

УДК 624.154/155:624.138.2

**ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ
«ОСНОВА – ВІБРОАРМОВАНА ГРУНТОЦЕМЕНТНА ПАЛЯ»**

Кандидати техн. наук А. В. Гасенко (ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка),
О. П. Новицький (ДП ПАТ «СУМБУД»),
В. Н. Рожко (ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка)

**ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ
«ОСНОВА – ВИБРОАРМИРОВАННАЯ ГРУНТОЦЕМЕНТНАЯ СВАЯ»**

Кандидаты техн. наук А. В. Гасенко (ПолтНТУ им. Ю. Кондратюка),
А. П. Новицкий (ДП ПАТ «СУМБУД»),
В. Н. Рожко (ПолтНТУ им. Ю. Кондратюка)

**FEATURES OF CREATION FINITE-ELEMENT MODEL OF THE SYSTEM "BASIS –
VIBROREINFORCED SOIL-CEMENT PILE"**

PhD. tehn. A. V. Hasenko, PhD. tehn. O. P. Novitskiy, PhD. tehn. V. N. Rozhko

Розглянуто порядок створення моделі віброармованих ґрунтоцементних паль для скінченно-елементного аналізу. Паля в основі (ґрунті) перебуває в об'ємних гранично-навантажених умовах. Серед особливостей створення такої моделі описано порядок прикладення системи навантажень і накладання закріплень на її поверхню, обґрунтовано оптимальний вибір розмірів скінченно-елементної сітки та розкрито прийнятну методіку задавання фізико-механічних властивостей матеріалів.

Ключові слова: будівлі та споруди залізничного транспорту, віброармована ґрунтоцементна паля, скінченно-елементна модель.

Рассмотрен порядок создания модели виброармированных ґрунтоцементных свай для конечно-элементного анализа. Свая в основании (почве) находится в объемных предельно-нагруженных условиях. Среди особенностей создания такой модели описан порядок приложения системы нагрузок и наложения закреплений на ее поверхность, обоснованно оптимальный выбор размеров конечно-элементной сетки и раскрыто принятую методіку задания физико-механических свойств материалов.

Ключевые слова: здания и сооружения железнодорожного транспорта, виброармированная ґрунтоцементная свая, конечно-элементная модель.

The use of soil-cement piles produced by deep soil mixing technology as the bearing structures foundations of buildings of railway transport is efficient and less resource-intensive compared with other types of pile foundation engineering. The general procedure for creating models vibroreinforced soil-cement piles for finite-element analysis presented in this article. The first step of creating model is geometric creation the volumetric body. This body consists of two components: three-dimensional soil-cement body and linear reinforcing rods. Among the physical and mechanical properties of materials given initial Young's modulus, Poisson's ratio, initial yield stress and initial yield strain. Diagram deformation of materials given also. Pile in basis (soil) is applied body forces. The procedure for applying loads and application of the system anchored to

the piles described among features creation of such conditions. The optimal size of finite-element mesh is performed using piles length of 9 meters and diameter of 750 mm.

Keywords: *building of railways, vibroreinforced soil-cement pile, finite-element model.*

Вступ. Розвиток сучасного будівництва громадських будівель транспортної інфраструктури, а також таких штучних споруд залізничного транспорту, як мости, шляхопроводи, віадуки тощо, спрямований на збільшення їх висоти, прогонів та вантажопропускної здатності. Це призводить до збільшення навантажень на фундаменти та основи. Усе більшого поширення набувають технології укріплення ґрунтів основи цементом, зокрема створення ґрунтоцементних елементів і паль за бурозміщувальною технологією без виймання ґрунту [4].

За допомогою числового моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) напружено-деформованого стану (НДС) будівельних конструкцій та їх окремих елементів можливо розкрити характер їх руйнування чи форму втрати стійкості, виявити небезпечні місця концентрації напружень на їх поверхні, більш детально дослідити роботу арматурних стержнів та каркасів усередині конструкції [2].

Дослідження віброармованих ґрунтоцементних паль, виготовлених за бурозміщувальним методом, регламентуються нормативно-правовими актами України, зокрема Постановою Кабінету Міністрів України від 17.05.2012 р. № 397 «Деякі питання визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня на 2012-2016 роки». Результати роботи використовувалися в межах науково-дослідної роботи кафедри будівельних конструкцій СумНАУ, що зареєстрована в УкрНТІ (номер державної реєстрації 0114U001765).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати досліджень будівельних конструкцій із застосуванням комп'ютерних програм на базі МСЕ [1],

особливо із урахуванням повних діаграм роботи матеріалів, усе частіше висвітлюються у науковій літературі. Зокрема у роботі [7] проведено спрощене моделювання нелінійного аналізу конструкцій на основі методу Койтера-Ньютона. Незначне спрощення дає змогу скоротити числовий розрахунок та практично не знижує точність результатів розрахунку. Комп'ютерне моделювання дає змогу проводити детальні дослідження внутрішніх стержневих елементів у композитних конструкціях [5], а також виконувати повний аналіз тривісного напружено-деформованого стану конструкцій [6].

До нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми належить таке. Взаємодія віброармованих ґрунтоцементних паль, влаштованих у різних видах ґрунту, вивчена ще недостатньо [3], тому неможливо коректно задати всі необхідні дані для розрахунку в геотехнічних комплексах (наприклад, PLAXIS, MIDAS). У проаналізованих наукових працях розкрито важливі питання, які можливо поєднати під час розроблення принципів створення числової скінченно-елементної моделі віброармованих ґрунтоцементних паль, що знаходиться в об'ємних змінних по довжині конструкції в гранично-навантажених умовах.

Визначення мети та задачі дослідження. Удосконалити розрахункову схему системи «основа – віброармована ґрунтоцементна паля» з використанням МСЕ і пружної моделі системи для подальшого оцінювання її НДС. Моделювання палі вирішено виконати як конструкції, а вплив навколишнього ґрунту задати діючими силами бокового тиску й опору тертя по бічній поверхні.

Основна частина дослідження. Для числового моделювання було використано

засіб автоматизації інженерного розрахунку, аналізу міцності та надійності (CAE – computer-aided engineering) FEMAP. Використовувалася навчальна демо-версія SDRC-FEMAP 8/1a S/N 000-00-00-DEMO-406F-00000000.

У програмі була створена модель ґрунтоцементної палі, що була впроваджена та випробувана статичним навантаженням при будівництві 10-поверхового житлового будинку. Для виконання числового експерименту було прийнято використовувати ґрунтові умови та конфігурацію палі, що зазнавала статичних випробувань на будівельному майданчику.

Під час досліджень дотримано всіх передумов числового моделювання, а також введено деякі припущення, що, на думку авторів роботи, не дали значної похибки на результати проведеного моделювання. Зокрема фізико-механічні характеристики сталі та ґрунтоцементу задавалися як для повністю однорідних та ізотропних матеріалів. Також виконувалося незначне коригування діаграм їх деформування, що обумовлено обмеженнями використаного програмного комплексу (січний модуль пружності будь-якого матеріалу не може бути більшим від початкового модуля пружності). Власну

вагу конструкцій моделей не враховано у зв'язку її малістю у порівнянні із зовнішнім навантаженням.

Створення скінченно-елементної моделі, адекватної до натурних віброармованих ґрунтоцементних паль для визначення їх НДС, виконувалося у розглянутому нижче порядку.

Під час створення просторової геометрії моделі (етап 1) спочатку формувався плоский круглий поперечний переріз досліджуваної ґрунтоцементної палі $d = 750$ мм. Потім формувалась кругла гранична поверхня, на основі якої видовжувалась об'ємна циліндрична модель палі (див. рис. 1, а). Для задавання арматурних стержнів попередньо об'ємна модель була розбита площинами (рис. 1, б), на перетині яких утворювалися прямі для подальшого розташування на них арматурних стержнів (рис. 1, в).

Під час задавання фізико-механічних властивостей матеріалів (етап 2) враховано пружно-пластичні характеристики матеріалів: нелінійну залежність між деформаціями і напруженнями для ґрунтоцементу (рис. 2) та протяжну ділянку плинності для сталі із незначним зміцненням (рис. 3) [4].

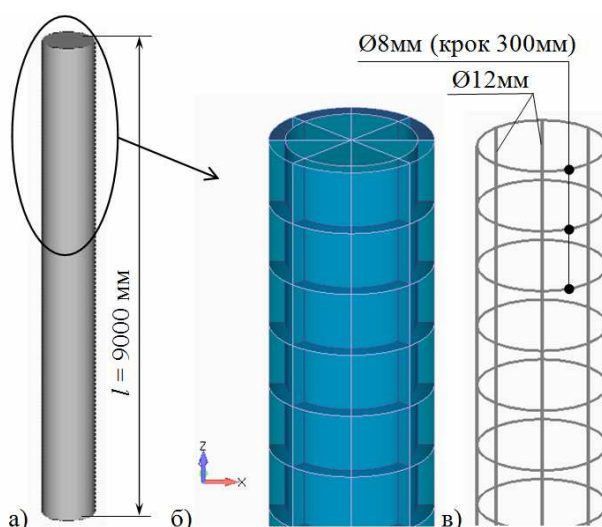


Рис. 1. Об'ємна модель палі (а); елемент палі, розбитий площинами, (б) та ділянка арматурного каркаса (в)

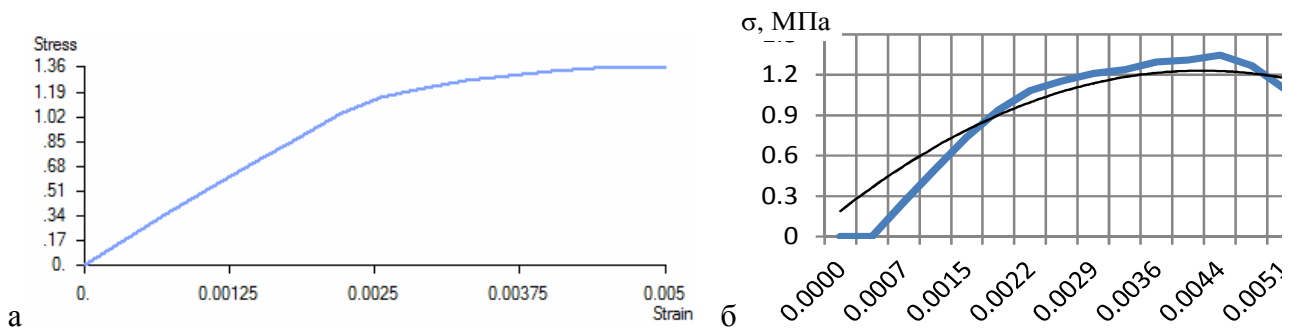


Рис. 2. Нелінійний закон деформування ґрунтоцементу: а – використаний під час числового моделювання; б – за результатами натурних випробувань

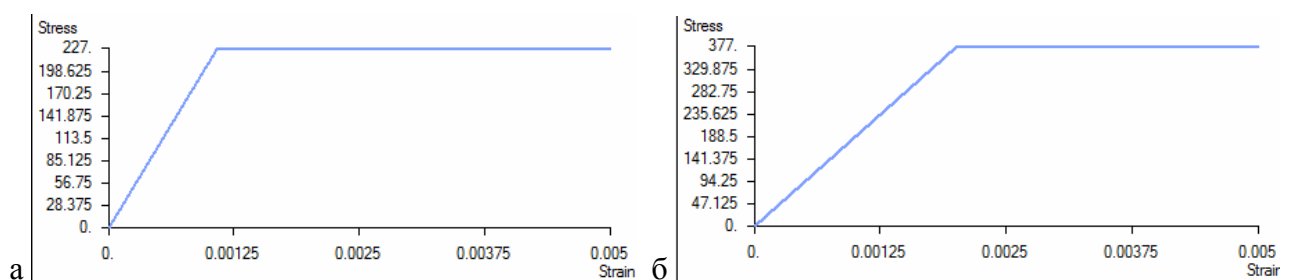


Рис. 3. Спрощений дволінійний закон деформування σ_s - ϵ_s арматурних стержнів класу А240С (а) та А400С (б)

Для проведення розрахунків задано початковий модуль пружності (Young's Modulus E), коефіцієнт поперечних деформацій (Poisson's Ratio ν), напруження (Initial Yield Stress σ_y) та деформації (Initial Yield Strain ϵ_y) на кінці ділянки

пропорційності матеріалів – початок плинності та розвитку незворотних (залишкових) деформацій. До таблиці зведені характерні вихідні фізико-механічні характеристики.

Таблиця

Фізико-механічні характеристики прийнятих у розрахунку матеріалів

Вихідний матеріал	Фізико-механічні характеристики				
	$E \times 10^5$ МПа	ν	σ_y , МПа	$\epsilon_y \times 10^{-5}$	σ_{ult} , МПа
Ґрунтоцемент	0,005	0,2	0,35	70	1,36
Арматура класу А240С	2,1	0,3	225	107	227
Арматура класу А400С	2,0	0,3	375	200	377

Під час розбиття композитної моделі на скінченні елементи (СЕ) (етап 3) враховано, що чим менший буде розмір СЕ, тим точніше можна визначити місця концентрації напружень, тобто місця

початку руйнування палі. Проте зменшення розмірів СЕ призводить до підвищення необхідних персональному комп'ютеру ресурсів для проведення розрахунку. Для визначення ефективності типу та розмірів

SE модель ґрунтоцементної палі було розбито на SE двох груп (тетраедри Tet Mesh та гексаедри Hex Mesh (див. рис. 4, а і б) із різними розмірами та визначено необхідні ресурси персонального комп'ютера для проведення відповідних розрахунків. Результати виконаного порівняння наведено на рис. 4, д. Для створення об'ємної SE сітки моделей паль було прийнято використовувати тривимірні об'ємні елементи типу solid у формі гексаедрів. Розмір сторони елемента

приймався 100 мм, що складає близько 1,1 % від максимального розміру моделі. На рис. 4, в, г показана модель палі, розбита на обрані SE, а також внутрішній арматурний каркас, розбитий на SE лінійного типу Line elements – Beam. Після створення скінченно-елементних сіток ґрунтоцементної палі та арматурного каркаса виконувалося обов'язкове об'єднання їх вузлів (Check Coincident Nodes), що збігаються.

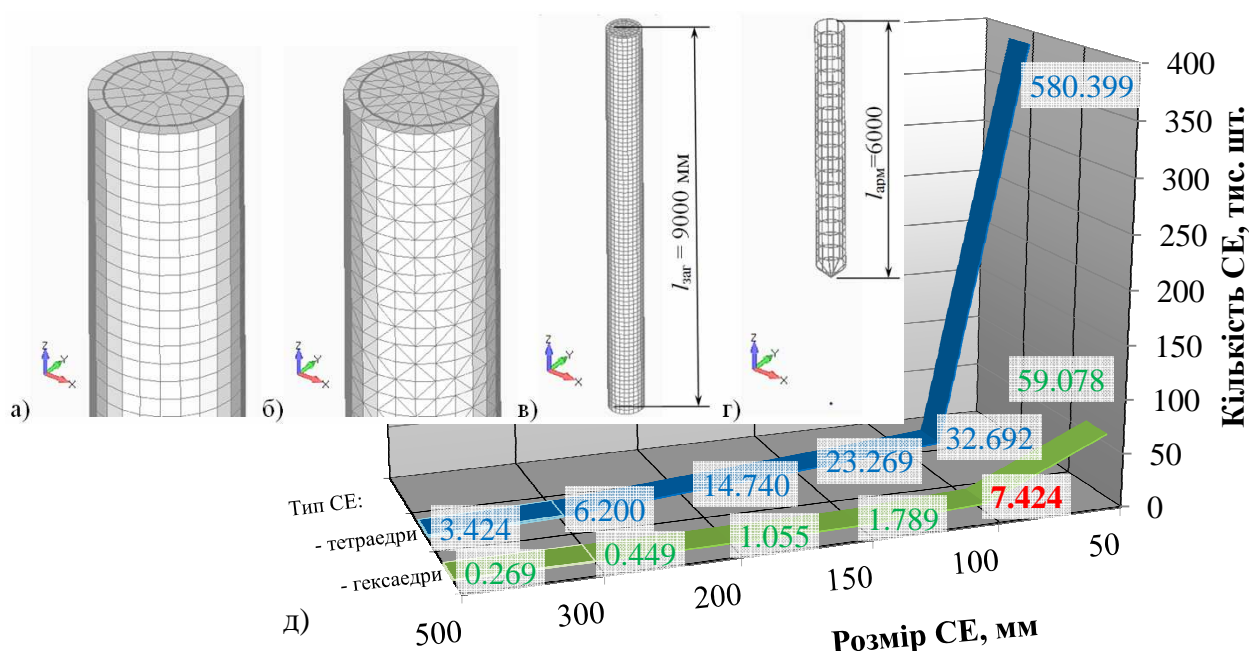


Рис. 4. Порівняння ефективності типу та розмірів SE: фрагмент моделі палі, розбитої на SE гексаедри (а) або тетраедри (б); повна модель ґрунтоцементної палі (в) і арматурного каркаса (г); залежність розмір – кількість SE

Для досягнення результатів розрахунку, які б найкраще відповідали результатам натурного експерименту, врахування повних діаграм деформування вихідних матеріалів недостатньо. Необхідно найбільш точно описати умови роботи палі в реальних умовах – умовах обтиснення інженерно-геологічних шарів. Тобто скласти рівноцінну натурній розрахункову схему роботи палі (етап 4). Для цього, по-перше, слід задати тотожні

реальним умови закріплення (граничні умови) палі і, по-друге, сформувані відповідну систему навантажень, як корисних, так і навантажень навколишнього обтиснення ґрунту.

Граничні умови (Constraint Definition) задавалися рівномірнорозподілені до верхнього та нижнього обрізу палі. До нижнього обрізу палі було прикладене жорстке закріплення (Fixed): заборонялися поступальні переміщення по всіх трьох

координатних осях (TX, TY і TZ) та кутові переміщення по цих же осях (RX, RY і RZ), так як нижній кінець палі був закріплений у товщі ґрунту. Верхній обріз був шарнірно закріплений у площині поперечного перерізу (Pinned): заборонені переміщення в осях TX і TY, так як верхній кінець палі був закріплений тільки ростверком, через який передавалося корисне навантаження.

Навантаження до моделей ґрунтоцементних паль прикладалося як стичне рівномірнорозподілене по відповідних площах та поділялося на три групи: корисне вантажне вертикальне, прийняте рівним максимальному навантаженню, що було прикладене до палі під час проведення натурального експерименту на будмайданчику – 105 т, навантаження бокового обтиснення ґрунтом та сили бокового тертя, що виникали між боковими поверхнями палі та ґрунтом під час її стиску (рис. 5).

Задане вертикальне навантаження на обріз палі під час проведення програмним комплексом розрахунку збільшувалося поетапно. Кількість таких етапів (Max Increments) складала 100 розрахунків. Завершуючи кожний етап розрахунку, програмний комплекс FEMAP формував базу (Output Control) визначених внутрішніх зусиль (Force), напружень (Stress) та переміщень (Strain), а також проводив аналіз відповідності отриманих напружень і деформацій до заданих вихідних діаграм деформування ґрунтоцементу та арматурних стержнів. У разі виявлення невідповідності програмний комплекс вносив коригування та повторював розрахунок даного етапу навантаження. Число таких можливих ітерацій на кожному етапі завантаження (Iterations Before Update) приймалося рівним 10. При цьому точність вихідних даних розрахунку (Convergence Tolerances) приймалася кратною 0,001. Задля точнішого врахування заданих нелінійних

діаграм деформування вихідних матеріалів (Arc-Length Solution Strategy) було ввімкнено опцію Arc-Length Method – так званий «Обхід по кривій».

Бокове навантаження обтиснення палі ґрунтом та навантаження бокового тертя визначено розрахунковим шляхом згідно з проведеними інженерно-геологічними вишукуваннями на будівельному майданчику проведення натурального експерименту палі. Так як паля була розділена по висоті на частини висотою 300 мм (задля влаштування поперечних арматурних каркасів) та по колу на 8 сегментів (задля влаштування вертикальних робочих арматурних стержнів), то задавалися усереднені значення дії сил з рівномірним розподіленням по цих площадках. Тобто розмір площадок, до яких прикладалося бокове навантаження складав по висоті 300 мм та по ширині 295 мм (1/8 периметра палі), що є 1,1 % від загальної довжини конструкції. На рис. 5 показані розподіли бокового обтиснення палі ґрунтом та сил бокового тертя відповідно.

Після створення об'ємної SE моделі ґрунтоцементної палі проводилась перевірка коректності моделі (етап 5), а саме видалялися зайві граничні поверхні, через які могли виникнути непоправні помилки при розрахунках.

Проводився контроль якості та симетричності розбиття моделі на SE, кількість об'єднання вузлів SE сітки, що збігаються, тип граничних умов, величини прикладених навантажень та поверхні їх поширення. На всіх етапах SE аналізу моделей (Load Factor) проводився поточний контроль ходу нелінійного розрахунку (Nonlinear History), а саме контролювалися почерговість та протяжність основних ділянок роботи пружно-пластичних матеріалів: ділянки пружності, пропорційності, плинності, зміцнення тощо.

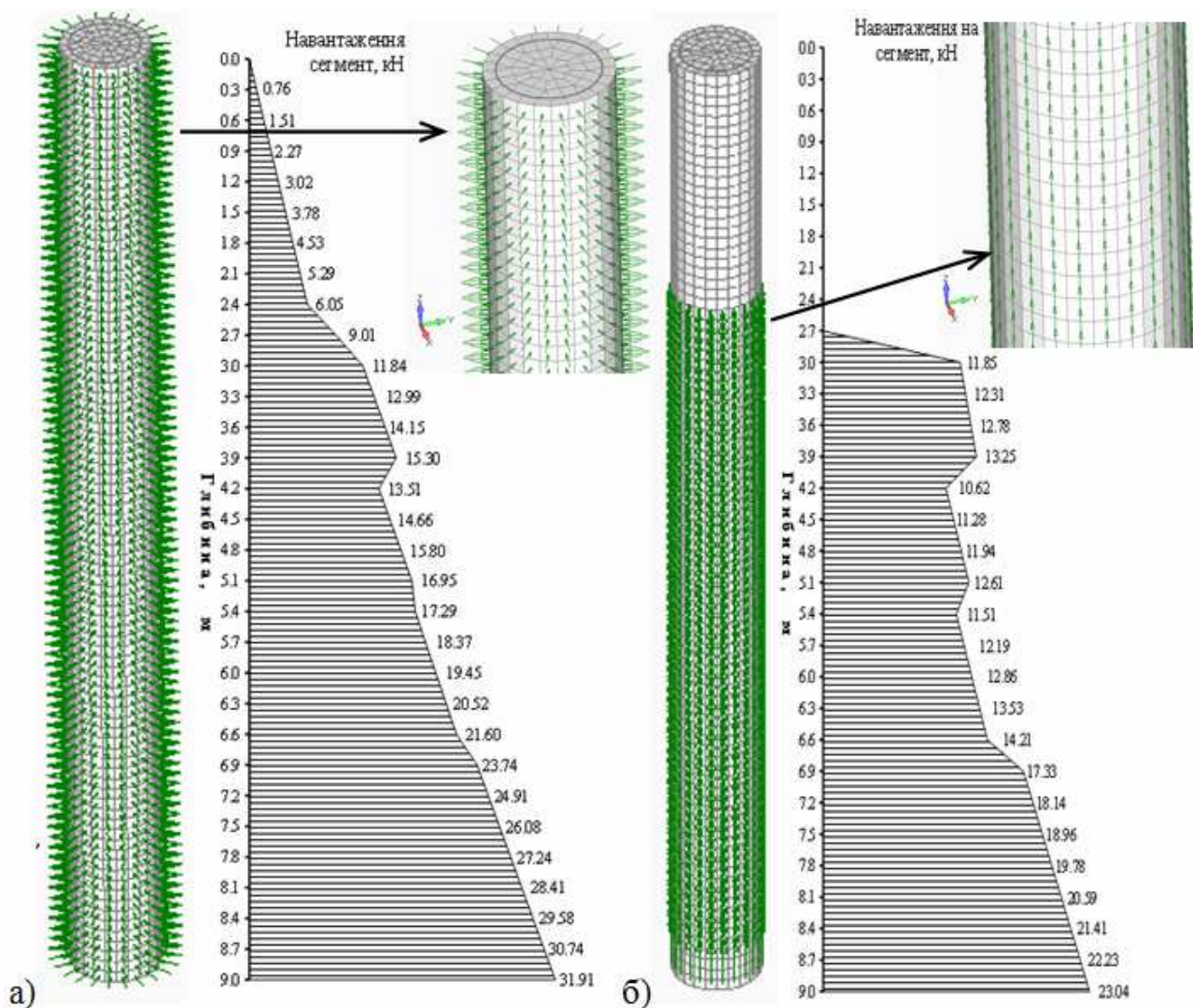


Рис. 5. Діаграми розподілу зусиль по висоті: а – бокового обтиснення палі ґрунтом; б – тертя між боковими поверхнями палі та ґрунтом під час її стиску

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Створена скінченно-елементна модель системи «основа – віброармована ґрунтоцементна паля» дає змогу проводити аналіз напружено-деформованого стану палі по висоті в залежності від інженерно-геологічних умов основи. За результатами числених досліджень можливо визначати найбільш

оптимальні розміри ґрунтоцементних паль, а також конструкцію їх армування (діаметр та крок розташування поздовжніх і поперечних арматурних стержнів), що може бути використано під час нового будівництва громадських будівель інфраструктури та штучних споруд залізничного транспорту, а також під час проведення ремонтно-відновлювальних робіт таких існуючих споруд.

Список використаних джерел

1. Гореев, В. В. Математическое моделирование при расчетах и исследованиях строительных конструкций [Текст] / В.В. Гореев, В.В. Филиппов, Н.Ю. Тезиков. – М.: Высшая школа, 2002. – 206 с.
2. Городжа, А. Д. Сучасний стан контролю якості залізобетонних паль і бурових стовпів [Текст] / А.Д. Городжа, Б.О. Трошинський, В.П. Козел // Основи і фундаменти: міжвідомчий наук.-техн. зб. – К.: КНУБА, 2006. – Вип. 30. – С. 34-38.
3. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти [Текст]: підручник / М.Л. Зоценко, В.І. Коваленко, А.В. Яковлев [та ін.]. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 568 с.
4. Цветков, В. С. Учет технологических факторов при проектировании состава цементогрунтовых смесей [Текст] / В. С. Цветков. – М.: Стройиздат, 1978. – 210 с.
5. Beicha D. Effective transverse elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites [Text] / D. Beicha, T. Kanit, Y. Brunet, A. Imad, A. E. Moumen, Y. Khelifaoui // Mechanics of Materials. – 2016. – Vol. 102. – pp. 47-53. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.08.010.
6. Bishnu P. A new method of applying long-term multiaxial stresses in concrete specimens undergoing ASR, and their triaxial expansions [Text] / P. G. Bishnu, K. P. Daman // Materials and Structures. – 2016. – Vol. 49 (9). – pp. 3409-3508. – DOI: 10.1617/s11527-015-0734-z.
7. Liang K. An eigenanalysis-based bifurcation indicator proposed in the framework of a reduced-order modeling technique for non-linear structural analysis [Text] / K. Liang, M. Ruess, M. Abdalla // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2016. – Vol. 81. – pp. 129-138. – DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2016.01.013.

Гасенко Антон Васильович, канд. техн. наук, доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (050)404-64-88. E-mail: gasent@mail.ru.

Новицький Олександр Павлович, канд. техн. наук, заступник начальника ДП ПАТ «СУМБУД» Головна випробувальна лабораторія в будівництві. Тел.: (050)577-78-27. E-mail: novitskiy_a@i.ua.

Рожко Валерій Нарцизович, канд. техн. наук, доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (050) 740-38-63. E-mail: vn_rozhko@mail.ru.

Hasenko Anton, PhD. Sc. Associate Professor, Department of Reinforced-concrete and Stone Constructions and Strength of Materials, Faculty of Civil Engineering, Poltava National Technical Yuriy Kondratyuk University. Tel.: (050)404-64-88. E-mail: gasent@mail.ru.

Novitskiy Oleksandr, PhD. Sc, deputy head SC PJSC «SUMBUD» Main testing laboratory in construction. Tel.: (050)577-78-27. E-mail: novitskiy_a@i.ua.

Rozhko Valerij, PhD. Sc. Associate Professor, Department of Reinforced-concrete and Stone Constructions and Strength of Materials, Faculty of Civil Engineering, Poltava National Technical Yuriy Kondratyuk University. Tel.: (050)740-38-63. E-mail: vn_rozhko@mail.ru.

Стаття прийнята 13.02.2017 р.