

УДК 624.131:624.15

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.07.1106

ОБГРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МОДЕЛІ ГРУНТОВОЇ ОСНОВИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПОРЯД РОЗТАШОВАНИХ РІЗНОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ

САМОРОДОВ О. В.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,

ТАБАЧНИКОВ С. В.², *канд. техн. наук, доц.*,

ЄСАКОВА С. В.³, *канд. техн. наук, доц.*,

КРОТОВ О. В.⁴, *канд. техн. наук*

^{1*} Кафедра геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (050) 301-76-99, e-mail: osamorodov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4395-9417

² Кафедра геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (093) 253-02-86, e-mail: s.v.tabachnikov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2619-8612

³ Кафедра геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (050) 908-68-62, e-mail: esakova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-6598-5929

⁴ Кафедра геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (050) 401-41-56, e-mail: krotov.project@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7588-1370

Анотація. *Постановка проблеми.* У галузі будівництва багатоповерхових і висотних будівель при значних навантаженнях на основу, особливо при наявності зверху слабких водонасичених ґрунтів, як правило, застосовують пальово-плитні фундаменти для виконання вимог нормативного документа за гранично допустимими деформаціями. Можливість застосування у цьому випадку плитних фундаментів повинна бути підтверджена розрахунками з науково-технічним обґрунтуванням прийнятої моделі ґрунтової основи та її параметрів. *Мета статті* є обґрунтування удосконаленої моделі ґрунтової основи у вигляді суцільного «ступінчастого» шару скінченної розподільчої здатності та її параметрів на підставі порівняння результатів чисельних розрахунку та спостережень за осіданнями двох поряд розташованих багатоповерхових будівель на плитних фундаментах в процесі будівництва та експлуатації. **Висновки.** Виконано моделювання та розрахунок поряд розташованих плитних фундаментів двосекційної багатоповерхової будівлі з урахуванням різної поверховості секцій в процесі будівництва у системі «основа – фундаменти – споруди», що взаємодіє із удосконаленою моделлю ґрунтової основи у вигляді суцільного «ступінчастого» шару скінченної розподільчої здатності з різними законами деформування ґрунтів. Результати досліджень підтвердили можливість застосування удосконаленої моделі ґрунтової основи для прогнозування деформацій різноповерхових секційних будівель на великорозмірних плитних фундаментах, в основі яких з поверхні залягають слабкі водонасичені піщані ґрунти. Результати чисельних досліджень показують, що врахування у моделі основи різних величин стисливих товщ під різнонавантаженими фундаментами у поєднанні із законом деформування ґрунту «Hardening Soil» дозволяє найбільш точно моделювати характер горизонтальних переміщень (кренів) кожної із секцій двосекційної будівлі.

Ключові слова: *різноповерхова будівля; плитні фундаменти; ґрунтова основа; стислива товща; модель; удосконалення; натурні спостереження; осідання; крен*

JUSTIFICATION OF THE IMPROVED SOIL BASE MODEL FOR THE CALCULATION OF DIFFERENTLY-STOREYED BUILDINGS

SAMORODOV O.V.^{1*}, *Dr Sc. (Tech.), Prof.*,

TABACHNIKOV S.V.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

YESAKOVA S.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

KROTOV O.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, St. Marshal Bazhanov, Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (050) 301-76-99, e-mail:

osamorodov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4395-9417

² Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, St. Marshal Bazhanov, Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (093) 253-02-86, e-mail: s.v.tabachnikov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2619-8612

³ Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, St. Marshal Bazhanov, Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (050) 908-68-62, e-mail: esakova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-6598-5929

⁴ Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, St. Marshal Bazhanov, Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (050) 401-41-56, e-mail: krotov.project@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7588-1370

Abstract. Formulation of the problem. In the field of construction of multi-story and high-rise buildings, with significant loads on the foundation, especially in the presence of weak water-saturated soils on top, pile-slab foundations are usually used to meet the requirements of the normative document [4] for maximum permissible deformations. The possibility of using slab foundations in this case must be confirmed by calculations with a scientific and technical justification of the accepted model of the soil foundation and its parameters. **The purpose of the** is to substantiate the application of the model of the soil base in the form of an elastic layer of finite width and its parameters based on observations of the subsidence of adjacent multi-story buildings on slab foundations during the construction process and to compare the actual values of foundation deformations with calculated. **Conclusions.** Modeling and calculation have been performed for adjacent slab foundations of a two-section multi-story building, taking into account the different floor counts of the sections during construction in the “base – foundations – structures” system. This system interacts with an improved soil base model, represented as a continuous “stepped” layer of finite distributive capacity with different soil deformation laws. The research results confirmed the possibility of using the improved soil base model for predicting the deformations of differently-storeyed sectional buildings on large slab foundations, where weak water-saturated sandy soils lie close to the surface. Numerical studies indicate that considering different compressible layer thicknesses under variably loaded foundations in the base model, combined with the “Hardening Soil” deformation law, allows for the most accurate modeling of the horizontal displacements (tilts) of each section of the two-section building.

Keywords: *differently-storeyed building; slab foundations; soil base; compressible layer; model; improvement; field observations; settlement; tilt*

Мета. Метою роботи є обґрунтування удосконаленої моделі ґрунтової основи у вигляді суцільного «ступінчастого» шару скінченної розподільчої здатності [6; 21] та її параметрів на підставі порівняння результатів чисельних розрахунків та спостережень за осіданнями двох поряд розташованих багатопверхових будівель на плитних фундаментах в процесі будівництва та експлуатації.

Вступ. Ще з минулого сторіччя при інженерних розрахунках основ та фундаментів широко застосовувалася модель ґрунтової основи у вигляді суцільного лінійно-деформованого шару, так як вона пропонувалася державними будівельними нормами, в тому числі й сучасними [4] та вимагає завдання лише товщини шару H (стисливої товщі) та деформаційних характеристик ґрунту (модуля загальної деформації E та коефіцієнта Пуассона ν). При цьому, ця аналітична модель не має обмежень у плані. Сьогодні, через потужний розвиток

інформаційних технологій, при моделюванні та чисельних розрахунках системи «основа – фундаменти – споруди» («ОФС») у потужних розрахункових комплексах SOFiSTiK, ABAQUS, Plaxis, SCAD, Ліра тощо, як правило, у просторовій постановці задачі застосовується модель ґрунтової основи у вигляді *суцільного шару скінченної розподільчої здатності* (рис. 1) [8–16; 21] яка, крім обмеження вертикальних деформацій на деякій глибині H , також має обмеження горизонтальних деформацій на відстані від навантаження у плані ($B \times L$).

Такі граничні умови моделі ґрунтуються на тому, що при дії зовнішніх навантажень на ґрунтову основу утворюється просторова область деформування, за межами якої деформаціями ґрунту можна знехувати, так як додаткове навантаження на межах ґрунтового масиву не перевищує структурної міцності ґрунту [15]. При цьому для самої моделі можуть задаватися будь-які закономірності деформування ґрунтів під

навантаженнями, в тому числі й у часі.

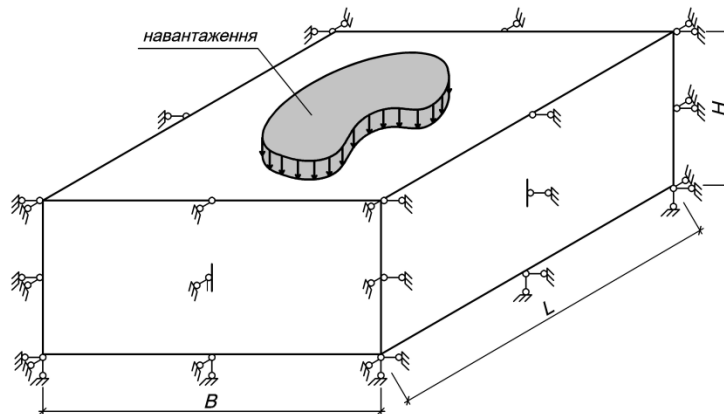


Рис. 1. Модель ґрунтової основи у вигляді суцільного шару скінченної розподільчої здатності (для просторових задач)

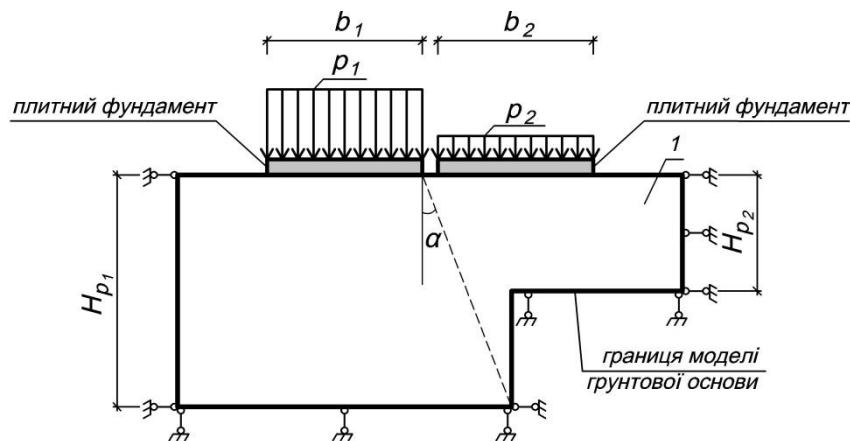


Рис. 2. Приклад побудови нижньої границі удосконаленої моделі ґрунтової основи у вигляді ССШСРЗ

Для розрахунку фундаментів в умовах плоскої деформації ця модель також може бути плоскою, як окремий випадок, яка має відому назву – модель **суцільного шару скінченної ширини** [1].

Матеріали і методи досліджень. Пропонується удосконалена модель ґрунтової основи у вигляді суцільного «ступінчастого» шару скінченної розподільчої здатності (ССШСРЗ), яка дає змогу адекватно враховувати взаємодію великорозмірних фундаментів поряд розташованих різноповерхових споруд [6; 21]. Модель ґрунтової основи у вигляді ССШСРЗ має параметри фізико-механічних характеристик ґрунтів основи, геометричний профіль з урахуванням їх розподільчої здатності та різні граничні умови для моделювання та розрахунку системи «ОФС», але відрізняється тим, що її нижня границя має ступінчастий

геометричний профіль через різні величини стисливих товщ під кожним фундаментом споруд.

На рисунку 2 показано приклад побудови ступінчастої границі нижнього шару удосконаленої моделі ґрунтової основи 1, яка має параметри фізико-механічних характеристик ґрунтів основи і розподільчу здатність, що враховується кутом α [8], та різні величини стисливих товщ (активних зон деформування) $H_{p,i}$ під кожним фундаментом споруд шириною b_i , які передають навантаження на основу p_i .

Об'єктом дослідження є деформації ґрунтової основи плитних фундаментів поряд розташованих житлових шістнадцятиповерхових будівель з підземним та технічним поверхами. Район будівництва – Україна, м. Харків, Основ'янський район, вул. Лисаветинська, 2Б. Загальний вигляд розташування будівель

представлений на рисунку 3 (дослідна будівля 7, секції 1, 2).



Рис. 3. Розташування дослідної будівлі 7 (секції 1 та 2) в процесі зведення

Секції будівлі є подібними, а в плані кожна секція є дзеркальним відображенням поряд розташованої.

Конструктивна схема будівель – безкаркасна. Конструктивна схема перекриття – залізобетонні пустотні плити. Просторова жорсткість будинку забезпечується за рахунок роботи горизонтальних і вертикальних несучих конструкцій (рис. 8).

Несучими елементами будівель є:

- цегляні стіни з силікатної цегли товщиною 150, 250, 380 та 510 мм;
- збірні залізобетонні перекриття, що виконані з багатопустотних залізобетонних плит товщиною 220 мм;
- стіни підвалу збірні з бетонних блоків товщиною 500 мм.

В геологічній будові досліджуваної території до глибини 20,0 м (зверху вниз) беруть участь неоген-четвертинні відкладення, які представлено аллювіально-делювіальними суглинками та пісками, які

перекрито незначним шаром насипних ґрунтів. Нижче залягають зеленувато-сірі та блакитно-сірі глини та зеленуваті піщаники верхнього палеогену які підстилаються глинами київської підсвіти та піщаниками середнього палеогену. Гідрогеологічні умови території вишукувань характеризуються наявністю четвертинного постійного слабонапірного алювіального водоносного горизонту. Сталий рівень підземних вод за період досліджень (червень 2020 р.) зафіксовано на глибинах: 1,8...3,3 м (абс. відмітки 101,51–102,92 м). Територія підтоплена. У паводковий період і при інтенсивних атмосферних опадах рівень підземних вод може досягати відміток близьких поверхні землі.

Схема розташування свердловин представлена на рисунку 4.

Інженерно-геологічний розріз з умовним розташуванням фундаментних плит наведено нижче на рисунку 5.

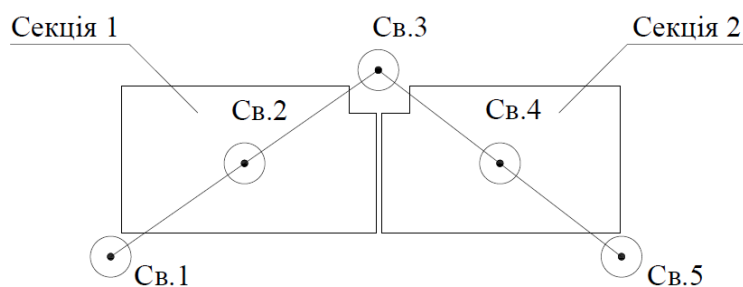


Рис. 4. Схема розташування свердловин

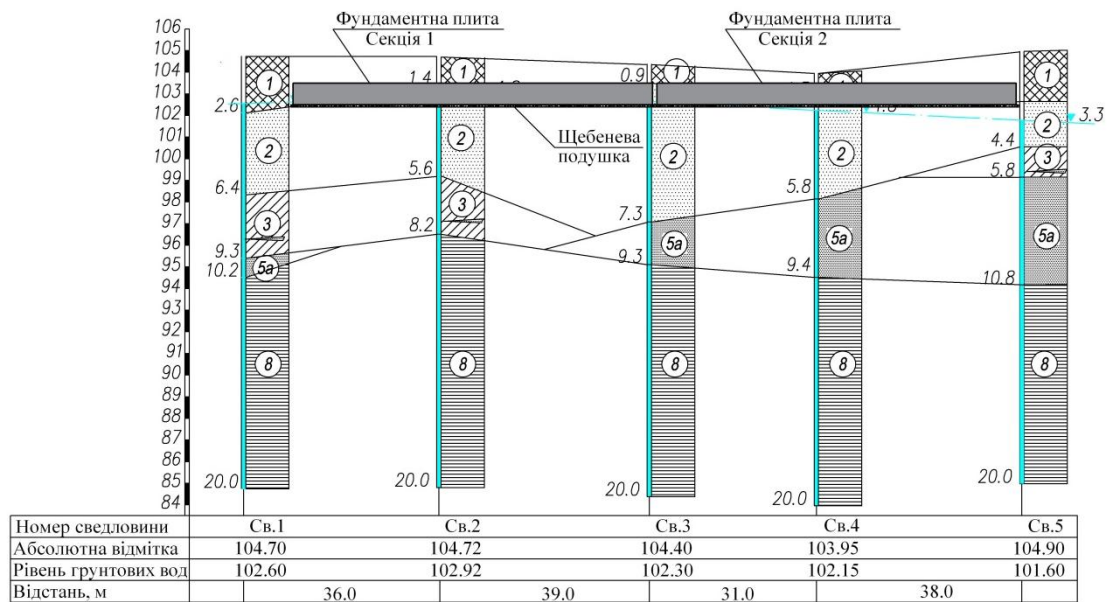


Рис. 5. Інженерно-геологічний розріз

Опис та фізико-механічні властивості ґрунтів представлені в таблиці 1 і 2 (значення питомої ваги ґрунту, питомої ваги водонасиченого ґрунту, модуля деформації, кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення представлені як розрахункові при довірчій ймовірності 0,85. Додатково вказано штамповий модуль деформації E верхньої зони пісків ІГЕ-2, що ущільненні втрамбуванням щебеню катком та утворенням щебеневої подушки товщиною 200 мм).

В якості фундаментів житлових будівель прийняті залізобетонні фундаментні плити товщиною 1000 мм. Низ фундаментних плит прийнято на абс. відмітці 102,80 м.

Ґрунтовою основою фундаментів є ІГЕ-2 – піски дрібні, від малого ступеня водонасичення до насичених водою,

середньої щільності з модулем деформації у водонасиченому стані – $E = 28,0$ МПа (згідно зі звітом з інженерно-геологічних вишукувань). Однак, на підставі додатково проведених штампових випробувань покрівлі пісків ІГЕ-2, що були ущільненні втрамбуванням щебеню катком з утворенням щебеневої подушки товщиною 200 мм – загальний модуль деформації дорівнює $E = 9,0$ МПа, що було й прийнято у розрахунках.

Результати дослідження. Максимальний середній тиск під фундаментною плитою тільки від власної ваги зведених конструкцій без введення підвищувальних коефіцієнтів не перевищує розрахункового опору ґрунту основи: $p = 230,02$ кПа $<$ $R = 388,0$ кПа.

Таблиця 1

Найменування та опис ґрунтів

Номер ІГЕ	Найменування та опис ґрунтів
ІГЕ-1	Насипні ґрунти – суглинки, піски з включенням будівельного сміття, відсипані сухим способом, характеризуються неоднорідним складом, нерівномірною щільністю та стисливістю, з залишками похованих фундаментів, злежані та незлежані, товщина шару до 2,6 м.
ІГЕ-2	Піски жовто-сірі, сірі дрібні, від малого ступеня водонасичення до насичених водою, середньої щільності (зверху – пухкі), однорідні, з прошарками суглинків та супісків, товщина шару до 5,6 м.
ІГЕ-3	Суглинки зеленувато-сірі, тугопластичної консистенції, в водонасиченому стані – м'якопластичної консистенції, в підшві з лінзами пісків пилуватих, товщина шару до 2,9 м.
ІГЕ-5а	Піски сірі, зеленувато-сірі, голубувато-сірі, дрібні, насичені водою, товщина шару до 5,0 м.
ІГЕ-8	Глини голубувато-сірі, від напівтвердої до тугопластичної консистенції, з прошарками пісковиків, товщина шару до 11,8 м.

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості ґрунтів

Характеристика ґрунту	Умовні позначення	Одиниці вимірювання	Шар				
			ПЕ-1	ПЕ-2	ПЕ-3	ПЕ-5а	ПЕ-8
Питома вага ґрунту	γ	кН/м ³	–	18,88	19,40	19,22	16,74
Питома вага водонасиченого ґрунту	γ_{sat}	кН/м ³	–	19,45	19,60	20,23	16,88
Питома вага частин ґрунту	γ_s	кН/м ³	–	26,09	26,68	20,15	26,74
Питома вага зваженого в воді ґрунту	γ_{sb}	кН/м ³	–	9,97	9,99	10,65	7,47
Природна вологість	W	д. од.	–	0,19	0,22	0,19	0,38
Коефіцієнт пористості	e	д. од.	–	0,63	0,68	0,54	1,06
Питома зчеплення ґрунту	c	кПа	–	2	23	4	37
Кут внутрішнього тертя	ϕ	град.	–	33	18	36	17
Модуль деформацій в природному/ водонасиченому станах	E	МПа	–	-/28(9*)	-/15	-/38	-/13
Показник текучості водонасиченого ґрунту	I_L	д. од.	–	–	0,60	–	0,24
Число пластичності	I_p	д. од.	–	–	0,11	–	0,28

* – значення отримано за результатами штампових випробувань.

Моделювання системи «основа – фундаменти – споруди» та результати розрахунків.

Для дослідження впливу удосконаленої моделі ґрунтової основи за допомогою комплексу PLAXIS 3D створено скінченно-елементну модель системи «основа – фундаменти – споруди», яка складається з ґрунтової основи та двосекційної 17-поверхової споруди на плитних фундаментах.

Елементи конструкції будівлі, а саме плитні фундаменти, стіни, перекриття та покриття, змодельовано пластинчатими скінченними елементами із використанням пружної моделі матеріалу з параметрами, наведеними у таблиці 3. Ґрунтова основа змодельована у вигляді ССШСРЗ об'ємними скінченними елементами з фізико-

механічними характеристиками відповідно до інженерно-геологічних умов майданчику будівництва (рис. 5, табл. 2). Потужність (товщина) шару обмежувалася величиною стисливої товщі для кожного етапу навантаження ґрунтової основи від збудованого будівельного об'єму.

При моделюванні ґрунтової основи розглянуто три основні моделі поведінки ґрунтів [18]: лінійно-пружна модель (модель Linear Elastic (LE)), Модель Мора-Кулона (модель Mohr-Coulomb (MC)), Пружнопластична модель зі зміцненням ґрунту (модель Hardening Soil (HS)).

У таблиці 4 наведено основні прийняті параметри ґрунтів основи для кожної з трьох обраних моделей.

Таблиця 3

Параметри конструкцій споруд

Параметр	Модель матеріалу	Структурний параметр матеріалу	Товщина	Питома вага	Модуль пружності	Коефіцієнт Пуассону
Познач.	<i>Model</i>	<i>Type</i>	<i>d</i>	γ	E	ν
Од. вимір.		–	м	кН/м ³	кН/м ²	од.
Фундаментна плита	Elastic	Непор.	1,0	25,0	$30,0 \cdot 10^6$	0,2
Стіна із фундаментних блоків	Elastic	Непор.	0,5	25,0	$30,0 \cdot 10^6$	0,25
Цегляна стіна	Elastic	Непор.	0,15 / 0,25 / 0,38 / 0,51	19,0	$3,2 \cdot 10^6$	0,25
Плита перекриття	Elastic	Непор.	0,14	25,0	$30,0 \cdot 10^6$	0,2

Прийняті основні параметри ґрунтової основи для різних моделей

Номер ІГЕ	Найменування та опис ґрунтів	Linear elastic (LE)	Mohr-Coulomb (MC)	Hardening Soil (HS)
ІГЕ-2	Піски жовто-сірі, сірі дрібні, від малого ступеня водонасичення до насичених водою, середньої щільності (зверху – пухкі), однорідні, з прошарками суглинків та супісків	$E' = 9000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,3$	$E' = 9000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,3$ $c'_{\text{ref}} = 2 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 33^\circ; \psi = 3^\circ$ $e_{\text{init}} = 0,63$	$E_{50}^{\text{ref}} = 9000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 9000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 27000 \text{ кН/м}^2$ $c'_{\text{ref}} = 2 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 33^\circ; \psi = 3^\circ; e_{\text{init}} = 0,63$
ІГЕ-3	Суглинки зеленувато-сірі, тугопластичної консистенції, в водонасиченому стані – м'якопластичної консистенції, в підшві з лінзами пісків пілуватих	$E' = 15000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,35$	$E' = 15000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,35$ $c'_{\text{ref}} = 23 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 18^\circ; \psi = 0^\circ$ $e_{\text{init}} = 0,68$	$E_{50}^{\text{ref}} = 15000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 15000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 45000 \text{ кН/м}^2$ $c'_{\text{ref}} = 23 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 18^\circ; \psi = 0^\circ; e_{\text{init}} = 0,68$
ІГЕ-5а	Піски сірі, зеленувато-сірі, голубувато-сірі, дрібні, насичені водою	$E' = 38000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,3$	$E' = 38000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,3$ $c'_{\text{ref}} = 4 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 36^\circ; \psi = 6^\circ$ $e_{\text{init}} = 0,54$	$E_{50}^{\text{ref}} = 38000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 38000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 114000 \text{ кН/м}^2$ $c'_{\text{ref}} = 4 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 36^\circ; \psi = 6^\circ; e_{\text{init}} = 0,54$
ІГЕ-8	Глини голубувато-сірі, від напівтвердої до тугопластичної консистенції, з прошарками пісковиків	$E' = 13000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,4$	$E' = 13000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,4$ $c'_{\text{ref}} = 37 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 17^\circ; \psi = 0^\circ$ $e_{\text{init}} = 1,06$	$E_{50}^{\text{ref}} = 13000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 13000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 39000 \text{ кН/м}^2$ $c'_{\text{ref}} = 37 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 17^\circ; \psi = 0^\circ; e_{\text{init}} = 1,06$

Лінійно-пружна модель (модель Linear Elastic (LE)). Лінійно-пружна модель заснована на законі Гука для ізотропної пружності. У цій моделі містяться всього два основних параметри: модуль Юнга (модуль пружності) E , кН/м^2 та коефіцієнт Пуассону ν , од. Для формування початкового напруженого стану ґрунтової основи, як і в інших застосованих моделях, враховувалась питома вага ґрунту γ , кН/м^3 , враховуючи гідрогеологічні умови ділянки вишукувань.

Модель Мора-Кулона (модель Mohr-Coulomb (MC)). Пружноідеалопластична Модель Мора-Кулона містить п'ять вхідних параметрів: E , кН/м^2 і ν , од. – деформаційні параметри ґрунту, φ , $^\circ$ і c , кН/м^2 – міцнісні параметри ґрунту, та ψ , $^\circ$ – кут дилатації.

Пружнопластична модель зі зміцненням ґрунту (модель Hardening Soil (HS)). У цій моделі, як і в моделі Мора-Кулона, граничний напружений стан описується за допомогою кута тертя φ , $^\circ$, зчеплення c , кН/м^2 і кута дилатації ψ , $^\circ$.

Жорсткість ґрунту задається трьома різними вхідними показниками: жорсткість при тривісному навантаженні E_{50} , кН/м^2 , жорсткість при розвантаженні E_{ur} , кН/м^2 і жорсткість при навантаженні в одометрі E_{oed} , кН/м^2 . В якості значень за замовчуванням пропонуються співвідношення $E_{\text{ur}} \approx 3E_{50}$ і $E_{\text{oed}} \approx E_{50}$. На відміну від моделі Мора-Кулона, пружнопластична модель зі зміцненням ґрунту враховує також залежність модуля жорсткості від напружень. Це означає, що всі параметри жорсткості збільшуються зі збільшенням тиску. Таким чином, всі три значення вхідної жорсткості відносяться до конкретного еталонного напруження, яке зазвичай приймається рівним 100 кПа.

На рисунках 6 та 7 представлено загальні вигляди послідовного створення досліджуваної системи «основа – фундаменти – споруди».

В якості навантажень враховано власну вагу несучих та огорожуючих конструкцій.

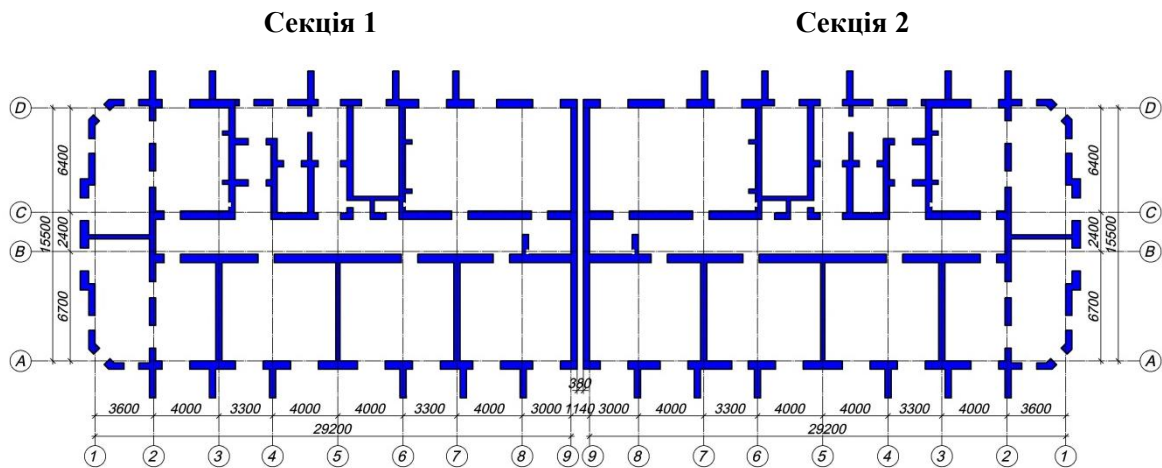


Рис. 6. Загальні вигляди послідовного створення досліджуваної системи «основа – фундаменти – споруди»: план розташування вертикальних несучих елементів будівель

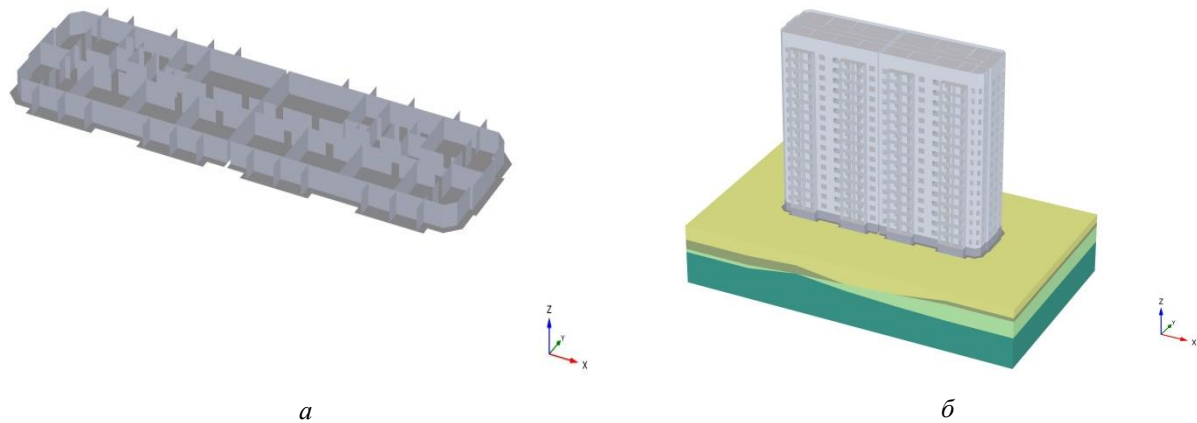


Рис. 7. Загальні вигляди послідовного створення досліджуваної системи «основа – фундаменти – споруди»: а) схема з'єднання вертикальних несучих елементів з плитними фундаментами; б) система «основа – фундаменти – споруди»

Згідно із розрахунками [4; 17], без урахування рекомендацій щодо мінімального значення, стислива товща основи прийнята $H_c = 2,0$ м при середньому тиску під подошвою фундаментної плити $p_{\text{сер.}} = 24,95$ кПа, що відповідає власній вазі конструкцій при зведенні цокольного поверху; $H_c = 9,5$ м при $p_{\text{сер.}} = 65,21$ кПа (поверховості $n = 3$ – три зведених поверхів), $H_c = 10,5$ м при $p_{\text{сер.}} = 98,55$ кПа (поверховості $n = 6$ – шість зведених поверхів), $H_c = 11,0$ м при $p_{\text{сер.}} = 120,40$ кПа (поверховості $n = 8$ – вісім зведених поверхів), $H_c = 13,5$ м при $p_{\text{сер.}} = 153,21$ кПа (поверховості $n = 11$ – одинадцять зведених поверхів), $H_c = 16,0$ м при $p_{\text{сер.}} = 191,60$ кПа (поверховості $n = 14$ – чотирнадцять зведених поверхів) $H_c = 18,0$ м при $p_{\text{сер.}} = 230,02$ кПа (поверховості $n = 17$ –

сімнадцять зведених поверхів).

На першому етапі методом скінченних елементів проведено чисельні розрахунки напружено-деформованого стану системи «основа – фундаменти – споруди» з однаковою максимальною стислою товщею моделі ґрунтової основи у вигляді ССШСРЗ, як показано на рисунку 1.

Вертикальні (за глибиною) та горизонтальні (у плані) границі було обмежено на відстані, яка дорівнювала величині стислої товщі $H_c = 18,0$ м при повному навантаженні. Тобто розподіл стискаючих напружень за глибиною прийнято під кутом $\alpha = 45^\circ$ до вертикалі від країв навантажених фундаментів [8].

Потужність (товщина) шару обмежувалася величиною стислої товщі для кожної стадії навантаження ґрунтової

основи від збудованого будівельного об'єму.

Для врахування зміни потужності активної зони (стислої товщі) під фундаментами в процесі збільшення навантаження на ґрунтову основу застосовано простий підхід з моделювання,

де прийнято практично недеформований жорсткий матеріал із значним модулем пружності $E = 100,0 \cdot 10^9$ кН/м² нижче за максимальну розрахункову границю відповідно до найбільш навантаженої секції при відповідній кількості збудованих поверхів (рис. 8).

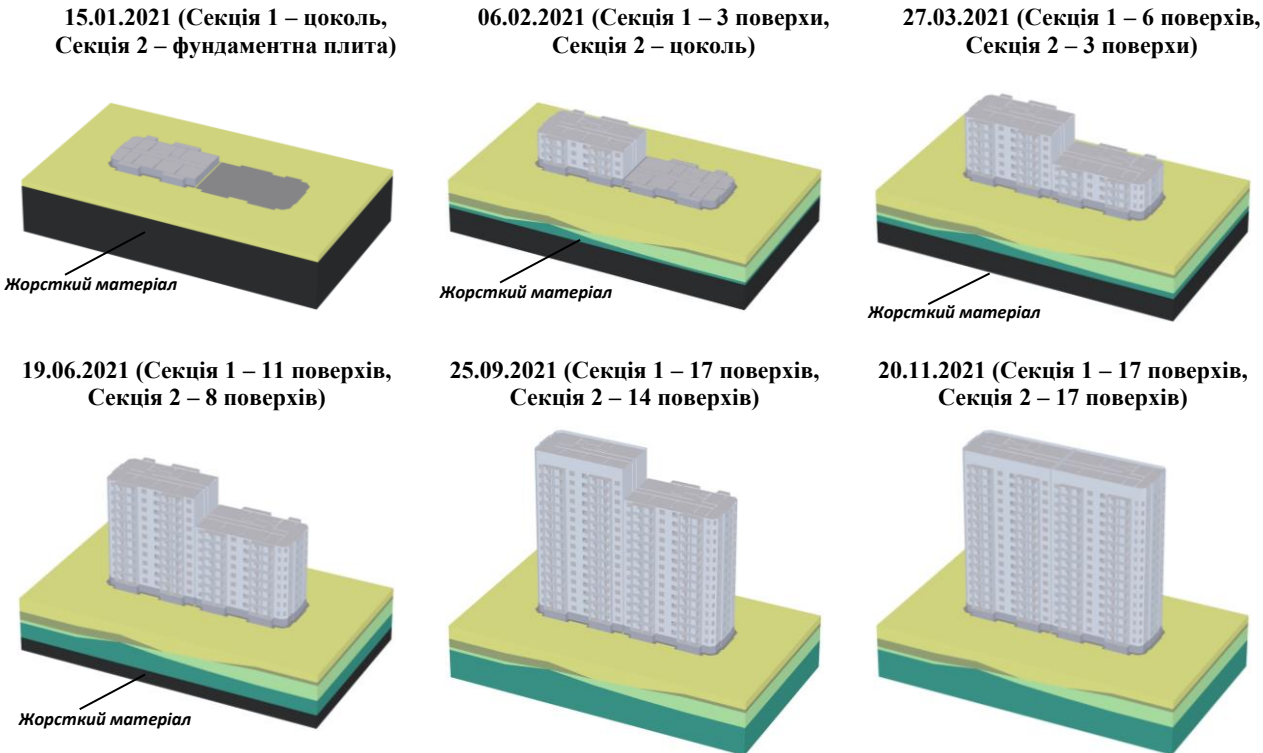


Рис. 8. Розрахункові схеми моделі на 1 етапі досліджень з однаковою стислою товщею відповідно до дати спостереження та кількості зведених поверхів

На підставі обраних параметрів моделі та вихідної інформації виконано моделювання взаємодії будівель з вказаною моделлю основи. Чисельний розрахунок виконано методом скінченних елементів та отримано абсолютні значення величин напружено-деформованого стану системи. При моделюванні не використовувався розрахунок у часі.

На другому етапі проведено чисельні розрахунки напружено-деформованого стану системи «основа – фундаменти – споруди» зі ступінчастою стислою товщею моделі ґрунтової основи, яка враховує кут α та різні величини стисливих товщ під кожним фундаментом споруд в залежності від навантаження, як показано на рисунках 2–3.

Вертикальні (по глибині) границі було

обмежено на глибині, яка дорівнювала величині стислої товщі H_i для кожного окремого фундаменту, враховуючи різні величини навантажень. Для формування активної зони – стислої товщі під кожною секцією будівлі при різних навантаженнях розподіл стискаючих напружень по глибині прийнято під кутом $\alpha \approx 25^\circ$ до вертикалі від внутрішнього краю більш навантаженого фундаменту [7]. Горизонтальні (у плані) границі, як і для першого етапу досліджень, було обмежено на відстані, яка дорівнювала максимальній величині стислої товщі $H = 18,0$ м при максимальному навантаженні.

При побудові ступінчастого нижнього профілю моделі ґрунтової основи з урахуванням різних стисливих товщ застосовано практично недеформований

жорсткий матеріал із значним модулем пружності $E = 100,0 \cdot 10^9$ кН/м² (рис. 9).

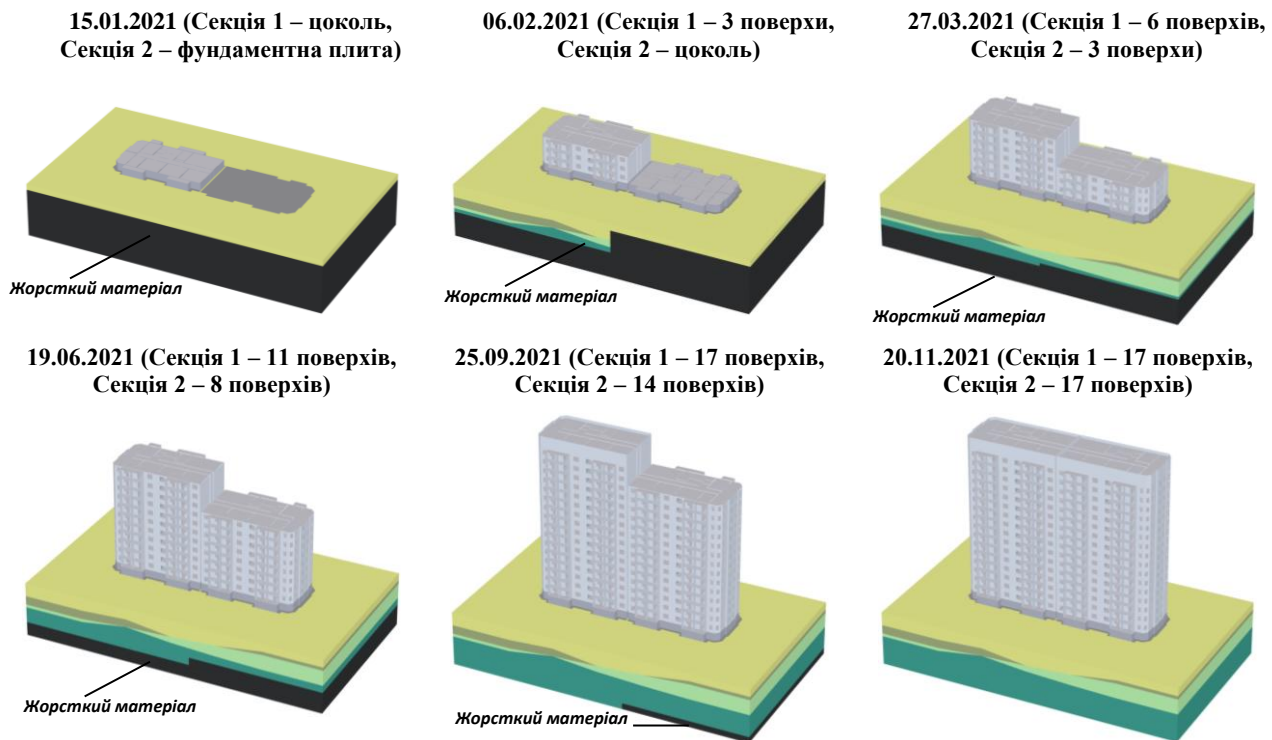


Рис. 9. Розрахункові схеми моделі на 2 етапі досліджень зі ступінчастою стисливою товщею відповідно до дати спостереження та кількості зведених поверхів

Для аналізу отриманих результатів розрахунків та подальшого порівняння з результатами натурних спостережень на скінчено-елементній моделі двосекційної досліджуваної будівлі було обрано точки у тих самих місцях де і осадкові марки на реальній будівлі. Також по висоті кожної секції було обрано додаткові контрольні точки. За результатами моделювання визначено особливості деформування кожної секції будівлі в залежності від співвідношення навантажень, моделі ґрунтової основи та обраної моделі поведінки ґрунтів основи. Отримані розрахункові значення осідань використано у подальшому співставленні з результатами натурних спостережень за осіданнями двосекційної будівлі під час будівництва.

Нижче на рисунку 10 наведено порівняння отриманих розрахункових значень осідань для одного з розрахункових варіантів та вказані максимальні та мінімальні їх значення для двох секцій для моделі ґрунтової основи у вигляді ССШСРЗ з однаковою та ступінчастою стисливими

товщами під фундаментами секцій для різноповерхових стадій будівництва.

Результати спостереження.

Спостереження за осіданнями будівлі проводилися в процесі будівництва методом високоточного нівелювання II класу. Були визначені позначки осадкових марок М.1, М.2, М.3, М.4, М.5, М.6, М.7 та М.8, що були закладені в рівні цокольного поверху обох секцій будівлі (рис. 11).

В процесі будівництва виділено 9 етапів спостережень:

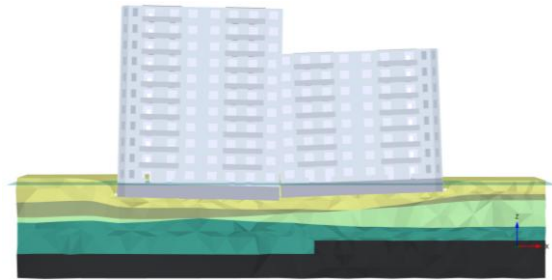
- 1 етап – січень 2021 року – влаштування фундаментної плити 2 секції та цокольного поверху 1-ої секції;
- 2 етап – лютий 2021 року – влаштування цокольного поверху 2 секції та 3-го поверху 1-ої секції;
- 3 етап – березень 2021 року – будівництво 3-го поверху 2 секції та 6-го поверху 1-ої секції;
- 4 етап – червень 2021 року – будівництво 8-го поверху 2 секції та 11-го поверху 1-ої секції;
- 5 етап – вересень 2021 року – будівництво 14-го поверху 2 секції та 17-го

поверху 1-ої секції;

Модель ґрунтової основи з однаковою стисливою товщею
Секція 1 – 11 поверхів, Секція 2 – 8 поверхи



Модель ґрунтової основи зі ступінчастою стисливою товщею
Секція 1 – 11 поверхів, Секція 2 – 8 поверхи



Linear Elastic (LE)



Total displacements u_x (scaled up 100 times)
Maximum value = -0,03025 m (Element 108455 at Node 86)
Minimum value = -0,08006 m (Element 108664 at Node 204)



Total displacements u_x (scaled up 100 times)
Maximum value = -0,03407 m (Element 108455 at Node 86)
Minimum value = -0,07709 m (Element 108664 at Node 204)

Mohr-Coulomb (MC)



Total displacements u_x (scaled up 100 times)
Maximum value = -0,03301 m (Element 108455 at Node 86)
Minimum value = -0,09361 m (Element 108664 at Node 204)



Total displacements u_x (scaled up 100 times)
Maximum value = -0,03590 m (Element 108455 at Node 86)
Minimum value = -0,08997 m (Element 108664 at Node 204)

Hardening Soil (HS)

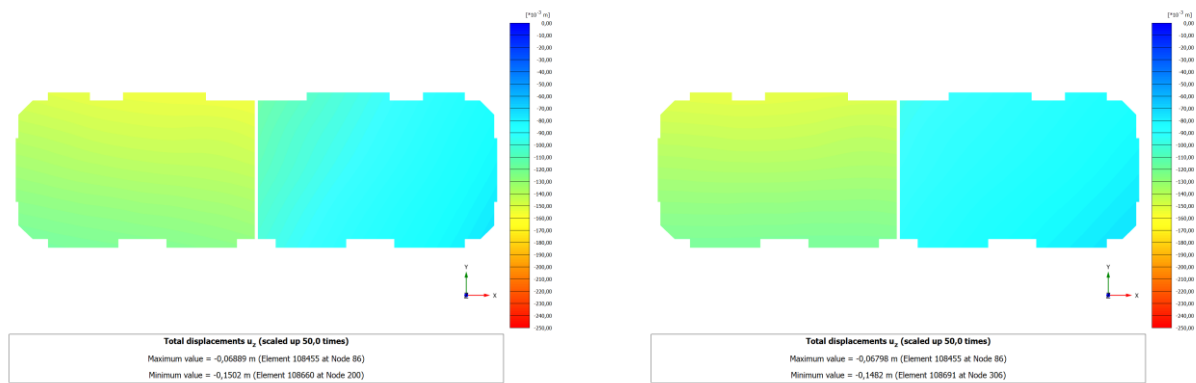


Рис. 10. Порівняння результатів розрахунків при різних стисливих товщах на 19.06.2021

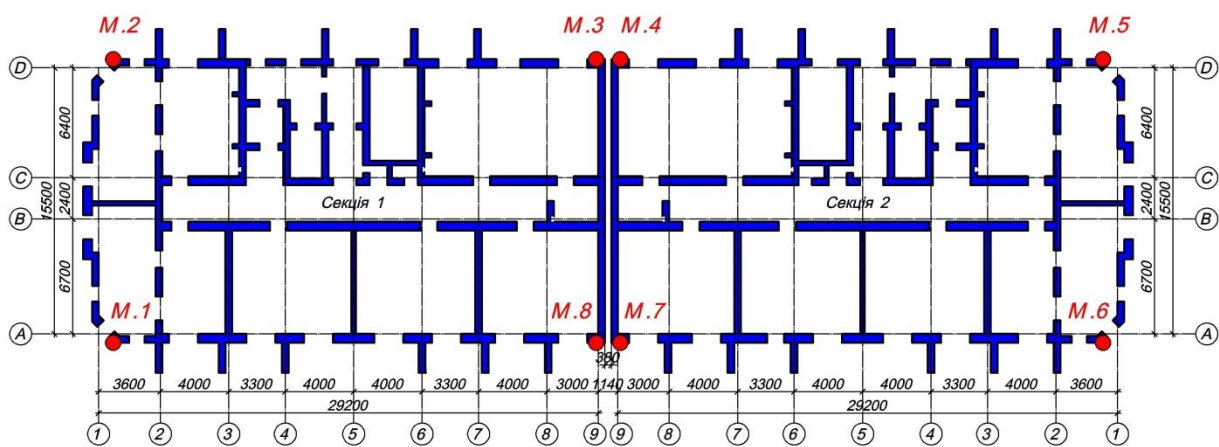


Рис. 11. Схема місць розташування осадкових марок

- 6 етап – листопад 2021 року – будівництво 17-го поверху 2 секції та 17-го поверху 1-ої секції;
- 7 етап – лютий 2022 року – спостереження при незмінному навантаженні при наявності 17-ти поверхів обох секцій 1 та 2;
- 8 етап – грудень 2022 року – спостереження при незмінному навантаженні при наявності 17-ти поверхів обох секцій 1 та 2;
- 9 етап – липень 2023 року – спостереження при незмінному навантаженні при наявності 17-ти поверхів обох секцій 1 та 2.

Для нівелювання було використано нівелір Н-05 й інварну нівелірну рейку РН-05. Нівелювання виконано в прямому і зворотному напрямках шляхом суміщення. На кожній станції за спостереженнями основних і додаткових шкал обчислені перевищення a_z , a_n та їх різниця $h = a_z - a_n$,

яка не перевищувала 0,7 мм. Для прямого і зворотного ходів по кожній секції (між суміжними реперами в ході) обчислені суми перевищень прямого $[h]_n$ і зворотного $[h]_z$ ходів. Розбіжності f_x не перевищували $\pm 2,1$ мм (L – довжина ходу в км) при кількості станцій менше 15. Для точності підрахунків використана програма Microsoft Excel, а зрівнювання результатів проводилось в програмі ARMGEO. Геодезичні роботи та розрахунки виконані к. т. н., доц. Наливайком Т. А.

На рисунку 12 наведено графіки фактичних і розрахункових осідань двох секцій будівлі від контрольованих реальних навантажень у процесі будівництва (враховувалася тільки власна вага зведених конструкцій без підвищувальних коефіцієнтів).

Для більшої наочності нижче на рисунках 13 та 14 наведено порівняння фактичних осідань із розрахунковими

значеннями для моделі ґрунтової основи у вигляді СШСРЗ зі ступінчастою стисливою товщею під фундаментами секцій на момент коли як Секція 1 так і Секція 2 були збудовані до 17 поверхів при середньому значення тиску під фундаментними плитами, який дорівнює $p_{\text{сер.}} = 230,02 \text{ кН/м}^2$.

На рисунку 15 наведено графіки фактичних і розрахункових горизонтальних переміщень (нахилів) двох секцій у повздовжньому напрямку будівлі від контрольованих реальних навантажень у процесі будівництва (враховувалася тільки власна вага зведених конструкцій без

підвищувальних коефіцієнтів).

Як видно з графіків на рисунках 13–14 найбільш близькі розрахункові значення осідань у порівнянні із фактичними, виміряними при натурних спостереженнях для кожної секції будівлі, отримано при використанні моделі НS, хоча перевищення фактичних значень над розрахунковими складає 28 % для першої секції та 43 % для другої у бік заниження. Різниця у значеннях між моделями LE та МС у порівнянні із виміряними значеннями складає для першої секції 65 та 50 %, для другої секції 66 та 52 % відповідно у бік заниження.

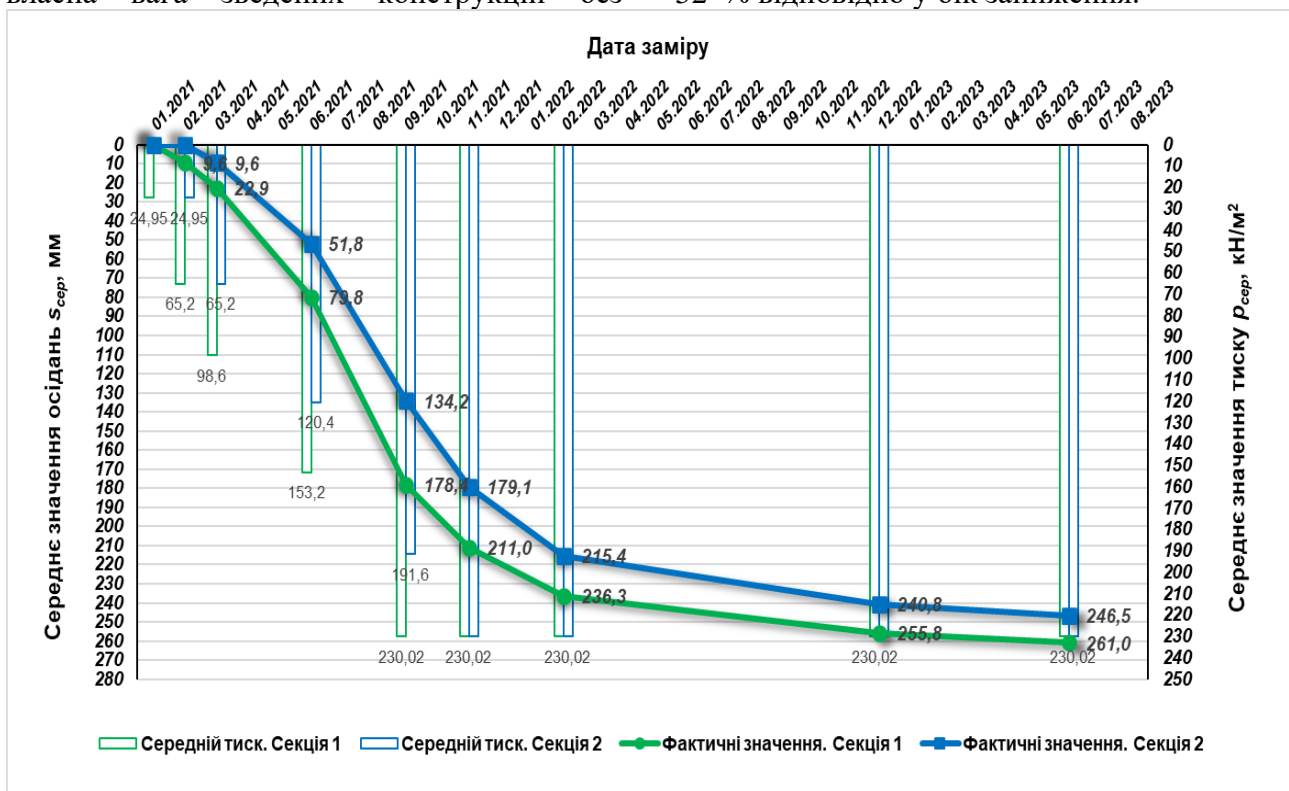


Рис. 12. Середні осідання секції 1 та 2 від середнього тиску під подошвою плит

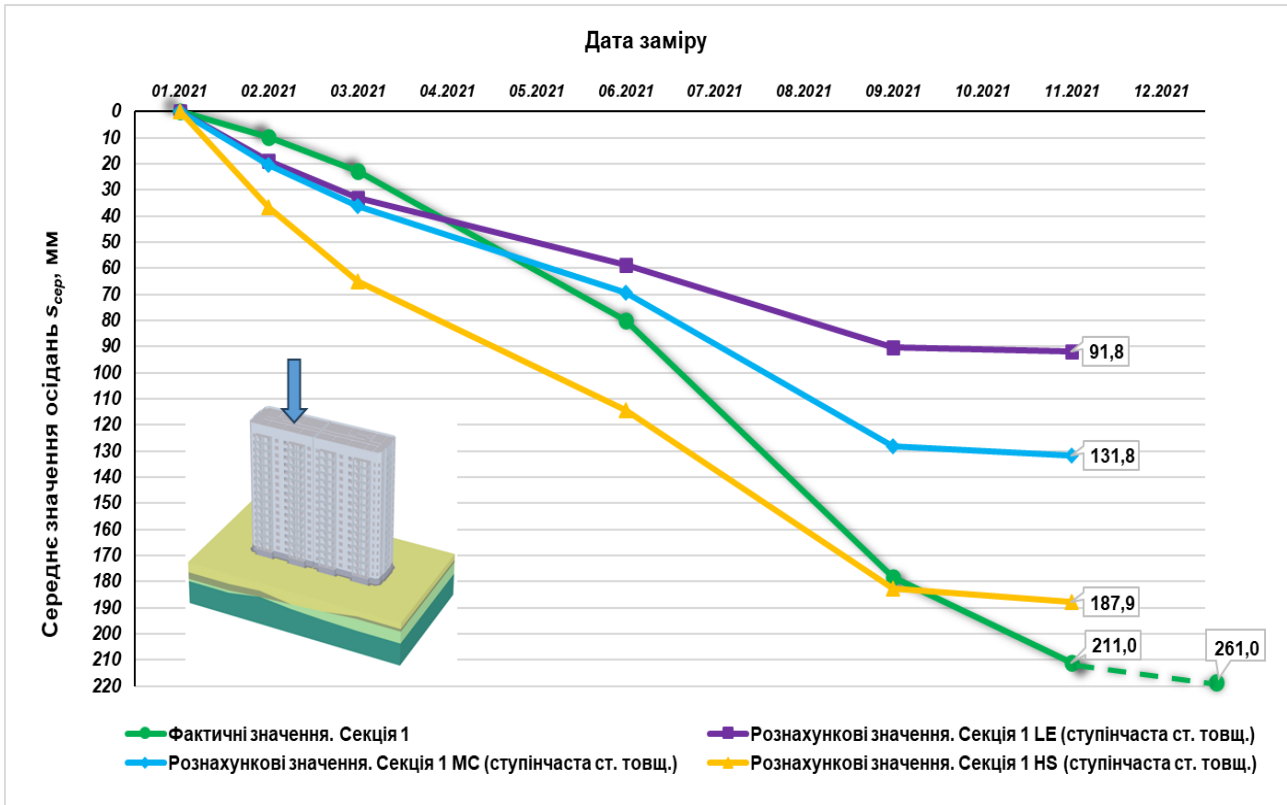


Рис. 13. Середні осідання Секції 1 у порівнянні із розрахунковими значеннями із використанням моделі ґрунтової основи із ступінчастою стисливою товщею

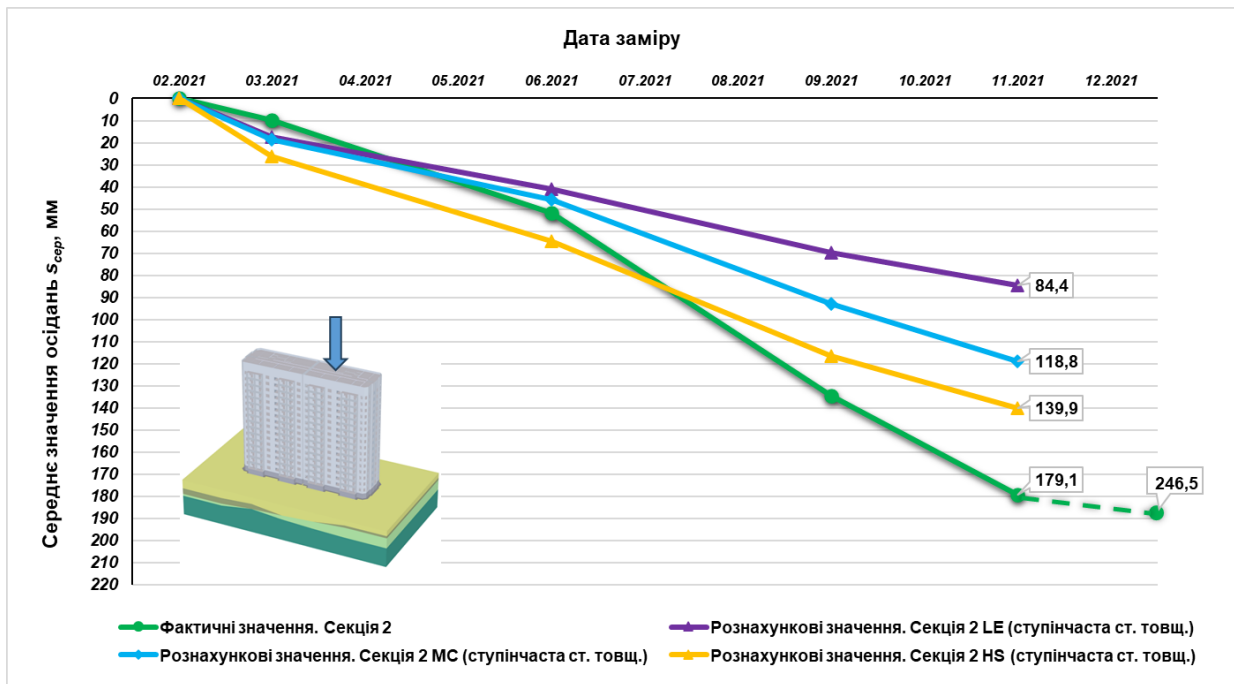


Рис. 14. Середні осідання Секції 2 у порівнянні із розрахунковими значеннями із використанням моделі ґрунтової основи із ступінчастою стисливою товщею

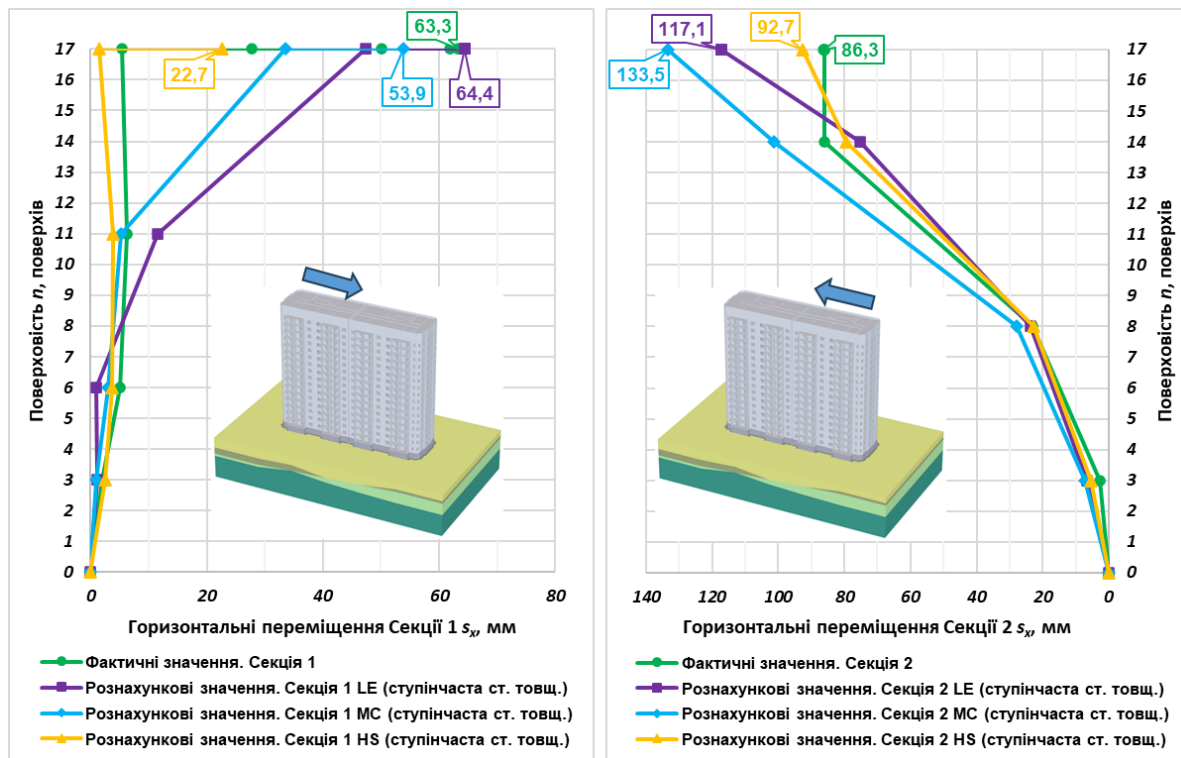


Рис. 15. Горизонтальні переміщення (нахили) секції 1 та 2 по висоті вздовж породільної вісі у порівнянні з розрахунковими значеннями із використанням моделі ґрунтової основи із ступінчастою стисливою товщцею

Аналіз горизонтальних переміщень (кренів) двох секцій на рисунку 15 показує, що найбільш точні результати для першої секції отримано із застосуванням моделей LE та MC де різниця у розрахункових та вимірних значеннях склала 2 % (LE) у бік завищення та 15 % (MC) у бік заниження відповідно, проте характер розвитку кренів не відповідає експериментальним значенням. Застосування моделі HS дає змогу найбільш точно повторити характер розвитку кренів на всіх етапах зведення будівлі, хоча різниця у розрахункових та вимірних значеннях склала 64 % у бік заниження. Для другої секції різниця склала 36 % (LE), 55 % (MC) та 7 % (HS) у бік завищення. Слід зазначити, що всі параметри моделі поведінки ґрунту HS були задані у Plaxis за замовчуванням без додаткових уточнюючих лабораторних досліджень ґрунтів, проте, навіть такий підхід дав змогу найбільш точно повторити

характер розвитку горизонтальних переміщень (кренів) кожної із секцій саме із застосуванням моделі ґрунтової основи у вигляді суцільного шару скінченної розподільчої здатності із різними стисливими товщами.

Розвиток кренів двох секцій будівлі у напрямку одна до одної підтверджує класичні теоретичні рішення механіки суцільного середовища, тобто накладання напружень (деформацій) при взаємному впливі. Однак, з рисунку 15 чітко видно, що в процесі будівництва 2-х секцій з різницею у декілька поверхів (у даному випадку 4-ри) основний вплив проявляється саме на завершальному етапі будівництва 2-х секцій, причому впливає саме секція 2, що побудована останньою.

На рисунку 16 наведено загальний вигляд зведеної будівлі та вигляд деформаційного шва (на стику двох секцій) на завершальному етапі будівництва.



Рис. 16. Загальний вигляд будівлі та деформаційний шов на завершальному етапі будівництва

Стан деформаційного шву побічно вказує на відсутність локальних пошкоджень цегли на верхніх поверхах будівель через «взаємонавали».

Висновки

Виконано моделювання та проведено аналіз напружено-деформованого стану системи «основа – фундаменти – споруди» із використанням найбільш розповсюджених моделей поведінки ґрунтів основи, які реалізовані у програмному комплексі Plaxis. На основі проведених спостережень за деформаціями ґрунтової основи двосекційної багатоповерхової будівлі на великорозмірних плитних фундаментах обґрунтовано застосування удосконаленої моделі ґрунтової основи для розрахунку поряд розташованих різноповерхових будівель

Аналіз результатів досліджень дозволяє зробити наступні висновки та рекомендації:

1. Підтверджується можливість застосування моделі ґрунтової основи у вигляді суцільного шару скінченної розподільчої здатності із різними стисливими товщами у поєднанні із пружнопластичною моделлю поведінки

ґрунту зі зміцненням – Hardening Soil для прогнозування адекватних деформацій секційних будівель на великорозмірних плитних фундаментах, в основі яких з поверхні залягають слабкі водонасичені ґрунти.

2. Аналіз результатів моделювання у порівнянні із натурними вимірними значеннями осідань та горизонтальних переміщень (кренів) двох секцій вказує на доцільність застосування саме пружнопластичної моделі зі зміцненням ґрунту.

3. Аналіз фактичних кренів поряд розташованих фундаментів секційних будівель вказує на неможливість адекватного врахування взаємного впливу при різноповерхових будівлях з використанням моделі суцільного середовища із загальною стисливою товщею, що частково вирішується за рахунок застосування удосконаленої моделі ґрунтової основи у вигляді суцільного шару скінченної розподільчої здатності та врахування різних стисливих товщ під кожною секцією в залежності від навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лучковский И. Я. Взаимодействие конструкций с основанием. Харьков : ХДАГХ (Бібліотека журналу ІТЕ), 2000. Т. 3. 264 с.
2. Винников Ю. Л. Моделирование процессов уплотнения грунта при висесимметричному напружено-деформованому стані основ : дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.23.02. Київ, 2005. 468 с.
3. Кушнер С. Г. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений. Запорожье, 2008. 496 с.
4. ДБН В.2.1.-10:2018. Основи та фундаменти будівель і споруд. Чинний від 2019–01–01. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. 36 с.
5. Lutchkovsky I. J., Samorodov O. V. Definition of the parameters of an elastic finite layer. *Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. Edinburgh, Scotland, 2015. Pp. 3711–3715.
6. Самородов О. В., Табачников С. В. Заявка на патент на винахід № а202301804, Україна МПК E02D 27/12. Спосіб моделювання ґрунтової основи поряд розташованих фундаментів. Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. Заявл. 25.04.2023.
7. Самородов О. В., Александрович В. А., Табачников С. В., Гаврилюк О. В. Вплив граничних умов на розподільчу здатність та деформативність моделі ґрунтової основи у вигляді лінійно-деформованого шару скінченної ширини. *Наука та будівництво*. 2023. № 2 (36) С. 12–19.
8. Empfehlungen des Arbeitskreises «Numerik in der Geotechnik». EANG. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (ed.). 2014. 196 p.
9. Kh. Mohd Najmu Saquib Wani, Rakshanda Showkat. Soil Constitutive Models and Their Application in Geotechnical Engineering : a Review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2018. Vol. 7, iss. 04. Pp. 137–145.
10. Jean-Louis Briaud *Geotechnical Engineering : Unsaturated and Saturated Soils*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, US, 2013.
11. Бойко І. П., Носенко В. С. Вплив послідовності зведення суміжних секцій висотного будинку на перерозподіл зусиль у пальових фундаментах. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Сер. : Галузеве машинобудування, будівництво*. 2012. Вип. 4 (1). С. 54–60.
12. Носенко В. С. Напружено-деформований стан пальово-плитних фундаментів секційних висотних будинків : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02. Київ : КНУБА, 2012. 240 с.
13. Носенко В. С., Кривенко О. А. Вплив жорсткості несучих конструкцій будинку зі збірного залізобетону на напружено-деформований стан фундаментів із бурюін'єкційних паль. *Основи і фундаменти : міжвід. наук.-техн. зб.* Київ : КНУБА, 2020. Вип. 40. С. 48–57.
14. Скочко Л. О., Шабалтун А. М. Вплив послідовності зведення будинків на формування напружено-деформованого стану системи «основа – фундамент – надземні конструкції». *Основи і фундаменти : міжвід. наук.-техн. зб.* Київ : КНУБА, 2020. Вип. 41. С. 32–44.
15. Ter-Martirosyan Z. G. & Ter-Martirosyan A. Z. Soil beds of high-rise buildings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2009. № 46 (5). Pp. 165–179.
16. Braja M. D. *Shallow foundations. Bearing capacity and settlements*. CRC Press. Taylor & Francis Group. 2017.
17. Самородов А. В. Проектирование эффективных комбинированных свайных и плитных фундаментов многоэтажных зданий : монография. Харьков : «Типография Мадрид», 2017. 204 с.
18. PLAXIS CONNECT Edition V20. *Material Models Manual*. 2020. 238 с.
19. Самородов О. В., Табачников С. В., Єсакова С. В., Кротов О. В. Натурні дослідження осідань плитних фундаментів двосекційної багатопверхової будівлі на слабких водонасичених ґрунтах. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 3 (015). С. 94–101.
20. Samorodov O. V., Tabachnikov S. V., Yesakova S. V., Krotov O. V. Experience in Designing and Calculating Slab Foundations of a Two-Section Multi-story Building on Weak Water-Saturated Soils. In : Kolathayar S., Vinod Chandra Menon N., Sreekeasha K.S. (eds). *Best Practices in Geotechnical and Pavement Engineering. IACESD 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 449. Springer, Singapore, 2024. Pp. 33–43.
21. Samorodov O., Tabachnikov S. A Soil Base Model of Adjacent Various Story Structures. *Proceedings of 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. 18–21 June 2024, Barcelona, Spain. Scipedia, Marcos Arroyo & Antonio Gens (Eds). Vol. *Field Monitoring in Geomechanics*. 2024. Pp. 1144–1150.

REFERENCES

1. Luchkovsky I.Ya. *Vzaimodeystviye konstruktsey s osnovaniyem* [Interaction of structures with the base]. Kharkiv : KHDACH (Library of the ITA journal), 2000, vol. 3, 264 p. (in Russian).
2. Vynnykov Yu.L. *Modelyuvannya protsesiv ushchilnennya hruntu pry visesyetrychnomu napruzhenodeformovanomu stani osnov* [Modeling soil compaction processes in the axisymmetric stress-strain state of bases]. (Doctoral dissertation, specialization 05.23.02). 2005, Kyiv, 468 p. (in Ukrainian).

3. Kushner S.G. *Raschet deformatsiy osnovaniy zdaniy i sooruzheniy* [Calculation of deformations of the foundations of buildings and structures]. 2008, Zaporizhzhia, 496 p. (in Russian).
4. *DBN V.2.1.-10:2018. (2018). Osnovy ta fundamenti budivel' i sporud* [DBN V.2.1.-10:2018. Bases and foundations of buildings and structures]. Valid from 2019–01–01. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 36 p. (in Ukrainian).
5. Lutchkovsky I.J. and Samorodov O.V. Definition of the parameters of an elastic finite layer. Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. 2015, pp. 3711–3715.
6. Samorodov O.V. and Tabachnykov S.V. *Zayava na patent na vynakhid № a202301804, Ukrayina MPK E02D 27/12. Sposib modelyuvannya hruntovoyi osnovy poryad rozstashovanykh fundamentiv* [Application for a patent for an invention No. a202301804, Ukraine IPC E02D 27/12. The method of modeling the soil base near the foundations located]. Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov. Filed 25.04.2023. (in Ukrainian).
7. Samorodov O.V., Alexandrovich V.A., Tabachnykov S.V. and Havryliuk O.V. *Vplyv hranychnykh umov na rozpodilchu zdatnist ta deformatyvnist modeli gruntovoyi osnovy u vyhlyadi liniyno-deformovanoho sharu skinchennoyi shyryny* [The influence of boundary conditions on the distribution capability and deformability of the model of the soil base in the form of a linearly deformed layer of finite width]. *Nauka ta budivnytstvo* [Science and Construction]. 2023, no. 2 (36), pp. 12–19. (in Ukrainian).
8. Empfehlungen des Arbeitskreises “Numerik in der Geotechnik” – EANG. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Ed.). 2014, 196 p.
9. Kh Mohd Najmu Saquib Wani and Rakshanda Showkat. Soil Constitutive Models and Their Application in Geotechnical Engineering : a Review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2018, no. 7 (04), pp. 137–145.
10. Briaud J-L. *Geotechnical Engineering : Unsaturated and Saturated Soils*. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, Inc. 2013.
11. Boyko I.P. and Nosenko V.S. *Vplyv poslidovnosti zvedennya sumizhnykh sektiiv vysotnoho budynku na pererozpodil zusyly u palovykh fundamentakh* [The influence of the sequence of construction of adjacent sections of a high-rise building on the redistribution of forces in pile foundations]. *Zbirnyk naukovykh prats. Seriya : Haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo* [Collection of scientific papers of Poltava National Technical University named after Yu. Kondratyuk. Series : Industrial Engineering, Construction]. 2012, no. 1, pp. 54–60. (in Ukrainian).
12. Nosenko V.S. *Napruzheno-deformovanyj stan paljovo-plytnykh fundamentiv sekcijnykh vysotnykh budynkiv* [Stress-strain state of plate-pile foundations of sectional high-rise buildings]. Doctoral dissertation, specialization 05.23.02. Kyiv : KNUBA Publ., 2012, 240 p. (in Ukrainian).
13. Nosenko V.S. and Krivenko O.A. *Vplyv zhorstkosti nesuchykh konstruksiy budynku zi zbirnoho zalizobetonu na napruzhenno-deformovanyj stan fundamentiv iz buroinyektsiynykh pal* [The influence of the stiffness of the bearing structures of a precast concrete building on the stress-strain state of foundations made of augercast piles]. *Osnovu i fundamenti: Mizhvidomchyj nauково-tekhnichnyj zbirnyk*, 2020, no. 40, pp. 48–57. (in Ukrainian).
14. Skochko L. and Shabaltun A. *Vplyv poslidovnosti zvedennya budynkiv na formuvannya napruzhenno-deformovanoho stanu systemy «osnova-fundament-nadzemni konstruksiyi* [The influence of the sequence of building construction on the formation of the stress-strain state of the base-foundation-superstructures system]. *Osnovu i fundamenti : mizhvidomchyj nauково-tekhnichnyj zbirnyk* [Fundamentals and Foundations : interdisciplinary scient. and tech. coll.]. 2020, no. 41, pp. 32–44. (in Ukrainian).
15. Ter-Martirosyan Z.G. and Ter-Martirosyan A.Z. Soil beds of high-rise buildings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2009, no. 46 (5), pp. 165–179.
16. Braja M.D. *Shallow foundations. Bearing capacity and settlements*. CRC Press. Taylor & Francis Group. 2017.
17. Samorodov A.V. *Proektirovanie effektivnykh kombinirovannykh svainykh i plitnykh fundamentov mnogoetazhnykh zdaniy* [Design of effective combined pile and raft foundations of multi-storey buildings]. Kharkiv : Madrid Printing House, 2017, 204 p. (in Russian).
18. PLAXIS CONNECT Edition V20. *Material Models Manual*. 2020, 238 p.
19. Samorodov O.V., Tabachnikov S.V., Yesakova S.V. and Krotov O.V. *Naturni doslidzhennia osidan plytnykh fundamentiv dvosektsiinoi bahatopoverkhovoi budivli na slabkykh vodonasychenykh hruntakh* [Field Studies of Settlements of Slab Foundations of a Two-section Multi-storey Building on Weak Water-saturated soils]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 3 (015), pp. 94–101. (in Ukrainian).
20. Samorodov O.V., Tabachnikov S.V., Yesakova S.V., Krotov O.V. Experience in Designing and Calculating Slab Foundations of a Two-Section Multi-story Building on Weak Water-Saturated Soils. In : Kolathayar S., Vinod Chandra Menon N., Sreekeasha K.S. (eds). *Best Practices in Geotechnical and Pavement Engineering. IACESD 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 449. Springer, Singapore, 2024, pp. 33–43.
21. Samorodov O. and Tabachnikov S. A Soil Base Model of Adjacent Various Story Structures. Proceedings of 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. 18–21 June 2024. Barcelona, Spain. Scipedia, Marcos Arroyo & Antonio Gens (Eds). Vol. *Field Monitoring in Geomechanics*, 2024, pp. 1144–1150.

Надійшла до редакції: 13.09.2024.