

УДК 624.016

к.т.н., доцент Михайловський Д.В.,  
demyh.ubp@gmail.com, ORCID/ 0000-0003-3151-8630,Комар А.А., Комар О.А.,  
Київський національний університет будівництва і архітектури

## НАПРУЖЕНО – ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОНСТРУКЦІЙ ВИСОТНОЇ БУДІВЛІ НА ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТАХ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ МОДЕЛЮВАННЯ ГРУНТОВОЇ ОСНОВИ

*Розглянуто алгоритми розрахунку будівель на пальових фундаментах із аналізом НДС надземних конструкцій будівлі.*

*Ключові слова: пальові фундаменти, моделювання.*

**Вступ.** Питання житлового будівництва в процесі соціального розвитку суспільства завжди були надзвичайно важливими. Забезпечення надійності будівель та споруд, зниження фінансових та матеріальних затрат є нагальними питаннями і сьогодні. Згідно з нормативними документами [2, 3] розрахунок висотних споруд необхідно виконувати як системи «основа-фундамент-споруда». Правильний вибір фундаментів суттєво впливає на напружено-деформований стан (НДС) основних несучих конструкцій будівлі. Найросповсюдженішим і одним з раціональних видів фундаментів є палі, що забезпечують високу несучу здатність та мінімальну величину осадок фундаменту. Незважаючи на давнє використання пальових фундаментів проектувальники не можуть прийти до єдиного способу моделювання та розрахунку, це говорить про те, що це питання вивчено не достатньо.

В інженерній практиці найбільшого застосування набули два методи комп'ютерного моделювання даної системи. Перший метод – це так звана модель Вінклера і її модифікації – грунт моделюється пружним що досягається за допомогою коефіцієнтів постелі, а палі, шляхом введення скінченних елементів скінченної жорсткості. Суттєвим недоліком даного методу є те, що модель Вінклера не враховує розподільчих значень ґрунту, а одновузловий скінченний елемент не враховує сумісну дію вертикальних і горизонтальних сил, а також моментів. Другий метод заключається в побудові трьохмірної моделі ґрунту об'ємними скінченними елементами. Палі ж моделюються стержневими скінченними елементами. Даний спосіб є найбільш точним, проте підготовка розрахункової схеми і сам розрахунок займають набагато більше часу в порівнянні з першим способом.

Проте фізико-механічні характеристики ґрунтів що задаються при моделюванні ґрунтового масиву найчастіше визначають в лабораторних умовах

на компресійних установках. Згідно з [5] модуль деформації визначений даним способом значно менший від того, що буде в реальному масиві під фундаментом, а отже розрахункові осідання будівлі будуть значно більшими за реальні. Водночас для зведення пальових фундаментів є обов'язковими натурні випробування паль на будівельному майданчику, що дає змогу уточнити реальний модуль деформації ґрунту.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В якості об'єкту дослідження було обрано 24-поверховий будинок з наступною конструктивною схемою – повний залізобетонний несучий каркас з пальовими фундаментами з буроін'єкційних паль діаметром 82 см, об'єднаних суцільним плитним ростверком товщиною 1,4 м, вертикальними несучими елементами (колони та стіни, ядро жорсткості в межах сходово-ліфтового блоку). Горизонтальну жорсткість забезпечують плити перекриття товщиною 0,2 м. Розміри будівлі в осях 23,4x36 м. Довжина паль - 25 м, визначена за інженерно-геологічними вишукуваннями.

З метою дослідження НДС «основа – фундамент – надземна конструкція» було виконано чисельне дослідження методом скінчених елементів (МСЕ) у програмному комплексі ЛІРА – САПР 2017.

Аналізувалися три скінченоелементні моделі:

- Перша модель на пружній основі (з використанням коефіцієнтів постелі C1 і C2 або модель Пастернака і моделюванням паль одновузовими скінченими елементами (СЕ) № 51) (див. рис. 1);

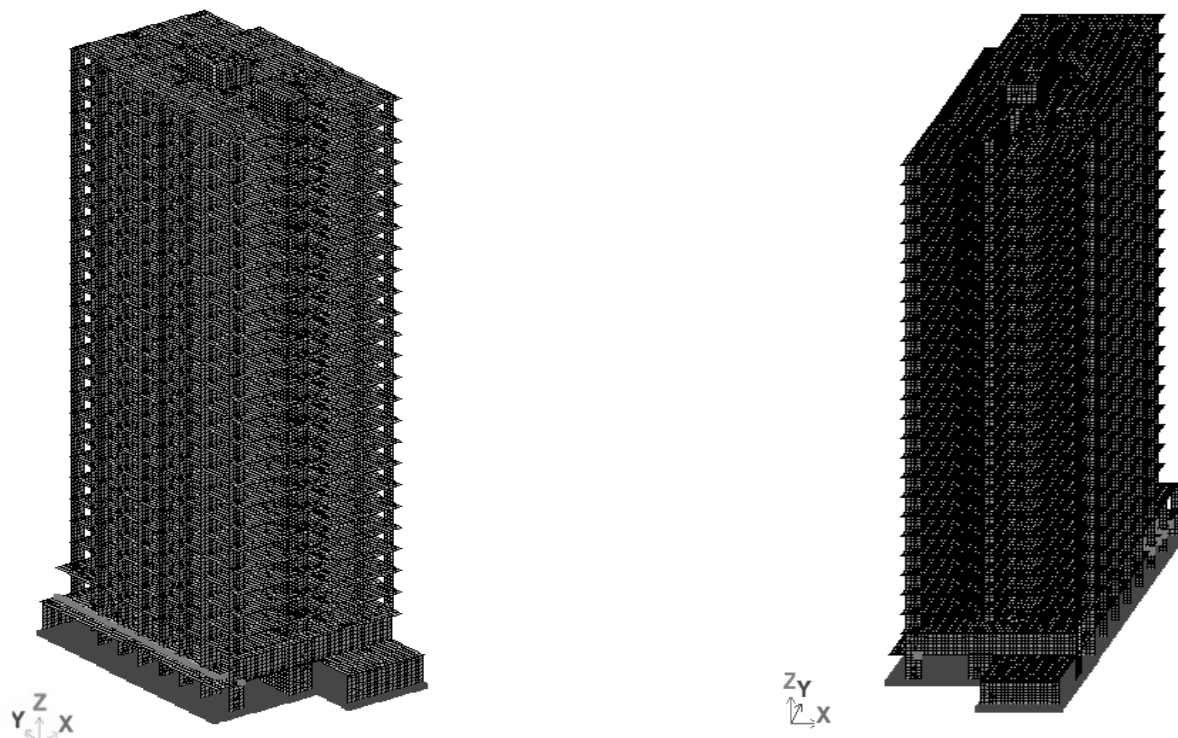


Рис. 1. Модель на пружній основі (з використанням коефіцієнтів постелі C1 і C2 і моделюванням паль одновузовими СЕ №51).

- Модель на пружній основі (з використанням об'ємних СЕ №31 при заданні модулів деформації ґрунтів взятих за результатами інженерно – геологічних вишукувань);
- Модель на пружній основі (з використанням об'ємних СЕ №31 з застосуванням деформативних характеристик ґрунтів взятих за результатами проведеної ідентифікації параметрів).

На основі характеристик ґрунту (координати і характеристики шарів ґрунту в кожній свердловині) сформовано просторову модель ґрунту, а по відміткам гирла свердловин вибудовано реальний рельєф поверхні. Середній тиск під подошвою фундаменту для першої ітерації визначено як вертикальне постійне навантаження від усієї будівлі поділене на площу фундаментної плити і становить  $P_z = 22708,3 / 766,8 = 29,61 \text{ т/м}^2$ . Кожен вузол фундаментної плити закріплений від горизонтальних переміщень ( $X, Y$ ) та від повороту навколо осі  $Z$  ( $UZ$ ) відповідно. Робота палі моделювалася СЕ №51 із погонною жорсткістю  $R = P / S = 600 / 0,0147 = 40520 \text{ т/м}$ . Уточнення коефіцієнтів постелі проведено таким чином, щоб напруження  $Rz$  відрізнялися від навантаження на ґрунт  $Pz$  менше ніж на 5%.

Таблиця 1.

## Фізико – механічні властивості ґрунтів основи

Найменування	Позначення	Один. виміру	Супісок пластичний	Пісок пилюватий	Глина пилювата, напівтверда
Природна щільність	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	1,94	1,98	1,93
Щільність частинок	$\rho_s$	кг/м <sup>3</sup>	2,67	2,66	2,70
Природна вологість	$\omega$		0,211	-	0,287
Вологість на межі розкочування	$\omega_p$		0,2		0,287
Вологість на межі текучості	$\omega_L$		0,04		0,21
Модуль деформації	$E$	МПа	15	30,3	31,9
Кут внутрішнього тертя	$\varphi$	Град.	23	33	21
Питоме зчеплення	$C$	МПа	12	5	66

Друга модель на пружній основі (з використанням об'ємних СЕ №31 і модулями деформації ґрунтів взятих за результатами статичного випробування одиночної палі) використовувалась для перевірки роботи несучих конструкцій в умовах неоднорідного складу основи.

Ґрунтовий масив являє собою тривімірну модель ґрунта, побудовану на основі інженерно-геологічних вишукувань. Фізико – механічні властивості ґрунтів основи показані у таблиці 1. У зв'язку із тим, що в рамках аналізу

інтерес викликає НДС конструкцій, а не розподіл напружень в пружних шарах ґрунтового масиву, виникає необхідність обмежити розміри ґрунтового масиву, нехтуючи роботою тої частини основи, яка знаходиться на достатній відстані від габаритів будівлі. Існує емпіричне правило, наведене в [7], яке говорить про те, що достатньо включити в розрахункову схему пружний шар, який знаходиться з кожної сторони від краю конструкції на відстані  $L = H_c \dots 1,5H_c$ , де  $H_c$  – висота стиснутої товщі. Висота стиснутої товщі визначалася у програмі ЕСПРИ і становить  $H_c = 28,3$  м. Таким чином об'ємний багатошаровий масив має наступні розміри: 124x110x68 м, зображені на рис.2.

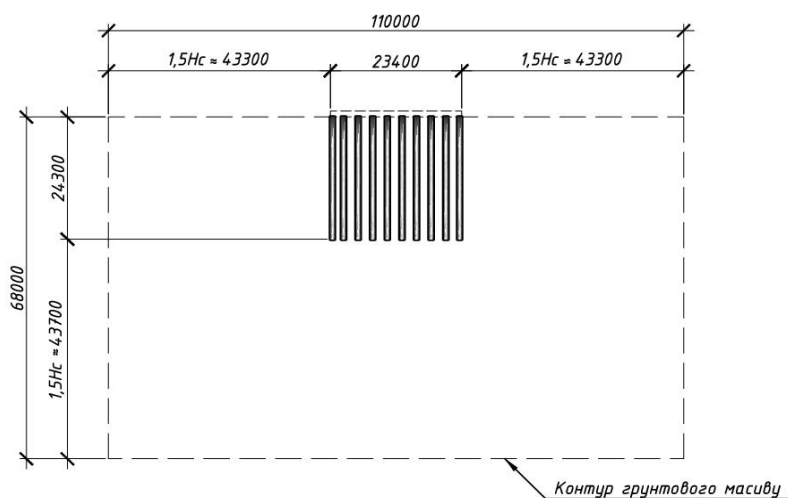


Рис. 2. Розміри розрахункової області

Нижня грань масиву закріплена від усіх лінійних переміщень ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), вертикальні грані масиву закріплені від горизонтальних переміщень ( $X$ ,  $Y$ ) відповідно. Палі задаються двовузловими стержньовими СЕ №10 розбитими по довжині таким чином, щоб вузли стержнів співпадали з вузлами кожного шару ґрунту. Жорсткість стержнів призначена як для циліндра з діаметром  $D = 82$  см., питома вага  $R_0 = 25$  кН/м<sup>3</sup>, модулем пружності  $E = 3 \cdot 10^7$  кН/м<sup>2</sup>. Розрахункова схема тип. 2 зображена на рис.3.

Третя модель на пружній основі (з використанням об'ємних СЕ №31 з застосуванням деформативних характеристик ґрунтів взятих за результатами проведеної ідентифікації параметрів).

Для уточнення розрахункової схеми було проведено чисельне моделювання випробувань буроінекційної палі, суть якого полягає у послідовному навантаженні і розвантаженні палі із вимірюванням її осідання під навантаженням. Випробування палі проводиться за стандартною методикою з послідовним навантаженням палі згідно ДСТУ Б.В. 2.1-95. Графік випробування палі наведено на рис. 4.

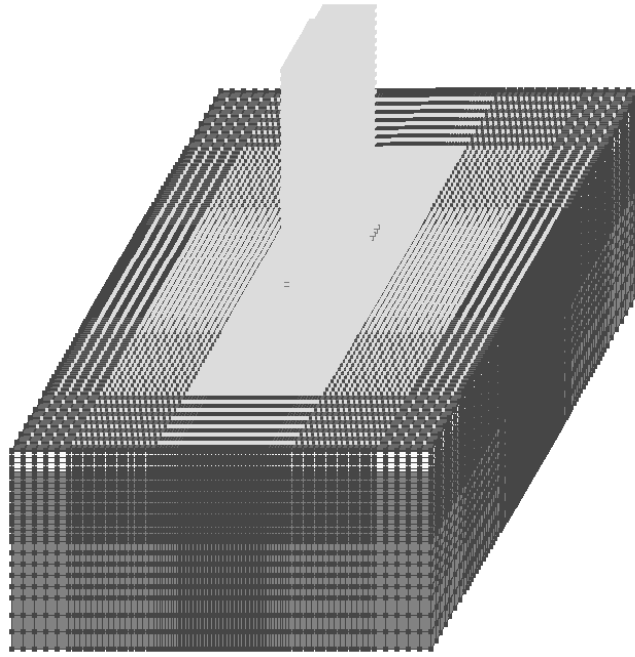


Рис. 3. Модель на пружній основі (з використанням об'ємних СЕ №31 і модулем деформації ґрунтів взятих із інженерно – геологічних вишукувань)

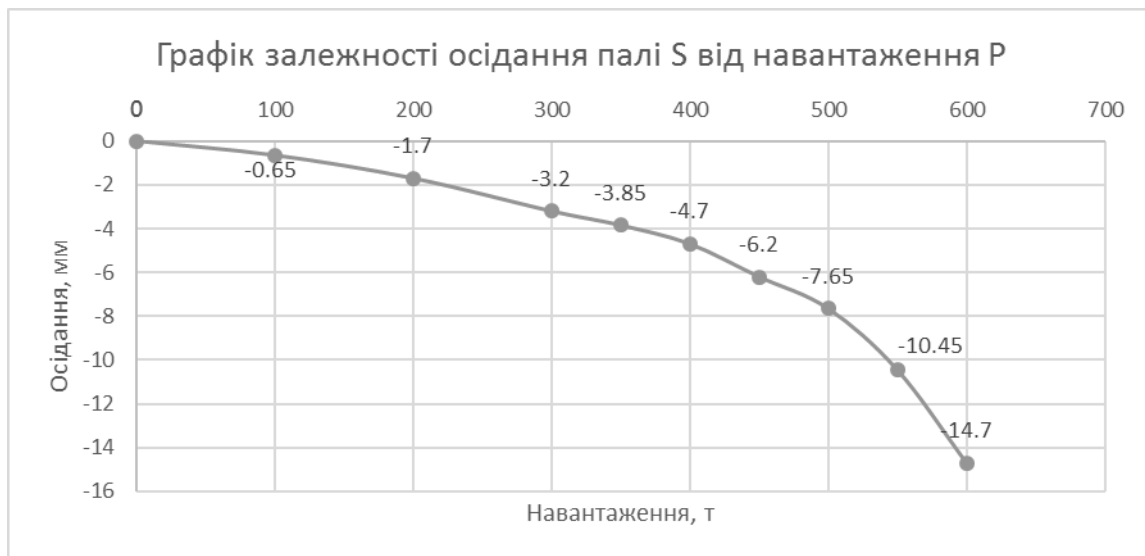


Рис. 4. Графік випробування палі

Чисельне моделювання статичного випробування палі проводилося на тривимірній моделі ґрунта, побудованій на основі інженерно – геологічних вишукувань. Фізико – механічні властивості ґрунтів основи показані у таблиці 1. Для визначення оптимальних розмірів розрахункової області ґрунтового масиву та об'ємних скінчених елементів додатково проведено розрахунок збіжності. Розрахунок полягає у поступовому розбитті ґрунтового масиву на різну кількість скінчених елементів з подальшим визначенням оптимального осідання. Для коректного порівняння задано однакові вихідні дані для всіх схем, що розглядаються:

- Грунтовий масив побудований на основі інженерно – геологічних вишукувань;
- Жорсткість палі призначена як для циліндра з  $D = 82\text{см.}$ ;
- Питома вага палі та модуль пружності відповідно  $R_0 = 25\text{кН/м}^3$ ,  $E = 3 \cdot 10^7 \text{кН/м}^2$ .

Результати розрахунку представлені в табличній формі (наведено в таблицях 2 та 3).

Розміри грунтового масиву, (м)	20		28		36		44		48
Осідання при навантаженні 600т.,(мм.)	28.9		22.2		19.8		18.8		18.5
Збіжність, (%)		23.18		10.81		5.05		1.60	

Масив шириною 48 м, відстань від низу палі 10м									
Навантаження	100	200	300	350	400	450	500	550	600
осідання	2.77	5.54	8.31	9.70	11.08	12.47	13.85	15.24	16.62
Збіжність, %	2.46								
Масив шириною 48 м, відстань від низу палі 15м									
Навантаження	100	200	300	350	400	450	500	550	600
осідання	2.84	5.68	8.52	9.94	11.36	12.78	14.20	15.62	17.04
Збіжність, %	1.73								
Масив шириною 48 м, відстань від низу палі 20м									
Навантаження	100	200	300	350	400	450	500	550	600
осідання	2.89	5.78	8.67	10.12	11.56	13.01	14.45	15.90	17.34
Збіжність, %	1.37								
Масив шириною 48 м, відстань від низу палі 25м									
Навантаження	100	200	300	350	400	450	500	550	600
осідання	2.96	5.92	8.88	10.36	11.84	13.32	14.80	16.28	17.76

У результаті розрахунку збіжності розміри грунтового масиву для моделювання статичного випробування паль підбиралися по параметрам зображеним на рис. 5. Ширина масиву повинна бути приблизно 60 діаметрів палі, а розмір розрахункової області по висоті повинен становити не менше двох довжин палі.

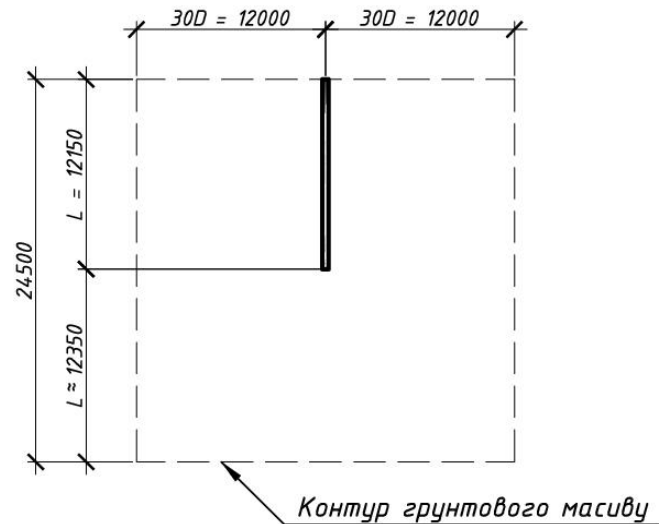


Рис. 5. Розмір розрахункової області для чисельного моделювання одиночної палі.

З метою отримання співпадіння результатів статичного випробування із результатами чисельного моделювання проводилася ідентифікація параметрів модуля деформації ґрунтів. Графік статичного випробування палі див. рис. 5. У процесі моделювання випробування були отримані результати які зображені в табл. 4 на рис. 6 та рис. 7.

Таблиця. 4

#### Ідентифікація параметрів модуля деформації ґрунтів

Найменування	Ідентифікація параметрів модуля деформації ґрунтів										
Навантаження	0	100	200	300	350	400	450	500	550	600	
осідання	0	-0.65	-1.7	-3.2	-3.85	-4.7	-6.2	-7.65	-10.45	-14.7	
велечина модуля деформації		числове моделювання із 1E									
осідання	0	-2.96	-5.92	-8.88	-10.36	-11.84	-13.32	-14.80	-16.28	-17.76	
велечина модуля деформації		числове моделювання із 3E									
осідання	0	-1.31	-2.62	-3.93	-4.59	-5.24	-5.90	-6.55	-7.21	-7.86	
велечина модуля деформації		числове моделювання із 3.5E									
осідання	0	-1.2	-2.38	-3.57	-4.17	-4.76	-5.36	-5.95	-6.55	-7.14	
велечина модуля деформації		числове моделювання із 2E									
осідання	0	-1.76	-3.52	-5.28	-6.16	-7.04	-7.92	-8.80	-9.68	-10.56	

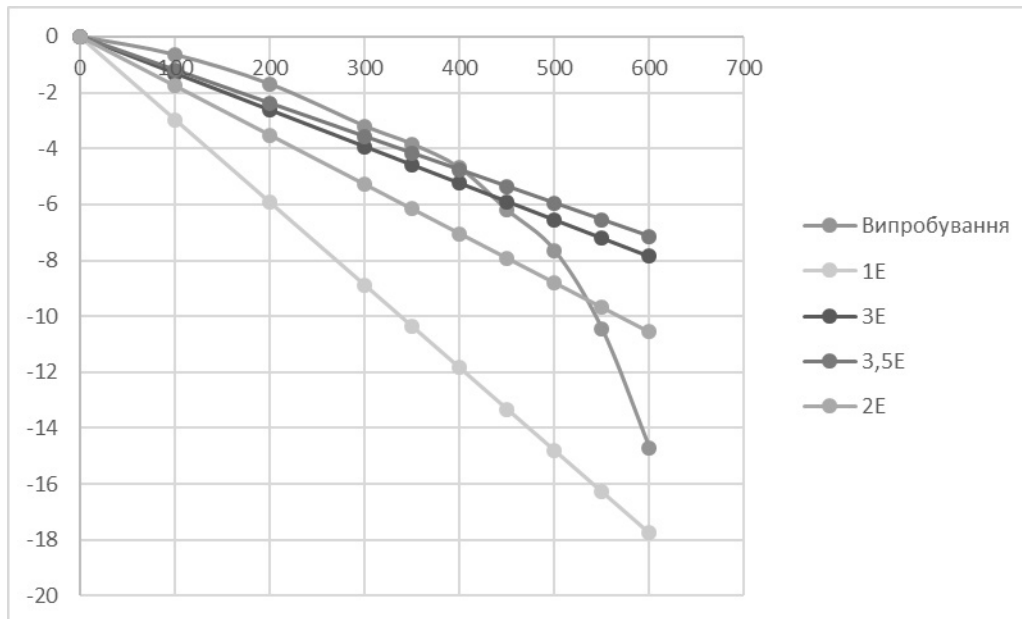


Рис. 6. Ідентифікація модуля деформації ґрунтів

100  
 Изополя перемещений по Z(G)  
 Единицы измерения - мм

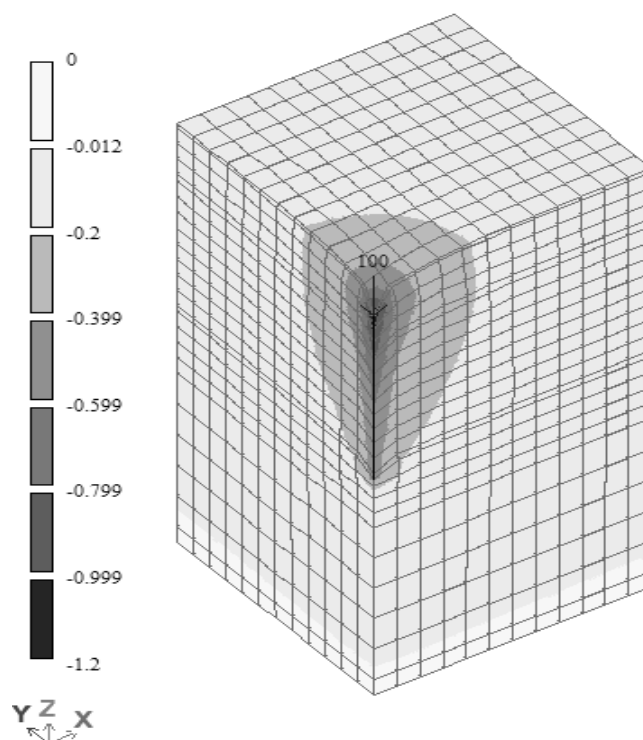


Рис. 7. Ідентифікація модуля деформації ґрунтів (моделювання статичного випробування одиночної палі).

У результаті чисельного моделювання порівнювалися значення осідання для 300, 400 і 500 тонн і було прийнято, що модуль деформації ґрунтів потрібно збільшити в 3,5 раза.



Значення отримані у результаті чисельного моделювання одиночної палі переносилися у розрахункову схему тип 2 із подальшим порівнянням результатів розрахунку.

В зв'язку з тим, що в рамках проведеного аналізу великий інтерес викликав НДС конструкції, а не розподілу напружень у пружному шарі ґрунту основи, а також для коректного аналізу результатів порівнювалися тільки значення отримані від постійного навантаження. Розрахункові значення отримані у результаті дослідження занесені у табл. 5.

Таблиця 5.

## Результати досліджень

Характеристика розрахунку	Тип основи			Елемент
	Пружна, С1, С2	Пружна, об'ємні СЕ, модуль деформації із ПВ	Пружна, об'ємні СЕ, збільшений модуль деформації	
Z,мм	-4.61(83.99)	-90.4(213.89)	-28.8	Паля
N, т	-187.93(10.55)	-132.32(22.16)	-170	
Z,мм	-5.84(81.34)	-95(203.51)	-31.3	Фундаментна плита
Mx min, т*м/м	-95.1(1.86)	-145(49.65)	-96.9	
Mx max, т*м/м	176(35.53)	429(57.14)	273	
My min, т*м/м	-84.3(26.70)	-149(29.57)	-115	
My max, т*м/м	128(51.52)	502(90.15)	264	
Z,мм	-5.41(82.32)	-91.8(200)	-30.6	Колона 1500x0.4 першого поверху
Ny, т/м.кв	-666(27.92)	-1.21E+03(30.95)	-924	
Z,мм	-7.12(77.54)	-95.50(201.26)	-31.7	Плита перекриття першого поверху
Mx min, т*м/м	-15.5(46.37)	-42.30(46.37)	-28.9	
Mx max, т*м/м	5.04(50.59)	17.60(72.55)	10.2	
My min, т*м/м	-11.4(47.47)	-32.50(49.77)	-21.7	
My max, т*м/м	4.35(74.71)	29.70(72.67)	17.2	
Z,мм	-12.3(66.30)	-97.90(168.22)	-36.5	Колона 1500x0.4 15-го поверху
Ny, т/м.кв	-299(10.33)	-252.00(7.01)	-271	
Z,мм	-20.8(51.52)	-103.00(141)	-42.9	Плита перекриття 15 - го поверху
Mx min, т*м/м	-5.51(10.11)	-6.73(9.79)	-6.13	
Mx max, т*м/м	3.2(20.60)	4.87(20.84)	4.03	
My min, т*м/м	-5.72(6.92)	-6.90(28.97)	-5.35	
My max, т*м/м	4.21(6.58)	3.56(9.87)	3.95	
Z,мм	-23.8(48.26)	-106.00(130.43)	-46	Плита перекриття верхнього поверху
Mx min, т*м/м	-5.95(6.82)	-6.34(13.82)	-5.57	
Mx max, т*м/м	2.97(19.73)	4.44(20)	3.7	
My min, т*м/м	-6.32(13.26)	-7.09(27.06)	-5.58	
My max, т*м/м	4.64(5.22)	4.07(7.71)	4.41	
Z,мм	13.7(63.66)	99.10(162.86)	-37.7	Колона 1500x0.4 останнього поверху
Ny, т/м.кв	-70.4(40.24)	-29.00(42.23)	-50.2	

Значення в дужках відображають різницю значень у порівнянні з третім способом моделювання (різниця записана у відсотках).

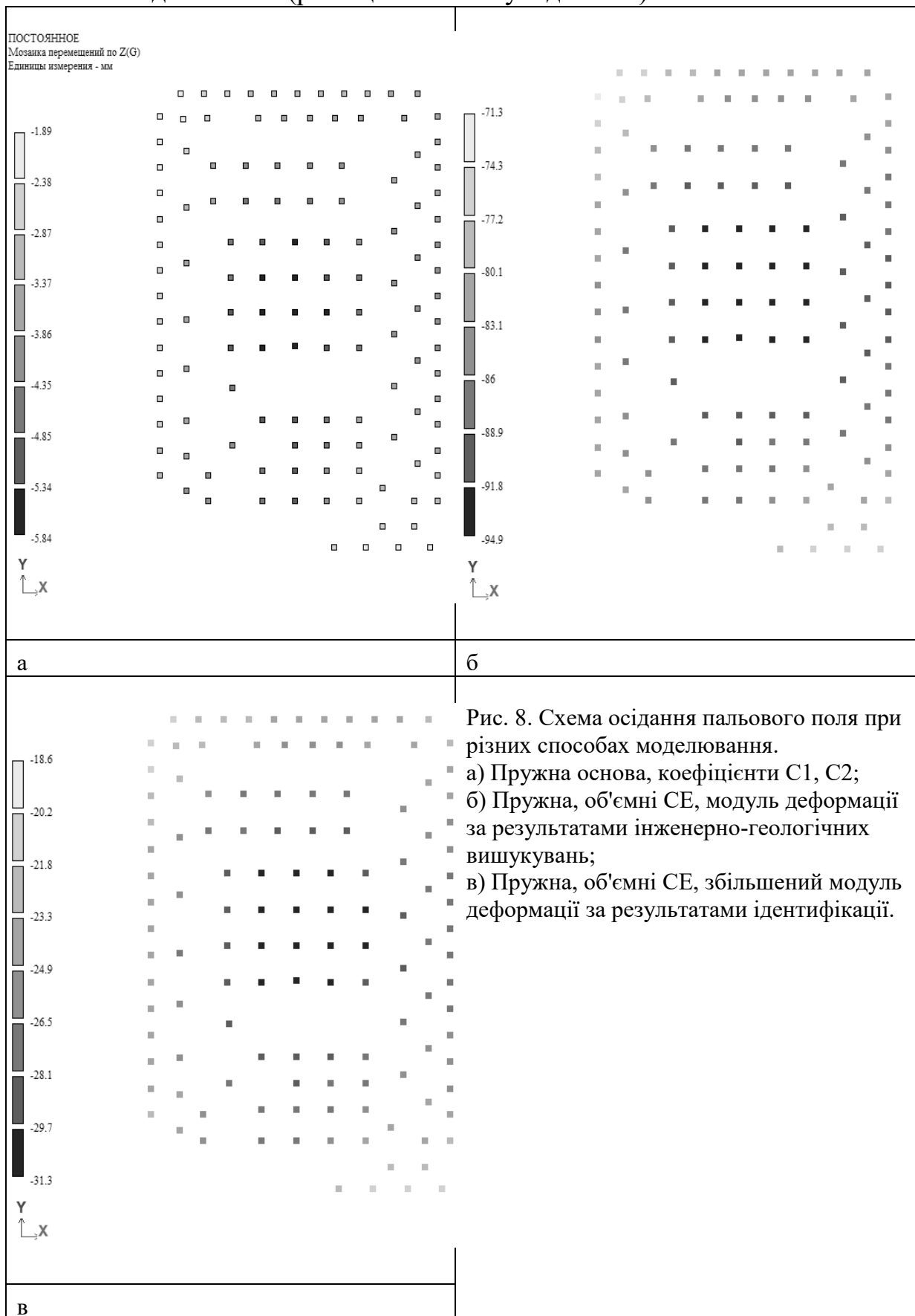


Рис. 8. Схема осідання пального поля при різних способах моделювання.  
 а) Пружна основа, коефіцієнти C1, C2;  
 б) Пружна, об'ємні SE, модуль деформації за результатами інженерно-геологічних вишукувань;  
 в) Пружна, об'ємні SE, збільшений модуль деформації за результатами ідентифікації.

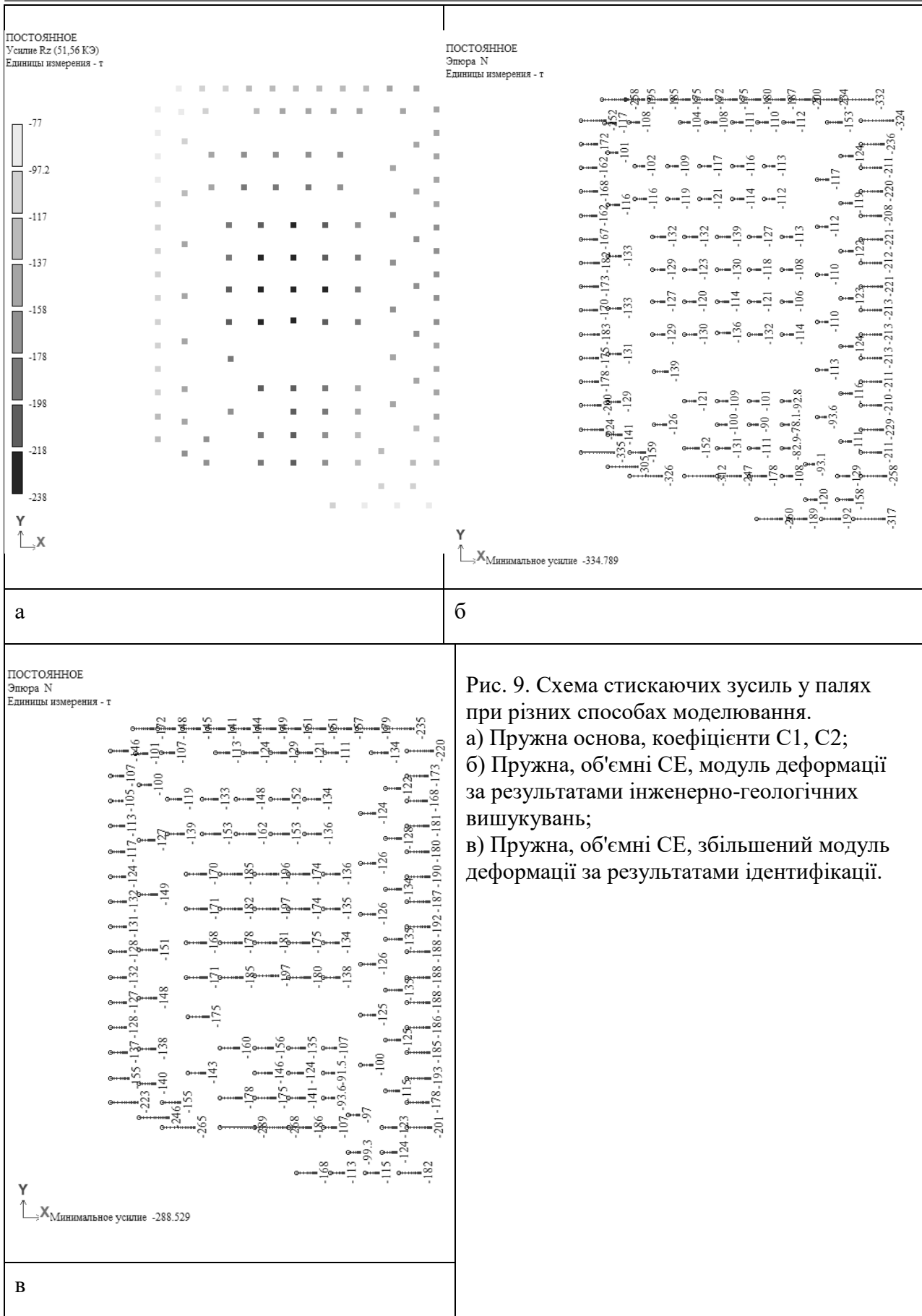
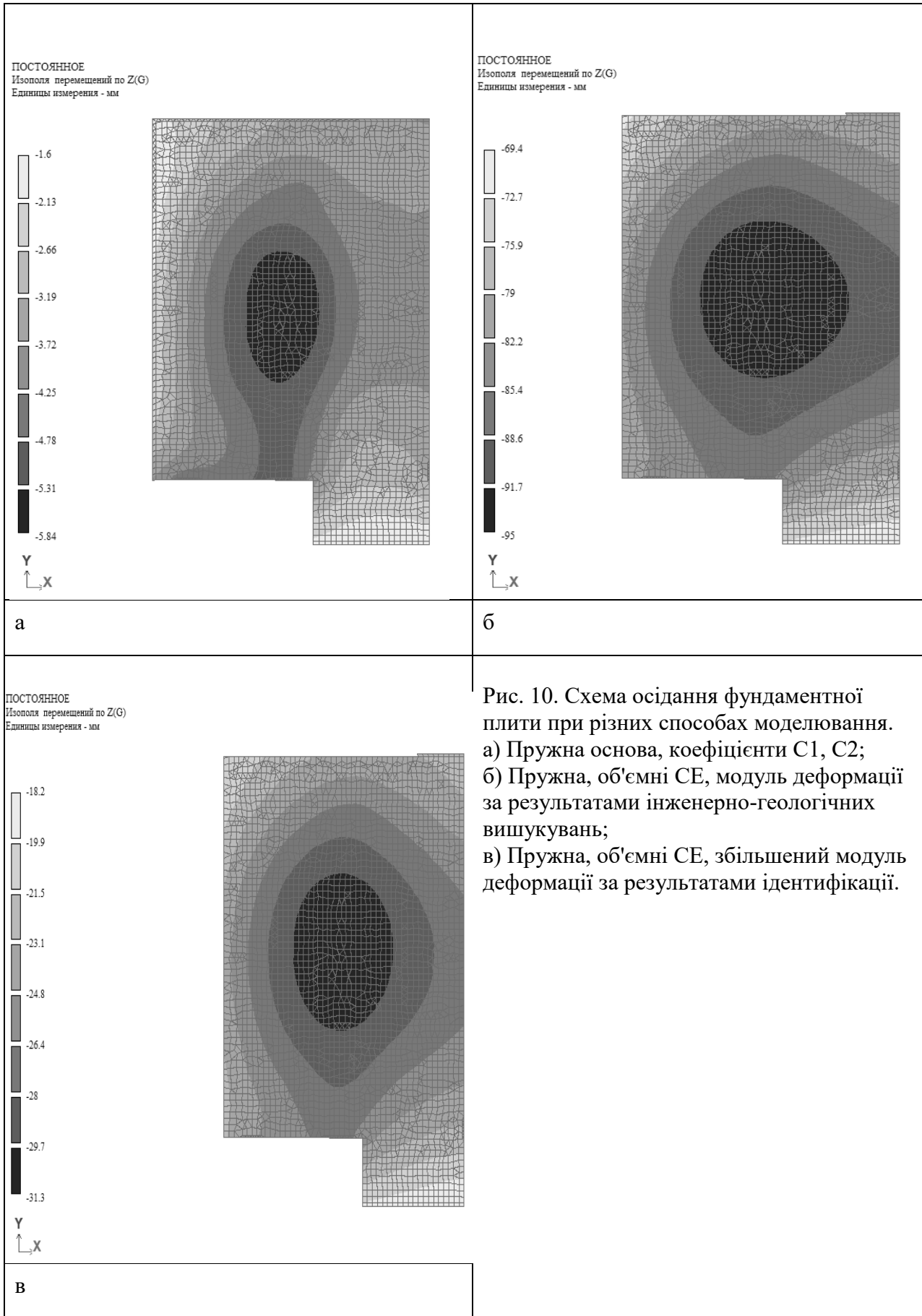


Рис. 9. Схема стискающих зусиль у палях при різних способах моделювання.  
 а) Пружна основа, коефіцієнти С1, С2;  
 б) Пружна, об'ємні СЕ, модуль деформації за результатами інженерно-геологічних вишукувань;  
 в) Пружна, об'ємні СЕ, збільшений модуль деформації за результатами ідентифікації.



Проаналізувавши отримані чисельні дослідження в програмному комплексі ЛІРА-САПР 2017 можна зробити наступні **висновки**:

1. Найменші переміщення спостерігаються в розрахунковій моделі Пастернака. В моделі з основою із об'ємних СЕ величина переміщень різко зростає. Отже, основа із об'ємних СЕ має велику піддатливість. Незважаючи на велику трудоемкість моделювання, у порівнянні із моделлю Пастернака модель основи із об'ємних СЕ дозволяє більш наглядно визначити поведінку конструкції з урахуванням заданих інженерно – геологічних умов.

2. Ідентифікація модуля деформації ґрунтів за допомогою чисельного моделювання статичного випробування палі дає змогу уточнити дійсний модуль деформації ґрунтів і завдяки цьому більш точно змодельовати роботу ґрунтового масиву як системи «основа – фундамент – надземна конструкція»

3. Аналіз пального поля при різних способах моделювання показав, що при розрахунку за першою моделлю найбільш завантаженими являються палі які знаходяться у центральній зоні, що не зовсім вірно з точки зору роботи пального поля у якому найбільші зусилля виникають саме у палях які знаходяться у периферійній зоні [8]. Даний результат показав, що модель Пастернака дає дуже наближені і далекі від реальних умов результати. Друга та третя числові моделі показують абсолютно відмінні результати у порівнянні із першою розрахунковою моделлю і більш схожі на дійсну роботу системи «основа – фундамент – надземні конструкції».

4. Установлено, що при застосуванні об'ємного багатопарового масиву максимальні напруження суттєво збільшуються, що пояснюється врахуванням роботи об'ємної багатопарової ґрунтової основи, яка впливає на зміну НДС системи «основа – фундамент – надземна конструкція». Значення повздовжніх сил в вертикальних елементах конструкції порівнюючи другу та третю моделі змінюються у межах 35% для першого поверху, у межах 10% для поверхів які знаходяться посередині будівлі і у межах 45% для верхньої частини будівлі. Аналіз результатів говорить на користь моделювання ґрунтового масиву об'ємними СЕ із проведенням ідентифікації параметрів деформативних характеристик ґрунтів.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:**

1. Барабаш М.С. «Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства» - К. – М.: сталь, 2014. -3 01 с.
2. ДБН В.2.2-24:2009. Інженерні вишукування для будівництва – Мінрегіонбуд України – Київ, 2009.
3. ДБН А.2.1-1-2014. Інженерні вишукування для будівництва – Мінрегіонбуд України – Київ, 2014.

4. ДБН В.2.1-10:2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування – Мінрегіонбуд України – Київ, 2009.
5. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчёт конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984.
6. ДБН А.2.1-1-2014. Інженерні вишукування для будівництва. – К.: Мінрегіонбуд України, 2014.
7. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – К.: Сталь, 2002. – 600 с.
8. Підлущкий В.Л. Взаємодія паль різної довжини у пальному полі / Підлущкий В.Л.//Механіка ґрунтів та фундаменти///Науково–технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві», вип.1(6). - Вінниця, 2009. – С. 48-52.

к.т.н., доцент Михайловский Д.В.,  
Комар А.А., Комар О.А.,

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

### **НАПРЯЖЕННО - ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ НА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ**

Рассмотрены алгоритмы расчета зданий на свайных фундаментах с анализом НДС надземных конструкций здания.

Ключевые слова: свайные фундаменты, моделирование.

Mykhailovskyi D.V.,  
Komar A.A., Komar O.A.,

Kyiv National University of Construction and Architecture

### **DIFFERENT WAYS OF MODELING CONSTRUCTION'S STRESS-STRAIN STATE OF HIGH RISE BUILDING WITH DEEP FOUNDATIONS.**

The algorithms of calculation with the analysis stress-strain state of above-ground structures of the building are considered.

Keywords: foundations, modeling.