань палей в умовах зростаючої поверховості будівлі, виконати числове моделювання НДС багатопалової основи буроін'єкційної палі великого діаметру, нез'єднаної з плитним ростверком, при повторному статичному навантаженні за допомогою програмного комплексу Plaxis 3D та порівняти результати з даними натурних випробувань.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для експериментального дослідження осідань буроін'єкційної палі, нез'єднаної з плитним ростверком, були проведені комплексні натурні випробування статичним осьовим вдавлювальним навантаженням в попередньо замочених ґрунтах дослідної палі (з числа робочих палей фундаменту) довжиною 14,0 м з діаметром стовбура 520 мм, після тривалого "відпочинку" без навантаження (терміном більше 150 та 600 діб), в умовах зростаючої поверховості будівлі. Фізико-механічні показники ґрунтів майданчику, геометричні показники пальового фундаменту, технологія

виготовлення палі та конструкція анкерного стелю детално описано і наведено у [4].

До початку та після випробувань статичним проводився контроль за довжиною палі та суцільністю стовбура неруйнівним методом – ехолокацією. Дослідження проводились у два етапи. Перший етап випробувань проведено у липні 2014 року після зведення трьох поверхів каркаса будівлі (рис. 1, а, б) [4]. Другий етап – у березні 2016 року після зведення 18-24 поверхів каркаса будівлі (рис. 1, в, г).

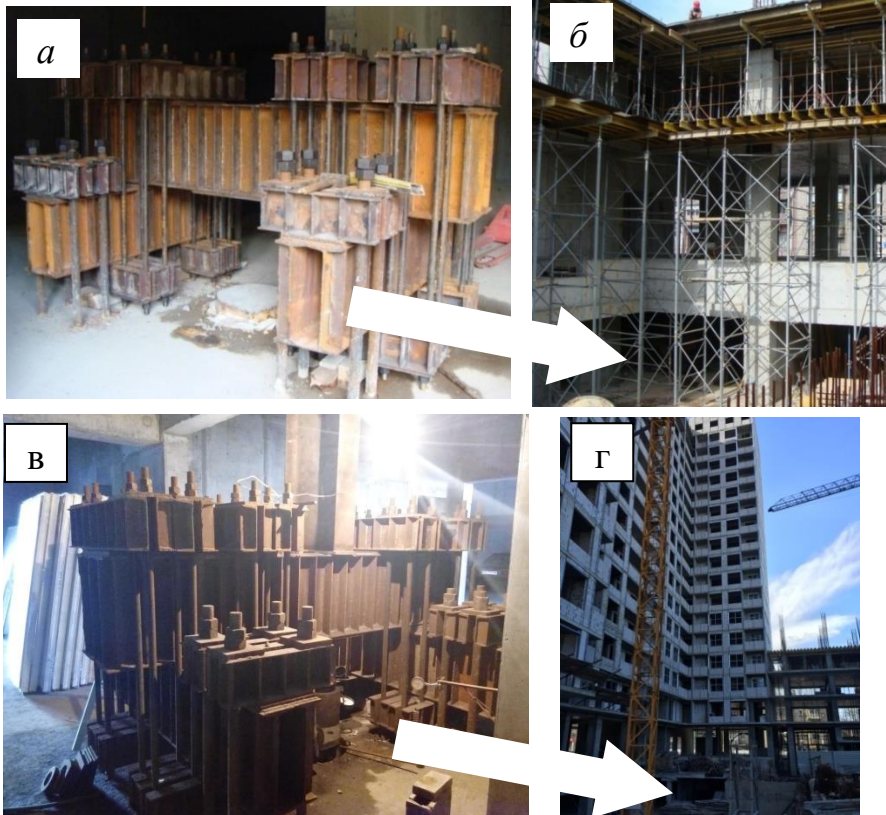


Рис. 1.1. Місце проведення випробування палі (I та II етапи):  
а, в – анкерний стелю, б – загальний вигляд зведених поверхів будівлі.

Під час випробувань навантаження передавалось поступово, кроками, в умовах навантаження на палю у складі фундаменту під час будівництва [4]. Повторне випробування палі здійснювалось статичним навантаженням ступенями по: 400 кН (перші три ступені); 200 кН

(наступні 6); 100 кН (подальше навантаження). Устаткування для фіксації деформацій та методика проведення випробувань детально описані у [4].

Передбачаючи те, що під час другого циклу навантаження на палю можна передати більше навантаження, між анкерним стендом і ребром жорсткості будівлі був встановлений металічний елемент (двотавр) для виключення руйнування конструкцій стенду і передачі частини навантаження на несучу конструкцію будівлі (рис. 1, в).

За результатами моніторингу і геодезичних спостережень зафіксовано максимальне осідання будівлі 15,45 мм, що складає 10,3 % від максимально допустимого осідання за ДБН В.2.1-10-2009, яке свідчить про завищені при проектуванні коефіцієнти запасу.

## ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Числове розв'язання поставленої задачі вирішувалось з використанням МСЕ у ПК Plaxis 3D, у нелінійної постановці, із застосуванням пружно-пластичної моделі роботи зі зміцненням ґрунту (Hardening Soil Model) [6, 7]. У розрахункову область включено масив ґрунту, складений з п'яти ПЕ, дослідна паля довжиною 14 м і навантаження, що відповідало зведеним поверхам будівлі (на момент випробування). Процес випробування моделюються поетапно. Результати кожного етапу становились початковими умовами для наступного. ПК Plaxis 3D враховує етапність зведення конструкції, що дозволяє точно моделювати різні режими навантаження. Показники фізико-механічних властивостей ґрунтів для моделювання у ПК Plaxis 3D наведено у табл. 1. Характеристики матеріалу палі: питома вага  $\gamma = \text{кН/м}^3$ , модуль Юнга  $E_1 = 3 \times 10^7 \text{ кН/м}^2$ , коеф. Пуассона  $\nu = 0,2$ .

Поетапне навантаження палі моделювалось збільшенням прикладеного зосередженого навантаження до верхньої точки палі згідно з натурними випробуваннями на кожному ступені (як при натурних випробуваннях). Розрахунок вівся до вичерпання несучої здатності палі, яке відбулось під час першого циклу навантаження при  $P_{\max} = 3\ 200 \text{ кН}$ , під час другого циклу навантаження при  $P_{\max} = 3\ 800 \text{ кН}$ .

Коректність числового моделювання оцінювалась шляхом співставлення результатів з даними натурних випробувань, на рис. 2 представлено їх графічне порівняння. Основними параметрами для оцінювання розрахунку є навантаження  $P$  і осідання  $S$ . З аналізу графіку (рис. 2) видно, що при навантаженні 3 200 кН результати моделювання та натурних статичних випробувань по I циклу навантаження демонструють задовільну збіжність, різниця осідань при навантаженні 43,23 мм і 41,55 мм (при натурних випробуваннях) не перевищує 5%. Після

розвантаження палі, яке відбувалось ступенями по 200 кН, відбувся її підйом при моделюванні на 16,67 мм, при натурних – на 9,15 мм.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості ґрунтів у ПК Plaxis 3D

Параметр	Позначення	Інженерно-геологічний елемент (ІГЕ)					Од. вим.
		ІГЕ-4	ІГЕ-5	ІГЕ-6	ІГЕ-7	ІГЕ-8	
Тип поведінки матеріалу	<i>Type</i>	Дренований (Drained)					
Питома вага ґрунту вище РГВ	$\gamma_{un\ sat}$	17,1	19,24	19,2	19,64	20,24	кН/м <sup>3</sup>
Питома вага ґрунту нижче РГВ	$\gamma_{sat}$	18,8	19,3	19,2	19,7	20,3	кН/м <sup>3</sup>
Січний модуль деформації при 50% руйнуючого девіаторного напруження	$E_{50}^{ref}$	3600	7200	5400	6300	21600	кН/м <sup>2</sup>
Дотичний модуль деформації при компресійних випробуваннях	$E_{oed}^{ref}$	7200	14400	10800	12600	21600	кН/м <sup>2</sup>
Модуль деформації при розвантаженні / повторному навантаженні	$E_{ur}^{ref}$	18000	36000	27000	31500	64800	кН/м <sup>2</sup>
Ступінь жорсткості, для гіперболічної залежності від напружень	<i>m</i>	0,8	0,6	0,8	0,6	0,55	-
Зчеплення	$c_{ref}$	12	9	12	10	5	кН/м <sup>2</sup>
Кут внутр. тертя	$\phi$	25	24	23	24	31	°
Кут дилатансії	$\psi$	0	0	0	0	1	°
Коеф. Пуассона при повторному навантаженні	$\nu_{ur}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	-
Коеф. бічного тиску	$K_0$	0,563	0,594	0,8	0,6	0,55	-

За результатами моделювання по II циклу результати навантаження при 3 200 кН виявилися 21,57 мм, а від максимального навантаження  $P_{max}=3\ 800$  кН, результати в порівнянні з натурними виявилися завищеними 45,09 мм, що перевищує значення, отримане за даними натурних випробувань (40,32 мм) до 11 % від загального осідання. Після розвантаження палі, відбувся її підйом при моделюванні на 16,49 мм, при натурних випробуваннях – на 10,54 мм.

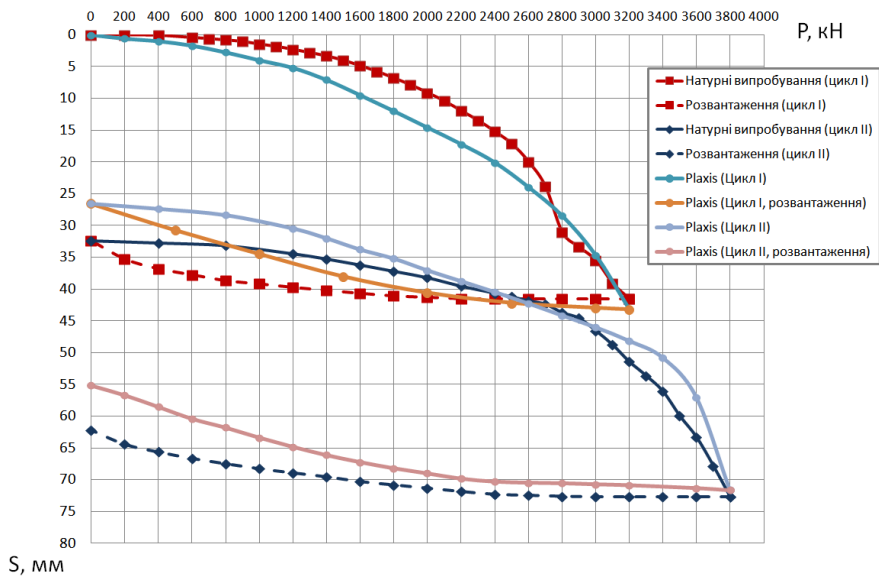


Рис. 2 Графік «навантаження – осідання» бурюін'єкційної палі

## ВИСНОВКИ

При I циклі максимально проявляються пластичні деформації. При II циклі залежність осідань демонструє практично лінійну залежність до певного показника, при навантаженні що відповідає  $P_{\max}$  при I циклі. Повторне статичне навантаження палі зафіксувало збільшення максимального навантаження на палю на 16 % і зменшення її осідання при цьому на 55 % при навантаженні 3 200 кН.

Виконане числове моделювання демонструє задовільну збіжність результатів з даними натурних випробувань (до 11 %), що свідчить про адекватно підібрати параметри ґрунтової моделі. Таким чином, числове моделювання сьогодні є надсучасним інструментом у ресурсозберігаючому проектуванні, оскільки серія тестових розрахунків, що мають допустиму збіжність з натурними випробуваннями палей, дозволяють ідентифікувати параметри пружно-пластичної ґрунтової моделі для потреб подальшого моделювання з надземними конструкціями будівлі.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко І. П. Числове моделювання напружено-деформованого стану фундаменту різнорівневого висотного комплексу в м. Києві / І.П. Бойко,

- В.С. Носенко // Основи і фундаменти : міжвідом. наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. – Київ, 2015. – Вип. 37. – С. 3-14.
2. Винников Ю.Л. Математичне моделювання взаємодії фундаментів з ущільненими основами при зведенні та наступній роботі: Монографія / Ю.Л. Винников. – Полтава: ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, 2016. – 280 с.
  3. Самородов А.В. Новая конструкция плитно-свайного фундамента / Самородов А.В. // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ, 2016. – №1 – С. 58-65.
  4. Сєдін В. Л. Вплив вдавлювального навантаження на деформативність основ буройн'єкційних паль / В. Л. Сєдін, К. М. Бікус, А. М. Мельник // Основи і фундаменти : міжвідом. наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. – Київ, 2014. – Вип. 35. – С. 9-20.
  5. Улицкий В.М. Гид по геотехнике (путеводитель по основаниям, фундаментам и подземным сооружениям) / В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин. – СПб.: ПИ "Геореконструкция", 2012. – 288 с.
  6. Тер-Мартиросян З. Г. Напряженно-деформированное состояние нелинейно деформируемого грунтового массива вмещающего длинную сваю / З. Г. Тер-Мартиросян, А. З. Тер-Мартиросян, Е. С. Соболев // Достижения, проблемы и перспективные направления развития для теории и практики механики грунтов и фундаментостроения : материалы XIII Междунар. симпозиума по реологии грунтов / Казан. гос. архит.-строит. ун-т. – Казань, 2012. – С. 48-52.
  7. Руководство пользователя PLAXIS 3D Foundation. Версия 2 : пер. с англ. / R.V.J. Brinkgreve, W.M. Swolf [и др.]. – Санкт-Петербург: НИП-Информатика, 2007
  8. Clayton C.R.I. Stiffness at small strain: research and practice / Clayton C.R.I. // Geotechnique, 61, No.1, 2011. – PP. 5-57.

## REFERENCES

1. Bojko I.P. Chislove modelyuvannya napruzhenno-deformovanogo stanu fundamentu riznorivnєvogo visotnogo kompleksu v m. Kievi [Numerical modeling of stress-strain state of the foundation multilevel high-rise complex in Kiev] / I.P. Bojko, V.S. Nosenko // Osnovi i fundamenti : mizhvidom. nauk.-tehn. zb. / Kiiv. nac. un-t bud-va i arhit. - Kiiv, 2015. - Vip. 37. - P. 3-14.
2. Vinnikov Yu.L. Matematichne modelyuvannya vzaemodii fundamentiv z ushil'nenimi osnovami pri zvedenni ta nastupnij roboti: Monografiya / Yu.L. Vinnikov - Poltava: PoltNTU im. Yuriya Kondratyuka, 2016. - 280 s.
3. Samorodov A.V. Novaya konstrukciya plitno-svajnogo fundamenta / Samorodov A.V. // Visnik Pridniprovs'koї derzhavnoї akademii budivnictva ta arhitekturi. - Dnipropetrovs'k, 2016. - №1 - S. 58-65.
4. Sedin V. L. Vpliv vdavlyuval'nogo navantazhennya na deformativnist' osnov buroyn'ekcijnih pal' [Influence of pressed in load on deformability of cfa-piles' foundations] / V.L. Sedin, K.M. Bikus, A.M. Mel'nik // Osnovi i fundamenti :

mizhvidom. nauk.-tehn. zb. / Kiïv. nac. un-t bud-va i arhit. - Kiïv, 2014. - Vip. 35. - P. 9-20.

5. Ulickij, V.M. *Gid po geotekhnike (putevoditel' po osnovaniyam, fundamentam i podzemnym sooruzheniyam)* / V.M. Ulickij, A.G. Shashkin, K.G. Shashkin. - SPb.: PI "Georekonstrukciya", 2012. - 288 s.
6. Ter-Martirosyan Z.G. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie nelinejno deformiruemogo gruntovogo massiva vmeschayuschego dlinnuyu svayu* / Z.G. Ter-Martirosyan, A.Z. Ter-Martirosyan, E.S. Sobolev // *Dostizheniya, problemy i perspektivnye napravleniya razvitiya dlya teorii i praktiki mehaniki gruntov i fundamentostroeniya : materialy XIII Mezhdunar. simpoziuma po reologii gruntov* / Kazan. gos. arhit.-stroit. un-t. - Kazan', 2012. - S. 48-52.
7. *Rukovodstvo pol'zovatelya PLAXIS 3D Foundation. Versiya 2 : per. s angl.* / R.B.J. Brinkgreve, W.M. Swolf [i dr.]. - Sankt-Peterburg: NIP-Informatika, 2007.
8. Clayton S.R.I. *Stiffness at small strain: research and practice* / Clayton C.R.I. // *Geotechnique*, 61, No.1, 2011. - RR. 5-57.

Стаття надійшла до редакції 12.09.2016 р.