

Дослідження напружено-деформованого стану ґрунтової основи та фундаментів під обладнання при значних горизонтальних навантаженнях

Ірина Жупаненко

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,
zhupanenko.iv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-6167-6552

DOI: 10.32347/0475-1132.46.2023.133-140

Анотація. В даній роботі проведено дослідження можливості розрахунку фундаментів на стійкість проти зрушення по підшві та перекидання при значних горизонтальних навантаженнях за допомогою програмно-обчислювального комплексу «ЛІРА-САПР».

Дослідження реалізовано шляхом аналізу величини горизонтальних (зсув) та вертикальних (перекидання) переміщень фундаменту під маневрову лебідку при двох варіантах інженерно-геологічних умов майданчику забудови.

Шляхом «ручного» розрахунку виявлено, що при першому варіанті інженерно-геологічних умов стійкість фундаменту забезпечена, при другому – ні. Тому такі інженерно-геологічні умови є ілюстративними для дослідження можливостей розрахунку за допомогою програмного комплексу.

Фундамент шириною $b=1,8$ м, довжиною $l=4,2$ м і висотою $h=2,35$ м моделюється об'ємними скінченними елементами. Нижній шар, який контактує з ґрунтовою основою, моделюється чотирикутними скінченними елементами плити (плита на пружній основі).

Тертя під підшвою моделюється в'язями скінченної жорсткості (одновузловими скінченними елементами), які додаються у кожному вузлі плити, що моделює нижній шар фундаменту.

Жорсткість таких скінченних елементів в напрямку глобальної осі X та осі Y визначається автоматично в системі «ГРУНТ» за методикою СНиП 2.02.05-87.

Підсумовуючи проведено дослідження, можна сказати, що розширені можливості ПК «ЛІРА-САПР», зокрема реалізація алгоритму визначення коефіцієнтів жорсткості основи за методикою СНиП 2.02.05-87, дозволяє розраховувати фундаменти на стійкість проти зрушен-



Ірина Жупаненко
доцент кафедри
опору матеріалів
к.т.н., доц.

ня по підшві та перекидання чисельними методами. Це дозволяє, по-перше, повністю автоматизувати розрахунок фундаментів, по-друге, при автоматизованому розрахунку додатково враховувати негативний вплив сусідніх фундаментів, що є актуальним, оскільки значних горизонтальних навантажень зазнають, переважно, фундаменти під машини і механізми.

Крім того, проведено дослідження виявило відсутність кінематичного критерію оцінки стійкості фундаменту. При ручному розрахунку критерієм забезпечення стійкості фундаменту проти зрушення є умова статичної рівноваги. При розрахунку методом скінченних елементів, реалізованим в ПК «ЛІРА» і подібних, визначальними є переміщення, тож вбачається перспективним дослідження питання критерію стійкості фундаменту проти зрушення по переміщеннях. Зокрема, виокремлення із загальних переміщень фундаменту величини переміщень разом з деформованою ґрунтовою основою і переміщень ковзання фундаменту по основі.

Ключові слова. Стійкість проти зсуву, плита на пружній основі, коефіцієнти жорсткості, чисельне моделювання.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Традиційний розрахунок фундаментів під машини та обладнання на дію значного

горизонтального навантаження зводиться до розрахунку основи за несучою здатністю (за II групою граничних станів) та розрахунку на стійкість проти зрушення фундаменту по підшві та проти перекидання (за I групою граничних станів). Згідно чинних норм, обидві умови міцності та стійкості зводяться до рівнянь статички (рівнянь рівноваги).

Це, на думку автора, є певною особливістю при реалізації автоматизованого розрахунку основ і фундаментів за допомогою програмних комплексів, таких як, наприклад, ЛПА.

По-перше, завдання представлення ґрунтової основи в розрахунковій схемі фундаменту найчастіше вирішується за допомогою моделі плити на пружній основі, що породжує відому проблему вибору коефіцієнтів жорсткості такої основи.

По-друге, невідомими методу скінчених елементів, що є основою розрахункових комплексів, є переміщення. Тобто визначальними в результатах розрахунку є саме переміщення і виникає питання, як співставити кінематичні умови зі статичними рівняннями, визначеними нормами проектування.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

На основі проведених автором досліджень спрощеної моделі ґрунтової основи з використанням різних методик визначення коефіцієнтів жорсткості основи [1,2] вбачається перспективним застосування розрахункової моделі плити на пружній основі при автоматизованому розрахунку фундаментів під машини та обладнання. Проте потребує окремого дослідження можливість такого моделювання при дії значного горизонтального навантаження [4].

МЕТА РОБОТИ

На прикладі розрахунку фундаментів під маневрову лебідку ЛМ10-ДП при двох варіантах нашарування ґрунтів основи дослідити можливості та достовірність моделю-

вання фундаменту розрахунковою моделлю плити на пружній основі в програмно-обчислювальному комплексі «ЛПА-САПР».

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження виконано в якості наукового консультування ТОВ «УКРТРАНСПРОЕКТ» при проектуванні фундаментів під маневрову лебідку ЛМ10-ДП на об'єктах будівництва в різних областях України, тобто при відмінних варіантах інженерно-геологічних умов майданчику.

Об'єктом дослідження є методика розрахунку фундаментів під маневрову лебідку ЛМ10-ДП, що має такі характеристики:

Тяглове зусилля на канаті, т.....10
Габаритні розміри, мм:

Довжина.....2700
Ширина.....1100
Висота.....900
Маса, кг.....2300

Розглянуто дві ділянки будівництва:
1 – Баранівський район Житомирської області; 2 – Краси́лівський район Хмельницької області.

Характерні інженерно – геологічні колонки по свердловинах наведено на Рис. 1 та Рис. 2 для майданчика будівництва 1 та майданчика будівництва 2 відповідно. В Табл. 1 та Табл. 2 представлено основні фізико-механічні характеристики ґрунтів основи для майданчика будівництва 1 та майданчика будівництва 2 відповідно.

Згідно з рекомендаціями п. 8.5 [3], глибини залягання підшви фундаментів призначаємо відповідно до інженерно-геологічних умов майданчика будівництва.

На майданчику 1 несучим шаром може бути ІГЕ-2, в який підшва фундаменту має заглибитись принаймні на 0,15 – 0,2 м. Тобто приймаємо залягання підшви фундаменту на абсолютній відмітці 235,2. Рівень планування території прийнято на відмітці 237,5 м, верхній обріз фундаменту на 0,05 м вище рівня планування. Тоді загальна висота фундаменту буде $h=2,35$ м.

Глибина свердловини 5,0м

Абсолютна відмітка устя 237,6м

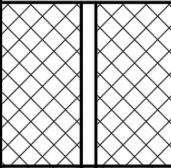

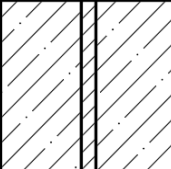
№ ПЕ	Глибина, м		Товщи- на, м	Літологічний розріз	Опис ґрунтів	Ґрунтові води		Класифі- кація по розр.
	від	до				встан.	прогн.	
1	0,0	2,2	2,2		Насипний ґрунт - супісок, суглинок темно-бурий, жовтий, з домішкою будівельного сміття, неоднорідний			3бв, 35г
2	2,2	2,7	0,5		Супісок твердий, з прошарками суглинку			3бб
3	2,7	5,0	2,3		Супісок жовтий, сіро-жовтий, пластичний з лінзами та прошарками піску та суглинку			3ба

Рис.1. Інженерно-геологічна колонка майданчика будівництва № 1
Fig.1. Engineering-geological column of the construction site № 1

Глибина свердловини 8,0м

Абсолютна відмітка устя 283,2м

№ ПЕ	Глибина, м		Товщи- на, м	Літологічний розріз	Опис ґрунтів	Ґрунтові води		Класифі- кація по розр.
	від	до				встан.	прогн.	
1Н	0,0	1,0	1,0		Насипний ґрунт - суглинок неоднорідний, з домішками гумусованих часток, із щебнем та будівельним сміттям, пухкий, злежаний			
1Р	1,0	1,4	0,4		Рослинний шар - суглинок легкий, пілуватий			
2А	1,4	2,5	1,1		Супісок пілуватий твердий лесовий, просідаючий, слабокарбонатний, із заіканнями гумусу, палево-бурий			
2	2,5	4,7	2,2		Супісок пілуватий твердий лесовий, просідаючий, слабокарбонатний, палево-жовтий			
2Б	4,7	5,5	0,8		Супісок пілуватий твердий лесовий, непросідаючий, палево-жовтий			
3	5,5	6,9	1,4		Суглинок легкий пілуватий тугопластичний лесовий, непросідаючий, сіро-жовтий			
4	6,9	8,0	1,1		Суглинок легкий пілуватий напівтвердий, озалізнений, сіро-жовтий			

Рис.2. Інженерно-геологічна колонка майданчика будівництва № 2.
Fig.2. Engineering-geological column of the construction site № 2.

Табл. 1. Показники фізико-механічних властивостей ґрунтів будівельного майданчика № 1
Table 1. Indicators of physical and mechanical properties of the soils of the site № 1

№ ПЕ	Природна вологість, д.о.	Коефіцієнт пористості, д.о.	Показник текучості	Модуль деформації, МПа	Щільність, кН/м ³		Кут внутрішнього тертя, градус		Питоме зчеплення, кПа	
	<i>W</i>	<i>e</i>	<i>I_L</i>	<i>E</i>	<i>γ_I</i>	<i>γ_{II}</i>	<i>φ_I</i>	<i>φ_{II}</i>	<i>c_I</i>	<i>c_{II}</i>
2	0,130	0,67	-0,67	15	17,6	18,0	20	23	9	14
3	0,198	0,65	0	13	18,9	19,3	19	22	8	12

Табл. 2. Показники фізико-механічних властивостей ґрунтів будівельного майданчика № 2
 Table 2. Indicators of physical and mechanical properties of the soils of the site № 2

№ ПЕ	Природна вологість, д.о.	Коеф. пористості, д.о.	Показник текучості	Модуль деформації, МПа	Щільність, кН/м ³		Кут внутрішнього тертя, градус		Питоме зчеплення, кПа	
	<i>W</i>	<i>e</i>	<i>I_L</i>	<i>E</i>	<i>γ_I</i>	<i>γ_{II}</i>	<i>φ_I</i>	<i>φ_{II}</i>	<i>c_I</i>	<i>c_{II}</i>
2А	<u>0,185</u> 0,39	1,04	<u>-0,63</u> 4,40	<u>8</u> 5	<u>14,6</u> 17,0	<u>15,3</u> 17,9	<u>11</u> 9	<u>13</u> 11	<u>4</u> 3	<u>6</u> 4
2	<u>0,15</u> 0,331	0,89	<u>-0,50</u> 2,52	<u>10</u> 6	<u>15,2</u> 17,6	<u>16,0</u> 18,5	<u>15</u> 11	<u>17</u> 13	<u>6</u> 5	<u>9</u> 7
2Б	<u>0,174</u> 0,256	0,69	<u>-0,23</u> 0,94	<u>12</u> 7	<u>17,4</u> 18,7	<u>18,3</u> 19,6	<u>20</u> 18	<u>22</u> 20	<u>11</u> 8	<u>16</u> 12
3	<u>0,204</u> 0,291	0,78	<u>0,30</u> 1,38	<u>7</u> 4,2	<u>17,0</u> 18,2	<u>17,8</u> 19,1	<u>15</u> 11	<u>17</u> 13	<u>10</u> 7	<u>15</u> 10
4	<u>0,192</u> 0,242	0,65	<u>0,10</u> 0,51	<u>12</u> 9	<u>18,2</u> 19,0	<u>19,1</u> 19,9	<u>19</u> 17	<u>20</u> 18	<u>12</u> 9	<u>18</u> 13

На майданчику 2 в якості несучого шару приймаємо ПЕ-2 – супісок пілуватий, твердий, лесовий, просідаючий. Керуючись викладеними вище міркуваннями, залягання підосви фундаменту приймаємо на рівні 280,55 м. При рівні планування 282,85 м маємо висоту фундаменту також $h=2,35$ м.

Алгоритм визначення розмірів в плані підосви фундаментів наводити не будемо, оскільки це процес ітераційний і не є об'єктом дослідження. Зосередимось на перевірці попередньо прийнятих розмірів: ширина $b=1,8$ м, довжина $l=4,2$ м.

Розрахункові навантаження приводимо до підосви фундаменту (з врахуванням ваги самого фундаменту):

$$F_v = 23 + 1,8 \times 4,2 \times 2,35 \times 25 = 467 \text{ кН,}$$

$$F_h = 100 \text{ кН,}$$

$$M = 100 \times (0,9 + 2,35) = 325 \text{ кНм.}$$

Розміри в плані підосви фундаменту перевіряємо при розрахунку за деформаціями основи виходячи з умови обмеження тисків на основу.

$$p = \frac{\sum N}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{467}{1,8 \cdot 4,2} \pm \frac{325 \cdot 6}{1,8 \cdot 4,2^2} =$$

$$= 61,8 \pm 61,4 \text{ кПа}$$

$$p_{max} = 61,8 + 61,4 = 123,2 \text{ кПа} < R(p_{st}),$$

$$p_{min} = 61,8 - 61,4 = 0,4 \text{ кПа} > 0.$$

Розрахунковий опір ґрунту під підосвою фундаменту при його ширині $b = 1,8$ м:

$$R = \frac{\gamma_{c1} \gamma_{c2}}{k} [M_\gamma k_z b \gamma_{II} + M_q d_1 \gamma'_{II} +$$

$$+ (M_q - 1) d_b \gamma'_{II} + M_c c_{II}],$$

де для обох майданчиків $k = 1$; $k_z = 1$; $d_1 = 2,3$ м; $d_b = 0$.

Для майданчика №1 (глинистий ґрунт з показником текучості $I_L < 0,25$) $\gamma_{c1} = 1,25$, $\gamma_{c2} = 1,1$; $\gamma_{II} = 18,0$ кН/м³; $\gamma'_{II} = 18,0$ кН/м³; $M_\gamma = 0,66$; $M_q = 3,65$; $M_c = 6,24$;

$$R = 357 \text{ кПа.}$$

Для майданчика №2 розрахункові значення характеристик міцності приймаємо у водонасиченому стані: $\gamma_{c1} = 1,1$, $\gamma_{c2} = 1,0$ (глинистий ґрунт з показником текучості $I_L > 0,5$) $\gamma_{II} = 18,5$ кН/м³;

$$\gamma'_{II} = 17,9 \text{ кН/м}^3; c_{II} = 7 \text{ кПа}, \phi_{II} = 13^\circ.$$

$$M_\gamma = 0,26; M_q = 2,05; M_c = 4,55;$$

$$R = 137,4 \text{ кПа. Початковий тиск просідання } p_{st} = 122 \dots 145 \text{ кПа.}$$

Таким чином, міцність і стійкість ґрунтів основи забезпечена. Перевіримо стійкість проти зрушення фундаменту по підосві. Відомо (п.8.9 [5]), що розрахунок фундаменту на зрушення по його підосві або по підосві ґрунтової подушки виконується при дії горизонтальної складової навантаження, якщо не виконується умова:

$$\text{tg } \delta = \frac{F_h}{F_v} < \sin \phi_1. \quad (1)$$

Перевіримо умову (1) для обох майданчиків:

- майданчик №1
 $100/467 = 0,214 < \sin 20^\circ = 0,342$;

- майданчик №2
 $100/467 = 0,214 > \sin 11^\circ = 0,191$.

Для майданчику №2 умова (1) не виконується, тому перевіримо розрахунком умову стійкості фундаменту проти зрушення по підшві.

Розрахунок фундаменту на стійкість проти зсуву по підшві виконується відповідно до п. 8.9.5 [3] з умови:

$$\sum F_{sa} \leq \gamma_c \sum F_{sr} / \gamma_n, \quad (2)$$

де $\sum F_{sa} = F_h + E_a = 100 + 26,5 = 126,5$ кН – сума проєкцій на площину ковзання розрахункових сил, що зрушують фундамент;

$\sum F_{sr} = F_v \cdot \operatorname{tg} \phi_1 + A \cdot c_1 + E_p =$
 $= 467 \cdot \operatorname{tg} 11^\circ + 1,8 \cdot 4,2 \cdot 5 + 32,5 = 161$ кН – сума проєкцій на площину ковзання розрахункових сил, що утримують фундамент;
 коефіцієнти $\gamma_c = 0,85$ та $\gamma_n = 1,15$ за п. 8.9.2 [3] для глинистих ґрунтів і класу наслідків СС2.

Розрахункові значення характеристик ґрунту основи приймаємо у водонасиченому стані: $c_1 = 5$ кПа, $\phi_1 = 11^\circ$.

Для ґрунту засипки відповідно до п. 7.23 [5] приймаємо:

$$\gamma'_1 = 0,95 \gamma_1 = 0,95 \cdot 17 = 16,15 \text{ кН/м}^3;$$

$$c'_1 = 0,5 c_1 = 0,5 \cdot 3,0 = 1,5 \text{ кПа},$$

$$\phi'_1 = 0,9 \phi_1 = 0,9 \cdot 9 = 8^\circ.$$

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma_1 d \lambda_p + \frac{c_1 d}{\operatorname{tg} \phi_1} (\lambda_p - 1) =$$

$$= \frac{1}{2} 16,15 \cdot 2,3 \cdot 1,323 + \frac{1,5 \cdot 2,3}{\operatorname{tg} 8} (1,323 - 1) = 32,5$$

$$E_a = \frac{1}{2} (\gamma_1 d_1 \lambda_a - 2 c_1 \sqrt{\lambda_a}) (d_1 - h_c) =$$

$$= \frac{1}{2} (16,15 \cdot 2,3 \cdot 0,755 - 2 \cdot 1,5 \sqrt{0,755}) \times$$

$$\times (2,3 - 0,214) = 26,5 \text{ кН},$$

де коефіцієнти рівні:

$$\lambda_a = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_1}{2} \right) = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{8^\circ}{2} \right) = 0,755$$

$$\lambda_p = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi_1}{2} \right) = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{8^\circ}{2} \right) = 1,323$$

$$h_c = 2 c_1 \frac{\sqrt{\lambda_a}}{\gamma_1 \lambda_a} = \frac{2 \cdot 1,5 \sqrt{0,755}}{16,15 \cdot 0,755} = 0,214 \text{ м}.$$

Перевіряємо умову (2):

$$126,5 \text{ кН} > 0,85 \cdot 161 / 1,15 = 119 \text{ кН},$$

умова (2) не виконується, стійкість фундаменту проти зсуву по підшві не забезпечена.

Розглянемо тепер можливість розрахунку фундаментів на горизонтальні навантаження за допомогою ПК «ЛПРА-САПР».

Фундамент моделюється об'ємними скінченними елементами на сітці $0,2 \times 0,2$ м. По висоті фундамент розбивається на 11 шарів товщиною $0,2$ м і верхній шар товщиною $0,15$ м. Нижній шар, який контактує з ґрунтовою основою, моделюємо чотирикутними скінченними елементами плити (плита на пружній основі).

Навантаження від лебідки вважаємо розподіленим по верхній грані фундаменту в межах площі опорної рами лебідки ($1,0 \times 2,6$ м)

Тертя під підшвою моделюється в'язями скінченної жорсткості (одновузловими скінченними елементами СЕ56), які додаються у кожному вузлі плити, що моделює нижній шар фундаменту.

Жорсткість таких скінченних елементів в напрямку глобальної осі X та осі Y визначається розрахунком за [6]. В ПК «ЛПРА-САПР» версії 2022 реалізовано наступний алгоритм розрахунку жорсткості СЕ56:

- коефіцієнт пружного рівномірного стиску C_z визначається за формулою (4) [6]:

$$C_z = b_0 E \left(1 + \sqrt{A_{10}/A} \right),$$

де b_0 – коефіцієнт, рівний для супісків і суглинків $1,2 \text{ м}^{-1}$; E – модуль деформації ґрунту під підшвою, кПа (приймається як середній по всій глибині стисливої товщі); $A_{10} = 10 \text{ м}^2$; A – площа фундаменту;

- коефіцієнти пружного рівномірного зсуву C_x , C_y визначається за форму-

лою (6) [6]:

$$C_x = C_y = 0,7C_z.$$

- на основі обчислених коефіцієнтів пружного рівномірного стиску та пружного рівномірного зсуву визначаються коефіцієнти жорсткості у відповідних напрямках. Для врахування цих жорсткостей до розрахункової схеми фундаменту додаються одновузлові СЕ, коефіцієнти жорсткості яких

обчислюється автоматично відповідно до площі навколо кожного з таких СЕ.

Результати розрахунку фундаменту за допомогою ПК «ЛІРА-САПР» представлені у вигляді ізополів переміщень плити (підшви фундаменту) по осі Y (зсув) та по осі Z (перекидання): для майданчика №1 – на Рис. 3, для майданчика №2 – на Рис. 4.

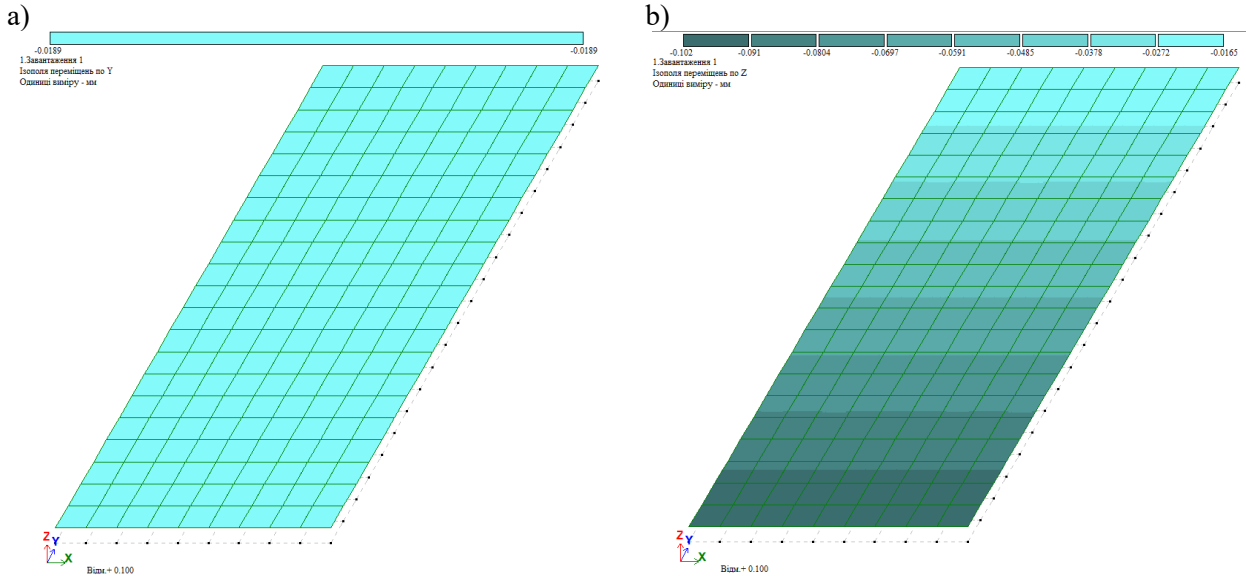


Рис.3. Ізополі переміщень підшви фундаменту на майданчику №1: a – горизонтальні переміщення (по осі Y); b – вертикальні переміщення (по осі Z).

Fig.3. Isopoles of displacements of the base of the foundation on site №1: a – horizontal displacements (along the Y axis); b – vertical displacements (along the Z axis).

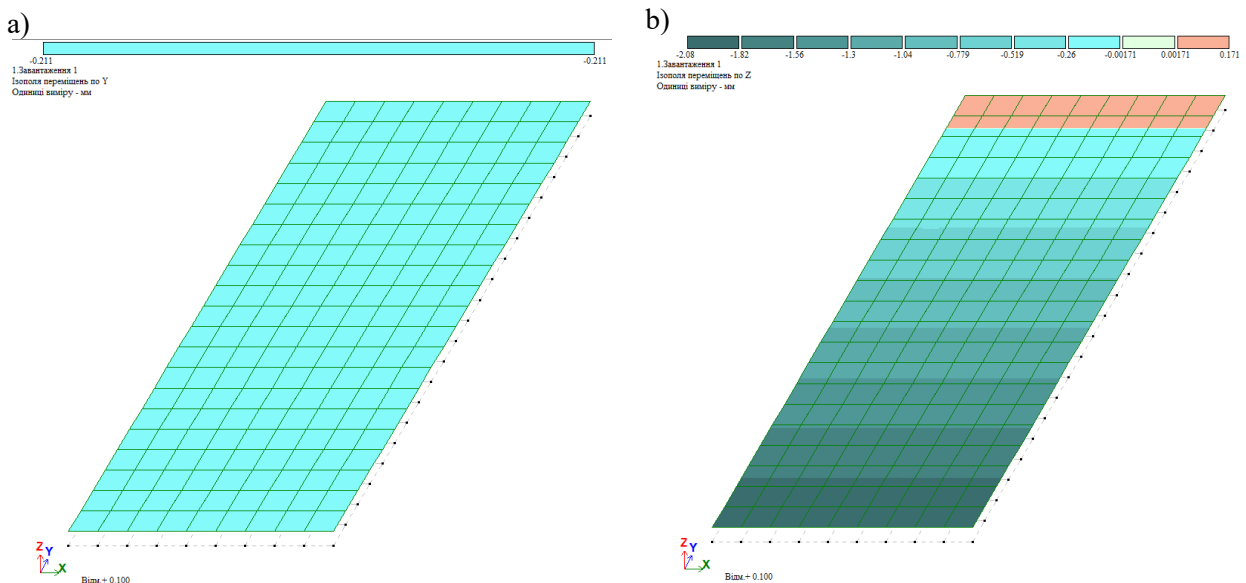


Рис.4. Ізополі переміщень підшви фундаменту на майданчику №2: a – горизонтальні переміщення (по осі Y); b – вертикальні переміщення (по осі Z).

Fig.4. Isopoles of displacements of the base of the foundation on site №2: a – horizontal displacements (along the Y axis); b – vertical displacements (along the Z axis).

Як бачимо з малюнків, переміщення вздовж осі Y на майданчику № 1 складають 0,02 мм. В той час як на майданчику № 2 ці переміщення складають 0,2 мм, тобто на порядок більше. Загалом напрошується висновок, що на майданчику №1 величина зміщень мала і зсув не відбувається. Проте залишається відкритим питання граничної величини зміщень. Тобто якою є та допустима величина переміщень, перевищивши яку відбувається зсув фундаменту.

Щодо переміщень вздовж осі Z , на майданчику № 1 всі переміщення одного знаку, тобто відбувається осідання під всією площею фундаменту. На майданчику № 2 переміщення знакоперемінні: частина підшви осідає, а частина навпаки піднімається. Це свідчить про перекидання фундаменту.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В даній роботі проаналізовано можливість розрахунку масивного фундаменту на стійкість проти зсуву та перекидання при дії значних горизонтальних навантажень за допомогою програмного комплексу «ЛІРА-САПР» версії 2022.

Проаналізовано результати розрахунку, зокрема переміщення фундаменту, при двох варіантах нашарувань ґрунтів основи. Показовими ці інженерно-геологічні умови є тим, що за результатами ручного розрахунку стійкість фундаменту на першому майданчику забезпечена, а на другому – ні.

Підсумовуючи проведені дослідження, можна сказати, що розширені можливості ПК «ЛІРА-САПР», зокрема реалізація алгоритму визначення коефіцієнтів жорсткості основи за методикою [6], дозволила автоматизувати розрахунок фундаментів на стійкість проти зрушення по підшві та перекидання. Це дозволяє, по-перше, повністю автоматизувати розрахунок фундаментів, по-друге, при автоматизованому розрахунку додатково враховувати негативний вплив сусідніх фундаментів. Оскільки значних горизонтальних навантажень зазнають, переважно, фундаменти під машини і механізми, то врахування впливу сусідніх фундаментів є вкрай актуальним пи-

танням, на думку автора.

Крім того, проведені дослідження виявило відсутність кінематичного критерію оцінки стійкості фундаменту. При ручному розрахунку критерієм забезпечення стійкості фундаменту проти зрушення є умова статичної рівноваги [4]. При розрахунку методом скінченних елементів, реалізованим в ПК «ЛІРА» і подібних, визначальними є переміщення, тож вбачається перспективним дослідження питання критерію стійкості фундаменту проти зрушення по переміщеннях. Зокрема, дослідження величини переміщень фундаменту разом з деформованою ґрунтовою основою і переміщень ковзання фундаменту по основі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жупаненко І.В. Чисельний аналіз методів розрахунку ґрунтової основи та методів визначення коефіцієнтів постелі. / І.В. Жупаненко // *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2020. – Вип. 41. – С. 64-71.
2. Жупаненко І.В. Чисельне дослідження збіжності методів визначення коефіцієнтів жорсткості при різних інженерно-геологічних умовах основи. / І.В. Жупаненко // *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. 2021. Вип. 42. С. 46-52.
3. *Основи і фундаменти будівель та споруд* ДБН В.2.1-10:2018 – [Чинний від 2019-01-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2018. – 36 с.
4. Підлуцький В.Л. Дослідження впливу складного навантаження на фундаменти неглибокого закладання та формування реактивної епюри в ґрунтовій основі / В.Л.Підлуцький // *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2022. – Вип. 45. – С. 55-67. DOI: 10.32347/0475-1132.45.2022.55-67.
5. *Настанова з проектування підпірних стін* ДСТУ-Н Б В.2.1-31:2014 [Чинний від 2015-10-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2015. – 86 с.
6. *Фундаменты машин с динамическими нагрузками* СНиП 2.02.05-87 [Чинний від 1988-07-01]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. - 32 с.

REFERENCES

1. Zhupanenko I.V. (2020). Chyselnyi analiz metodiv rozrakhunku gruntovoi osnovy ta metodiv vyznachennia koefitsientiv posteli [Numerical analysis of methods for calculating the soil base and methods for determining bed coefficients]. *Osnovu i fundamenty: Mizhvidomchyj naukovu-tekhnichnyj zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 41, 64-71 (in Ukrainian).
2. Zhupanenko I.V. (2021). Chyselne doslidzhen-nya zbizhnosti metodiv vyznachennia koefitsiyentiv zhorstkosti pry riznykh inzhenerno-heolohichnykh umovakh osnovy [Numerical study of the convergence of methods for determining bed coefficients under different geological conditions of the base]. *Osnovu i fundamenty: Mizhvidomchyj naukovu-tekhnichnyj zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 42, 46-52 (in Ukrainian).
3. Osnovy i fundamenty budivel' ta sporud DBN V.2.1-10:2018. (2018) – [Chynnyy vid 2019-01-01]. – Kyiv: Minrehionbud Ukrayiny, 36 (in Ukrainian).
4. Pidlutskyi V.L. (2022). Doslidzhenia vplyvu skladnoho navantazhennia na fundamenty nehlybokoho zakladannia ta formuvannia reaktyvnoi epiury v gruntovii osnovi [Investigation of the impact of complex loading on the shallow foundations and the formation of a reactive layer in the soil base]. *Osnovu ta fundamenty: Naukovu-tekhnichnyj zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 45, 55-67 (in Ukrainian). DOI: 10.32347/0475-1132.45.2022.55-67
5. Nastanova z proektuvannia pidpirnykh stin DSTU-N B V.2.1-31:2014(2015) [Chynnyy vid 2015-10-01]. – Kyiv: Minrehionbud Ukrayiny. 86 (in Ukrainian).
6. Fundamenty mashin s dinamicheskimi nagruzkami SNiP 2.02.05-87 (1988) [Chinniy vid 1988-07-01]. – M.: TSITP Gosstroya SSSR, 32 (in Russian).

Study of the stress-deformation state of the soil base and foundations for equipment under significant horizontal loads

Iryna Zhupanenko

Summary. The study of the possibility of calculating foundations for stability against displacement along the sole and overturning under significant horizontal loads was carried out by the LIRA-SAPR computer software complex.

The study was carried out by analyzing the amount of horizontal (sliding) and vertical (overturning) displacement of the foundation under the shunting winch under two variants of the engineering and geological conditions of the construction site.

Through "manual" calculation, it was found that the stability of the foundation is ensured in the first variant of geological conditions, but not in the second one. Therefore, such geological conditions are illustrative for the study of calculation possibilities using the software complex.

The foundation with width $b=1.8$ m, length $l=4.2$ m and height $h=2.35$ m is modeled by volume finite elements. The bottom layer, which is in contact with the soil base, is modeled by quadrilateral finite elements of the slab (slab on an elastic base).

Friction under the footing is modeled by finite stiffness links (single-node finite elements) that are added at each node of the slab that models the bottom layer of the foundation.

The stiffness of such finite elements in the direction of the global axis X and axis Y is determined automatically in the "GRUNT" system according to the methodology of SNiP 2.02.05-87.

Summarizing the conducted research, we can say that the advanced capabilities of the LIRA-SAPR PC, in particular, the implementation of the algorithm for determining the stiffness coefficients of the base according to the SNiP 2.02.05-87 method, allow calculating foundations for resistance against displacement along the sole and overturning by numerical methods. This allows, firstly, to completely automate the calculation of the foundations, and secondly, during the automated calculation, the negative influence of the neighboring foundations is additionally taken into account, which is relevant, since the foundations for machines and mechanisms are mainly subjected to significant horizontal loads.

In addition, the conducted research revealed the absence of a kinematic criterion for assessing the stability of the foundation. In manual calculation, the criterion for ensuring the stability of the foundation against displacement is the condition of static equilibrium. When calculating by the method of finite elements, implemented in PC "LIRA" and similar, displacements are decisive, so it is considered promising to study the issue of the criterion of stability of the foundation by displacements.

Key words. Shear resistance, slab on the elastic base, stiffness coefficients, numerical modeling.