

УДК 624-15

DOI 10.47049/2226-1893-2022-1-35-43

## МОДЕЛЮВАННЯ ПАЛІ У ГРУНТОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

М.В. Адамчук, К.Ю. Федорова

к.т.н, доценти кафедри  
«Цивільна інженерія та архітектура»

*Одеський національний морський університет, Одеса, Україна*

**Анотація.** Більшість сучасних інженерних програм, для реалізації статичного розрахунку, використовують метод скінчених елементів. Цей метод може бути використаний для моделювання палі. Особливості моделювання пальної основи розглянуті на прикладі програмного комплексу Robot Structural Analysis компанії Autodesk (далі RSA).

Розглянуто два методи моделювання палі: «пружних опор» запропонований для RSA Carlos E.Villarroel [1] і «пружного стрижня». З використанням обох методів був розрахований приклад. Виконано порівняння результатів по зусиллям і переміщенням для палі, зануреної в ґрунт.

**Ключові слова:** палі, аналітична модель палі, проектування основ будівель, Robot Structural Analysis.

УДК 624-15

DOI 10.47049/2226-1893-2022-1-35-43

## MODELING OF PILES IN A GROUND ENVIRONMENT

Nikolay Adamchuk, Catherine Fedorova

PhD, docents of the department «Civil Engineering and Architecture»

*Odesa National Maritime University, Odessa, Ukraine*

**Abstract.** Most modern engineering programs use the finite element method to implement static analysis. This method can be used to model piles. The features of modeling a pile foundation are considered using the example of the Robot Structural Analysis (RSA) software package from Autodesk.

The pile is created as a rod to model rigid coupling. When using the finite element method, the bar in the soil is divided into sections with a length of about 1 m, so that the necessary parameters can be assigned at different depths. For such a model, two approaches can be implemented. Let's call them conditionally: «method of elastic supports» and «method of elastic bar».

© Адамчук Н.В., Федорова К.Ю., 2022

*The method of «elastic supports» for RSA was proposed by Carlos E. Villarroel [1]. The idea is that at the nodes of the bar (along the pile depth), supports are created with elastic foundation coefficients in the horizontal (X, Y) and vertical (Z) planes. This coefficient ( $kN/m$ ) in the direction of the X, Y, Z axes are obtained as the product of the base stiffness ( $kN/m^3$ ) by the corresponding area ( $m^2$ ). Areas are taken: along the lateral surface of the pile (for the Z-axis) and the vertical cross-section of the pile (for the X, Y axes). In addition, an elastic support is created directly at the tip of the pile, directed along the axis of the pile (Z). Here, the elastic foundation coefficient is obtained as the product of the foundation stiffness (at a given depth) by the pile cross-sectional area.*

*The «elastic bar» method consists in creating finite element bars on an elastic foundation for pile sections. Elastic foundation coefficients ( $kN/m^2$ ) are calculated as the product of foundation stiffness ( $kN/m^3$ ) by the reduced pile width ( $m$ ). Thus, the work of the pile is ensured in the horizontal direction (X, Y). The work of the pile in the vertical direction is provided by creating a point support on the tip with the appointment of elastic compliance in the direction of the Z axis.*

*Using both methods, the example presented in [7] was calculated. The discrepancy in the results turned out to be quite acceptable for engineering calculations (for forces – 1,5-3 %, for displacements – 4,3 %).*

**Keywords:** *pile, pile analytical model, building foundation design, Robot Structural Analysis.*

**Вступ.** Багато видів конструкцій різного призначення – гідротехнічні, промислові, загальногромадянські – передбачають влаштування пальової основи. Потреба в статичному розрахунку такого роду конструкцій постійна. У той же час, не всі спеціалізовані програмні комплекси мають подібну задачу.

Якщо розрахунки надземних частин конструкцій реалізуються програмними комплексами на досить високому рівні, то моделювання ґрунтової основи викликає певні труднощі: і в силу складності завдання, і в силу недостатньої проробки програм.

Більшість сучасних інженерних програм, для реалізації статичного розрахунку, використовують метод скінчених елементів. При такому підході, моделювання пальової основи, як правило, поділяється на дві задачі. Перша – це власне створення розрахункової (аналітичної) моделі. Тут використовують різні типи скінчених елементів: вузлові або стрижневі з призначенням пружних зв'язків, необхідних для моделювання роботи палі в ґрунтовому середовищі. Отримання параметрів пружних зв'язків – друга задача, яку необхідно розглянути. Для вирішення цієї складної задачі з безліччю параметрів і умов створюються окремі модулі, по суті самостійні програми. Часто процес проектування реалізує ітераційний алгоритм: призначаються початкові параметри пружних зв'язків; виконується статичний розрахунок; за допомогою додаткових модулів уточнюються параметри пружних зв'язків і процес повторюється до отримання стабільних результатів.

Особливості формування розрахункової (аналітичної) моделі палі розглядаються на прикладі, який реалізується в середовищі програмного комплексу Robot Structural Analysis компанії Autodesk.

**Постановка проблеми.** Аналіз можливостей програмного комплексу Robot Structural Analysis для реалізації розрахункової моделі палі, що є зануреною в ґрунт. Розрахункова модель реалізується на підставі метода скінчених елементів, який головним чином використовується у сучасному програмному забезпеченні провідних компаній.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні програмні комплекси мають у своєму арсеналі ряд інструментів і додатків для реалізації аналітичної моделі палі, пальової основи, пальових полів і т.п.

*Програмний комплекс ЛІРА-САПР.* Розрахункова модель реалізується за допомогою спеціальних скінчених елементів. Ці одновузлові елементи дозволяють моделювати роботу одиночної палі спільно з навколишнім ґрунтом. Власне паля моделюється ланцюжком вертикальних стрижневих елементів, з'єднаних одновузловими скінченими елементами. Щоб уникнути виснажливої «ручної» роботи можна використовувати додатковий інструмент (*Групи пальового поля*). При цьому паля створюється автоматично як ланцюжок вертикальних елементів; в рамках діалогу призначається довжина і поперечний переріз елемента. Програмний комплекс ЛІРА-САПР має також інформаційну систему ГРУНТ, яка дає можливість автоматично обчислювати жорсткість паль на основі заданих інженерно-геологічних умов. В системі можливо реалізувати палі в кущі і врахувати їх взаємний вплив [2].

*Програмний комплекс SCAD.* Розрахункова модель реалізується за допомогою одновузлового скінченого елемента з пружними зв'язками. Для вирішення ґрунтової задачі використовується автономна програма-сателіт *Запит*. У ній розробники реалізували розрахунок фундаментів згідно сучасних норм проектування. На підставі результатів програми-сателіта призначається жорсткість одновузлового скінченого елемента в загальній аналітичній моделі споруди.

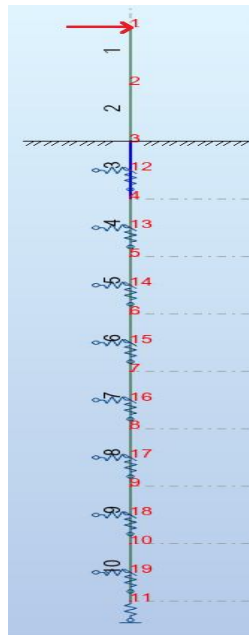
**Основний матеріал дослідження.** При моделюванні пальового поля в RSA можлива реалізація двох розрахункових моделей – в залежності від типу сполучення палі і ростверку: шарнірне і жорстке. При шарнірному сполученні вважаємо, що паля сприймає тільки вертикальне навантаження. В цьому випадку саму палю можна не моделювати, а замінити її пружною шарнірної опорою. При жорсткому сполученні - виникає необхідність моделювання палі в ґрунтовому середовищі.

Моделювання шарнірного сполучення виконується за допомогою типового інструменту *Опора*. Тут необхідно призначити пружну податливість опори в напрямі осі *Z*. Механізму, який дозволяє отримати дане значення для паль, в RSA немає. Тому, слід звернутися до поточних норм проектування і отримати несучу здатність палі: або розрахунковим шляхом або в результаті польових випробувань. Крім цього, необхідно знати граничне переміщення палі. Граничне переміщення може бути прийнято, як величина відмови палі (зазвичай в межах 2-5 см) або прийнято, виходячи з граничних переміщень конструкції. Тоді пружну податливість

опори (жорсткість палі) призначаємо як відношення несучої здатності до граничного переміщення палі.

Для моделювання жорсткого сполучення паля створюється як стрижень. При використанні методу скінчених елементів, стрижень в ґрунті розбивається на ділянки довжиною близько 1 м, щоб можна було призначати необхідні параметри на різній глибині. Для такої моделі можна реалізувати два підходи. Умовно назвемо їх: «метод пружних опор» і «метод пружного стрижня».

Метод «пружних опор», використовується в багатьох програмних комплексах. Приклад реалізації даного методу для RSA можна побачити у Carlos E. Villarroel [1]. Ідея полягає в тому, що в вузлах стрижня (по глибині палі) створюються опори з коефіцієнтами жорсткості основи в горизонтальних (X, Y) і вертикальних (Z) площинах. Коефіцієнти жорсткості ( $\text{кН} / \text{м}$ ) у напрямку осей X, Y, Z отримують як добуток жорсткості основи ( $\text{кН} / \text{м}^3$ ) на відповідну площу ( $\text{м}^2$ ). Площі приймають: по боковій поверхні палі (для осі Z) і вертикального поперечного перерізу палі (для осей X, Y). Крім того, безпосередньо на вістрі палі створюється пружна опора, спрямована по осі палі (Z). Тут коефіцієнт пружності основи отриманий як добуток жорсткості основи (на заданій глибині) на площу перерізу палі – див. рис. 1.



*Рис. 1. Модель «пружних опор»:  
у середині ділянок стрижня створені  
пружні опори (наприклад: стрижень 3, вузол 12)*

Метод «пружного стрижня» (рис. 2) полягає в тому, що для ділянок палі створюються скінчені елементи-стрижні на пружній основі. Коефіцієнти жорсткості основи ( $\text{кН} / \text{м}^2$ ) розраховуються як добуток жорсткості основи ( $\text{кН} / \text{м}^3$ ) на приведену ширину палі (м). Таким чином забезпечується робота палі в горизонтальному напрямку (X, Y). Робота палі в вертикальному напрямку забезпечується створенням точкової опори на вістрі з призначенням пружної піддатливості у напрямку осі Z. Так як для шарнірного сполучення.

Реалізація методу «пружного стрижня» обумовлена ще й тим, що сучасні норми [8] не передбачають поділу жорсткості основи у вертикальній і горизонтальній площинах. Так, якщо старі норми [7] вказують, що коефіцієнт постілі визначається «на бічній поверхні палі», то в поточних нормах [8] це називається «коефіцієнт жорсткості ґрунтової основи палі в горизонтальному напрямку».

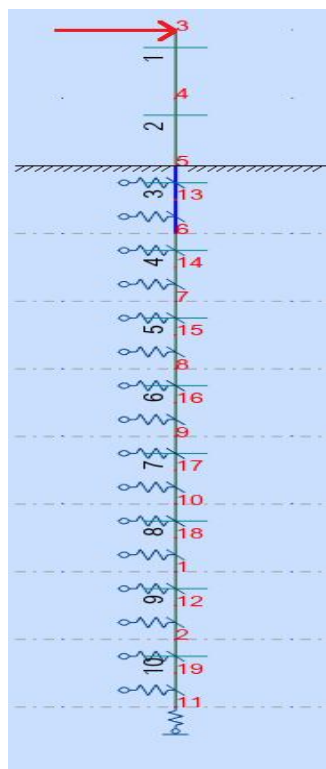


Рис. 2. Модель «пружного стрижня»:  
ділянки палі моделюються як стрижні на пружній основі

З використанням обох методів був розрахований приклад, представлений у [7] – рис. 3.

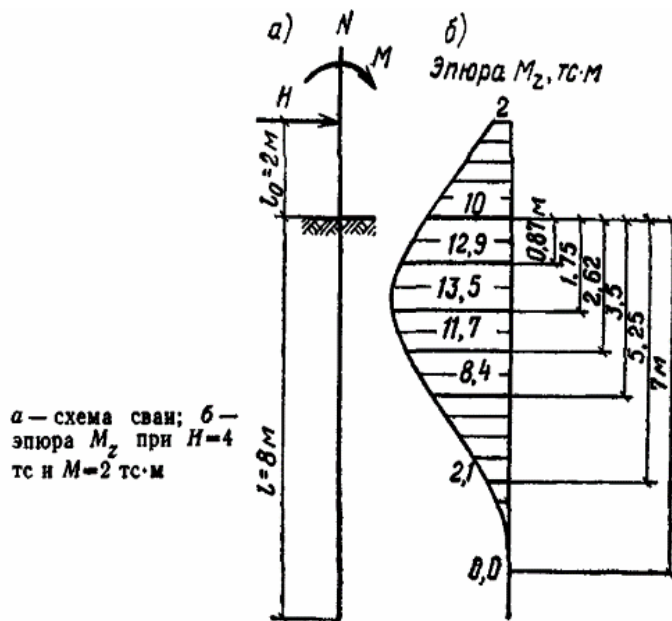


Рис. 3. Модель прикладу з [2]

Розбіжність у результатах виявилась цілком прийнятною для інженерних розрахунків (по зусиллям – 1,5-3 %, по переміщенням – 4,3 %).

Крім того, для методу «пружного стрижня» (рис. 5) виконано моделювання у відповідності з поточними нормами проектування [8].

Для цього випадку момент в палі і переміщення на рівні ґрунту вийшли трохи більшими, ніж за прикладом з [7] (рис. 4).

Наведемо приклад із використанням натурних досліджень. В роботі [1] виконано порівняння розрахункової моделі палі, створеної в програмі SCAD, з натурними дослідженнями. Були запропоновані чотири схеми, що моделюють роботу палі в ґрунті. Моделювалася паля і оточуючий її ґрунт. Результати розрахунків порівнювалися з натурними випробуваннями буронабивної палі діаметром 500 мм, довжиною 12,6 м, що була завантажена горизонтальною силою величиною 170 кН. Одна із запропонованих авторами схем показала хорошу збіжність з результатами природи. Розбіжність по переміщенню голови палі склала: в моделі 11,9 мм, в природі – 10 мм.

За вказаними вихідними даними природи, у відповідності з поточними нормами проектування, був виконаний розрахунок в RSA. Обидва методи («пружних опор» і «пружних стрижнів») показали приблизно однаковий результат – 35 мм.

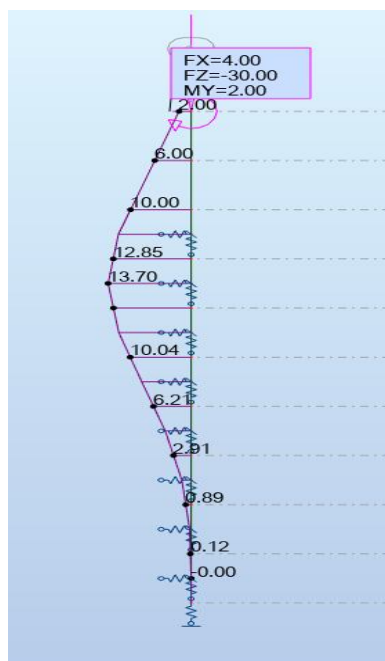


Рис. 4. Епюра моментів для методу «пружні опори»

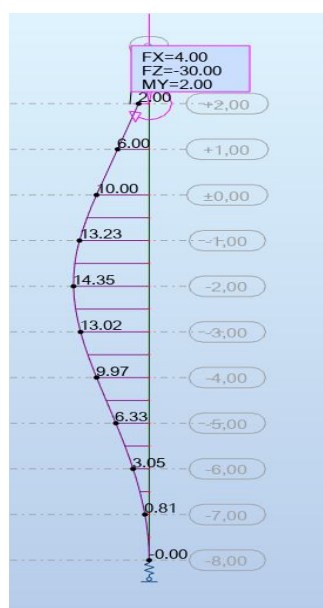


Рис. 5. Епюра моментів для методу «пружні стрижні» для норм [8]



**Висновки.** Методи «пружних опор» і «пружних стрижнів», які використовуються в сучасному програмному забезпеченні, дають практично однаковий результат. Обидва методи можуть бути застосовані. Розбіжність цих аналітичних розрахунків з натурними дослідженнями вказує, що розрахункові методи, а можливо і норми проектування, потребують вдосконалення.

Незважаючи на те, що метод «пружних опор», наданий в [1], показав цілком задовільні результати – для його впевненого застосування потрібно обґрунтувати коефіцієнт жорсткості основи у вертикальному напрямку.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Аналіз і проектування паль.* URL: <http://www.youtube.com/watch?v=Yqi9eJLCKOQ> (дата звернення: 07.10.2021).
2. *База знань.* URL: <https://help.liraland.ru/920> (дата звернення: 07.10.2021).
3. *Ромашкіна М.А., Титок В.П. Программный комплекс ЛИРА-САПР®: руководство пользователя / Под ред. А.С. Городецкого. Электронное издание, 2018. 254 с.*
4. *Веб-ресурс колектива розробників SCAD Office.* URL: [www.scadhelp.com](http://www.scadhelp.com) (дата звернення: 07.10.2021).
5. *Нуждин Л.В., Михайлов В.С. Численное моделирование свайных фундаментов в расчетно-аналитическом комплексе SCAD Office. Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2018. № 1. С. 5-18.*
6. *Якушев Д.И., Дмитриев С.В. Численное моделирование работы сваи на горизонтальную нагрузку. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017. № 67. С.154-159.*
7. *Руководство по проектированию свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1980. 153 с.*
8. *ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд [Чинний від 01.01.2019]. Вид.офіц. Київ, 2018. 36 с.*
9. *ДСТУ Б В.2.1-27:2010. Палі. Визначення несучої здатності за результатами польових випробувань [Чинний від 01.07.2011]. Вид.офіц. Київ, 2011. 11 с.*

## REFERENCES

1. *Analiz i proektuvannya pal'. URL: <http://www.youtube.com/watch?v=Yqi9eJLCKOQ> (data zvernennya: 07.10.2021).*
2. *Baza znan'. URL: <https://help.liraland.ru/920/> (data zvernennya: 07.10.2021).*
3. *Romashkina M.A., Tytok V.P. Prohramnyy kompleks LIRA-SAPR®: kerivnytstvo korystuvacha / Pid red. A.S. Horodets'koho. Elektronne vydannya, 2018. 254 s.*



4. *Veb-resurs kolektyvu rozrobnykiv SCAD Office. URL: www.scadhelp.com (data zvernennya: 07.10.2021).*
5. *Nuzhdyn L.V., Mykhaylov V.S. Chysel'ne modelyuvannya pal'ovykh fundamentiv v rozrakhunkovo-analitychnomu kompleksi SCAD Office. Visnyk PNYP. Budivnytstvo ta arkhitektura. 2018. № 1. S. 5-18.*
6. *Yakushev D.I., Dmytriyev S.V. Chysel'ne modelyuvannya roboty pali na horyzontal'nu navantazhennya. Visnyk Odes'koyi derzhavnoyi akademyyi budivnytstva ta arkhitektury, 2017. № 67. S.154-159.*
7. *Kerivnytstvo z proektuvannya pal'ovykh fundamentiv. M.: Stroyzdat, 1980. 153 s.*
8. *DBN V.2.1-10: 2018. Osnovy y fundamenti budivel' ta sporud [Chynnyy vid 01.01.2019]. Vid.ofits. Kyiv, 2018. 36 s.*
9. *DSTU B V.2.1-27: 2010. Pali. Vyznachennya nesuchoyi zdatnosti za rezul'tatamy pol'ovykh vyprobuvan'. [Chynnyy vid 01.07.2011]. Vid.ofits. Kyiv, 2011. 11 s.*

*Стаття надійшла до редакції 15.03.2022*

**Посилання на статтю: Адамчук М.В., Федорова К.Ю.** Моделювання палі у ґрунтовому середовищі // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2022. № 1(67). С. 35-43. DOI 10.47049/ 2226-1893-2022-1-35-43.

*Article received 15.03.2022*

**Reference a JournalArtic: Adamchuk N., Fedorova C.** Modeling of piles in a ground environment // Herald of the Odessa national maritime university. 2022. № 1(67). 35-43. DOI 10.47049/ 2226-1893-2022-1-35-43.