

УДК 624.131 : 624.15

ВПЛИВ СУЦІЛЬНО-ДИСКРЕТНОЇ МОДЕЛІ ҐРУНТОВОЇ ОСНОВИ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ВЕЛИКОРОЗМІРНОГО ПАЛЬОВО-ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТУ ВИСОТНОЇ БУДІВЛІ

О.В. Самородов,
д-р техн. наук, професор

О.П. Бондар,
аспірант

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.360-374

У статті розглянуто методологію удосконалення моделі ґрунтової основи пальово-плитних фундаментів як спосіб моделювання ґрунтової основи пальових фундаментів, що патентується в Україні. Основний матеріал статті присвячено дослідженню впливу удосконаленої лінійно-деформованої (пружної) комбінованої (суцільно-дискретної) моделі ґрунтової основи «Шару-Вінклера» для розрахунку великорозмірного пальово-плитного фундаменту висотної будівлі.

Ключові слова: ґрунтова основа, пальово-плитний фундамент, великорозмірний, висотна будівля, модель, пружна, суцільна, дискретна, комбінована, напружено-деформований стан, геодезичні спостереження.

Вступ. У сучасній геотехніці, завдяки розвитку інформаційних технологій та наявності потужних програмних комплексів: «SOFiSTiK», «ABAQUS», «Plaxis», «SCAD», «LIRA» тощо для розрахунку системи «основа – фундамент – споруда» («ОФС»), одним з основних наукових напрямків є удосконалення та дослідження моделей ґрунтових основ (далі, моделей) з різними геометричними та механічними параметрами для забезпечення адекватної взаємодії складових системи при будівництві та експлуатації будівель та споруд (далі, споруд) [1-7].

Загальновідомо, що для отримання надійних та достовірних результатів розрахунку напружено-деформованого стану будь-яких конструкцій фундаментів у системі «ОФС» необхідно обрати таку модель основи з відповідними параметрами, яка є адекватною щодо поведінки реального ґрунтового масиву під навантаженнями від фундаментів за двома критеріями: розподільчою здатністю та деформативністю фундаментів споруд.

Вже понад 100 років співіснують дві відомі класичні пружні (лінійні, лінійно-деформовані) моделі для розрахунку пальових фундаментів, що мають принципову різницю за розподільчою здатністю [1]: модель пружного півпростору (далі, модель «Півпростору»), що має дві механічні характеристики (модуль пружності (деформації) E та коефіцієнт Пуассона ν), з максимальною

розподільчою здатністю, та модель Фусса-Вінклера (далі, модель «Вінклера»), де ґрунтова основа моделюється вертикальними дискретними зв'язками кінцевої лінійної жорсткості G_{pf} у місцях з'єднання паль з плитним ростверком, без розподільчої здатності (рис. 1).

Свого часу, кожна з моделей мала свої переваги для різних типів фундаментів та й принесла значний внесок в інженерні розрахунки конструкцій пальових фундаментів [8]. Однак, для розрахунків великорозмірних пальово-плитних фундаментів (шириною $b > 10$ м) [9], жодна з цих моделей не відповідає адекватній взаємодії таких фундаментів з реальною ґрунтовою основою. Це можна продемонструвати розподілом реакцій R (кН) у головах паль, що виникають уздовж однієї з осей (рис. 2) при рівних середніх осіданнях s_m (см) дослідного

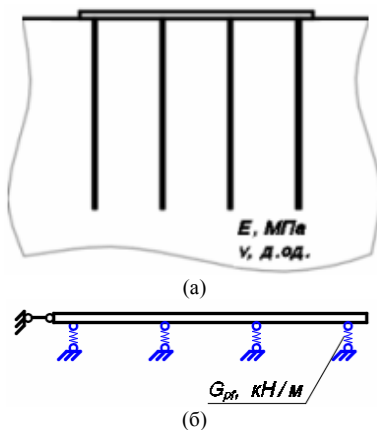


Рис. 1. Класичні пружні моделі з принципово різною розподільчою здатністю: (а) модель «Півпростору»; (б) модель «Вінклера»

великорозмірного пальово-плитного фундаменту висотної будівлі, який буде розглянутий нижче.

Як видно з рис. 2, при використанні моделі «Півпростору» (реалізована у програмі SOFiSTiK) виникають концентрації реакцій у крайових (периферійних) палях (для даного випадку розрахунку у системі «ОФС») було отримано співвідношення середніх відносних реакцій у палях згідно з місцями розташування паль у фундаменті наступним чином:

«внутрішні»:«крайові»: «кутові» = 1:3:5), що призводить до «нереально» великих моментних зусиль у конструкції плитного ростверку. При застосуванні моделі «Вінклера» подібні концентрації зусиль відсутні, що також не відповідає натурним дослідженням. Наприклад, за експериментальними даними відомих науковців з дослідження комбінованих пальово-плитних фундаментів співвідношення для паль становить: «внутрішня»:«кутова»=1:3,5 [3], тобто в 1,4 рази менша фактична концентрація для «кутової» палі у порівнянні з моделлю «Півпростору».

Сьогодні немає проблем з моделюванням у розрахункових комплексах суцільного ґрунтового масиву (середовища) у системі «ОФС», тому інженерами у просторовій постановці задачі зазвичай застосовується модель *суцільного шару скінченної розподільчої здатності (continuous layer of finite distribution capability)* – це авторська назва моделі [5] (далі, модель «Шару»), яка, крім обмеження вертикальних деформацій на глибині L_z , має обмеженнями горизонтальних деформацій у плані ($L_x \times L_y$) (рис. 3). Граничні умови моделі ґрунтуються на тому, що при дії зовнішніх навантажень на ґрунтовий масив утворюється область деформування, за межами якої деформаціями ґрунтів можна знехтувати, так як додаткове навантаження на цій межі не перевищує структурної міцності ґрунтів. При цьому для самої моделі можуть задаватися будь-які закономірності деформування ґрунтів під навантаженнями, в тому числі й у часі. У плоскій постановці задачі подібна модель має відому назву – модель шару скінченної ширини [1, 6].

Недоліками загально прийнятої лінійно-деформованої моделі «Шару», як і моделі «Півпростору», залишаються велика концентрація реакцій у кутових та крайових палях фундаменту (рис. 4), через що виникають значні моментні зусилля у плитному ростверку та завищення осідань фундаменту до 10-ти разів у порівнянні з фактичними величинами [10]. Використання, наприклад, нелінійно-деформованої моделі суцільного шару скінченної розподільчої здатності з критерієм міцності «Кулона-Мора» (далі, нелінійна модель «Шару») дозволяє значно зменшити реакції у крайових палях, що практично робить розподіл реакцій у палях близький до моделі «Вінклера» (див. рис. 4), але ж осідання будуть ще більшими, ніж лінійної моделі «Шару».

Слід зазначити, що й досі інженерами для розрахунків великорозмірних пальово-плитних фундаментів дуже широко використовується спрощена модель «Вінклера». В першу чергу, це пов'язано з «запобігання» концентрації реакцій у кутових та крайових палях (див. рис. 2) для нормативного задоволення умови

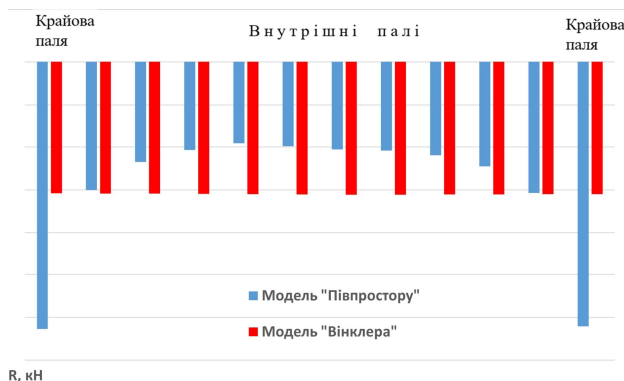


Рис. 2. Характер розподілу реакцій у палях великорозмірного пальово-плитного фундаменту у системі «ОФС» із застосуванням моделей основи з різною розподільчою здатністю

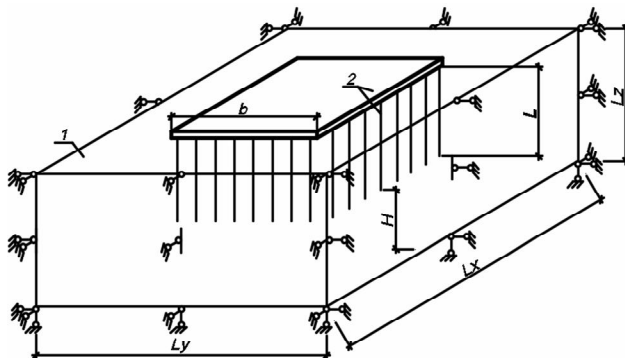


Рис. 3. Модель системи «основа-фундамент»:

1 – модель «Шару»; 2 – модель пальово-плитного фундаменту

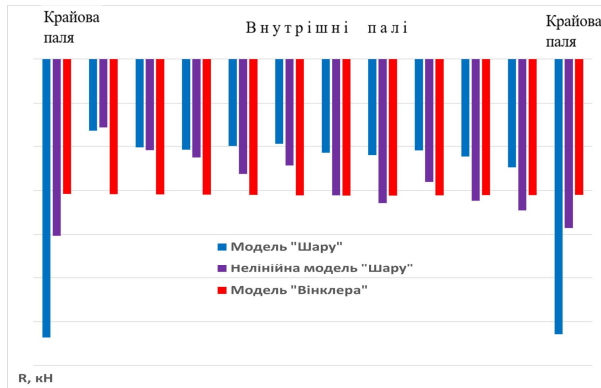


Рис. 4. Характер розподілу реакцій у палях великорозмірного пальово-плитного фундаменту у системі «ОФС» із застосуванням різних моделей

суцільної моделі «Шару» призводять до значних помилок у визначенні напружено-деформованого стану конструкцій великорозмірних пальово-плитних фундаментів; тому дослідження, обґрунтування та впровадження в практику розрахунку таких фундаментів удосконалених моделей ґрунтової основи є актуальною науково-прикладною задачею сьогодення.

Матеріали та методи. Нами запропоновано спосіб моделювання основи пальових фундаментів [11], де на нижній границі суцільного шару скінченної розподільчої здатності встановлюються вертикальні елементи кінцевої жорсткості (G_{pf} , кН/м) під підшовою паль, як показано на рис. 5, тобто виходить комбінація моделей «Шару» та «Вінклера» (далі, комбінована модель «Шару-Вінклера»). Ідентифікацією параметрів комбінованої моделі «Шару-Вінклера» можуть слугувати результати випробувань ґрунтів натурними пальями для визначення лінійної (нелінійної) жорсткості елементів (G_{pf} , кН/м) під підшовою паль та механічних характеристик шарів ґрунту, що взаємодіють з бічною поверхнею паль.

Слід особливо зазначити, що комбінована модель «Шару-Вінклера» вже пройшла часткове

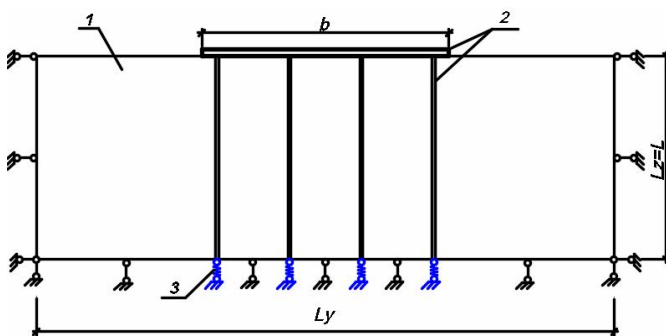


Рис. 5. Модель системи «основа-фундамент»:

1 – комбінована модель «Шару-Вінклера»; 2 – модель пальово-плитного фундаменту; 3 – зв'язок кінцевої жорсткості

великорозмірний пальово-плитний фундамент 34-х поверхової житлової будівлі з підземним паркінгом та технічним поверхом у м. Києві. Конструктивна схема будівлі – зв'язкова. Будівля має монолітний залізобетонний повний каркас, що складається з безбалкових бескапітельних перекриттів, пілонів, ядер та діафрагм жорсткості. Просторова стійкість та жорсткість будівлі забезпечується діафрагмами та ядрами жорсткості, пов'язаними жорсткими дисками перекриттів. Ширина будівлі в осях А÷Е дорівнює 18,77 м, а довжина будівлі в осях 1÷18 – 61,38 м. За відносну відмітку 0,000 прийнята відмітка чистої підлоги першого поверху, що відповідає абс. відм. $\approx 182,70$ м згідно з генпланом, яка також практично співпадає зі

щодо неперевіщення розрахункового навантаження на палі у порівнянні з несучою здатністю одиночної палі, тобто з метою успішного проходження експертизи проекту. А по-друге, визначений на підставі випробувань натурних паль лінійний параметр моделі G_{pf} робить її у 5-10 разів більшої жорсткості, ніж модель «Шару» з нормативними модулями деформації ґрунтів E , що призводить до зниження згинальних моментів у конструкції плитного ростверку для обґрунтування економічного ефекту перед замовником.

Вищенаведене свідчить про те, що «вимушене» застосування інженерами моделі «Вінклера» та недоліки

експериментальне обґрунтування щодо адекватного моделювання взаємодії основи з комбінованим плитно-пальовим фундаментом, де попередньо відсутній контакт між пальями та плитною частиною; тобто за допомогою комбінованою моделі «Шару-Вінклера» вперше було змодельовано конструктивну нелінійність роботи елементів фундаменту експериментальної багатоповерхової будівлі у м. Харкові [12].

Об'єктом розрахунку та дослідження є основа та

спланованим рівнем землі навколо будівлі. Відмітка чистої підлоги (верх плитного ростверку фундаменту) підземного паркінгу знаходиться на відмітці $-4,20$ м. Абс. відмітка верху ростверку складає $-178,50$ м. Висота будівлі (від верху ростверку до плити покриття машинного відділення ліфтової шахти) $\approx 116,4$ м. Клас відповідальності будівлі – СС3. Термін експлуатації будівлі – 100 років.

Будівля має наступні матеріали несучих елементів фундаменту та каркаса з відповідними фізико-механічними параметрами для розрахунків:

- палі, плитний ростверк, перекриття – бетон класу С20/25;
- колони, пілони, стіни, діафрагми та ядра жорсткості – бетон класу С25/30.

Зовнішні стіни підвального поверху прийнято товщиною – 250 мм, 300 мм та 350 мм. Колони та пілони прийнято перерізами (товщиною) – 300 мм та 350 мм. Стіни та ядра (діафрагми) жорсткості прийняті товщиною – 250 мм, 300 мм та 350 мм. Перекриття монолітні залізобетонні безбалкові безкапітельні прийнято товщиною – 200 мм. Сходові марші прийнято еквівалентною товщиною – 200 мм.

Пально-плитний фундамент складається з буроін'єкційних паль діаметром $d=620$ мм і довжиною 16,25 м, що об'єднані монолітним залізобетонним плитним ростверком товщиною – 1500 мм. Площа плитного ростверку складає $A \approx 1222,0$ м². Палі розташовані суцільним полем з практично регулярним кроком між осями паль 1800×1800 мм. Кількість паль у фундаменті – 389 шт. Слід відмітити, що раціональні параметри ефективного фундаменту (довжина паль та відстань між ними) визначено на підставі науково-технічного супроводу проектування подібного поряд розташованого об'єкту з урахуванням наших попередніх наукових досліджень та відповідного патенту [10, 13].

На рис. 6 представлено план взаємного розташування паль, плитного ростверку та несучих елементів каркаса будівлі на рівні верху ростверку (абс. відм. 178,50 м), а на рис. 7 наведено план вертикальних несучих елементів каркаса 34-го поверху будівлі (відм. +102,850 м), що практично схожий з планом типового поверху.

Дослідний об'єкт знаходиться у південно-західній правобережній частині міста, в районі станції метро «Теремки» по проспекту Академіка Заболотного, 1 у Голосіївському районі м. Києва.

На підставі звіту з інженерно-геологічних вишукувань [14] в геоморфологічному відношенні ділянка знаходиться в межах моренно-зандрової рівнини, в присхиловій її частині, від якої беруть початок відвершки численних ярів, притоків системи р. Нивка та Голосіївської балки. У сучасний час вони засипані при забудові навколишньої території.

Поверхня штучно створеного рельєфу нерівна. При інженерному освоєнні території мали місце підсилення насипними ґрунтами. Абс. відмітки поверхні штучно створеного рельєфу становлять 181,20-177,96 м.

В геологічній будові ділянки приймають участь насипні (техногенні), делювіальні, алювіально-делювіальні, флювіогляціальні відклади четвертинного віку, які залягають на розмитій поверхні порід неогену – «прісноводних» суглинків, «бурих» та «строкатих» глин, ґрунтів полтавської світи неогену.

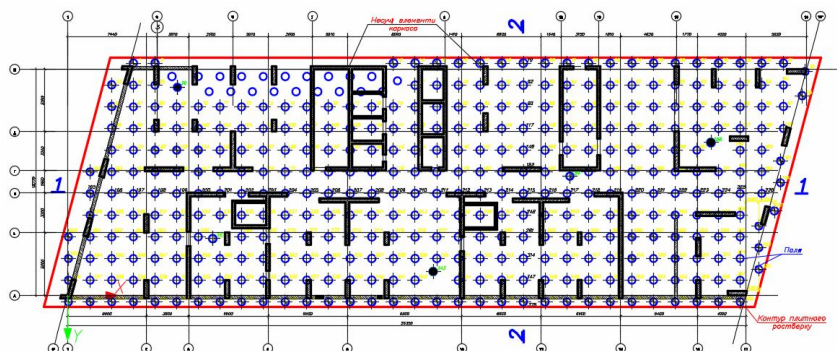


Рис. 6. План взаємного розташування паль, плитного ростверку та несучих елементів каркаса будівлі на рівні верху плитного ростверку

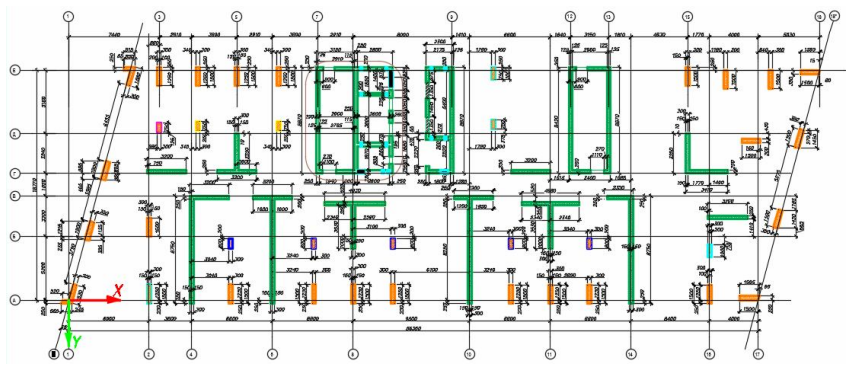


Рис. 7. План розташування вертикальних несучих елементів каркаса 34-го поверху будівлі

Гідрогеологічні умови ділянки характеризуються наявністю трьох водоносних горизонтів:

- ґрунтовий водоносний горизонт у четвертинних відкладах;
- водоносний горизонт у товщі «бурих» глин (слабонапірний);
- водоносний горизонт у відкладах полтавської світи неогену (безнапірний).

Ґрунтовий водоносний горизонт заключений у нижній частині насипних (техногенних) ґрунтів (абс. відм. 176,90 м). Живлення горизонту відбувається, переважно, внаслідок інфільтрації атмосферних опадів. Водотривким шаром для даного горизонту є «бурі» глини. Горизонт дрениється Голосіївською балкою та притоками р. Нивка.

Найменування та опис інженерно-геологічних елементів (ІГЕ) ґрунтової основи, з якими взаємодіє пальово-плитний фундамент будівлі наведено у табл. 1, а у табл. 2 представлено основні фізико-механічні характеристики цих ґрунтів згідно зі звітом [14].

У розрахунковий період (2024-2025 рр.) постійний фактично діючий тиск під плитним ростверком дорівнює $p \approx 490$ кПа, який отримано за допомогою моделювання та попереднього чисельного розрахунку будівлі у програмі SOFiStiK, що включає тільки власну вагу несучих елементів будівлі разом з плитним ростверком (без паль) та сходовими маршами, та постійне рівномірне навантаження на плитному ростверку та перекриттях будівлі (5,4 кПа) від внутрішніх стін, конструкцій підлог та іншого опорядження без підвищувальних коефіцієнтів.

На рис. 8 представлено умовну розрахункову схему взаємодії великорозмірного пальово-плитного фундаменту з основою при тиску під підшовою плитного ростверку $p \approx 490$ кПа та відповідний розрахунковий стисливий товщі $H = 16,0$ м [10].

Таблиця 1

Найменування та опис ґрунтів

Номер ІГЕ	Найменування та опис ґрунтів
ІГЕ-2	Суглинок м'якопластичний
ІГЕ-4	Суглинок тугопластичний
ІГЕ-7	Супісок пластичний з прошарками піску
ІГЕ-7а	Супісок пластичний запіскований з частими прошарками піску
ІГЕ-8	Суглинок піщанистий з включенням гравію кристалічних порід від напівтвердого до тугопластичного
ІГЕ-12	Глина «бура» напівтверда та тверда
ІГЕ-13	Глина «строката» напівтверда та тверда
ІГЕ-14	Глина з прошарками суглинку та пісковика, напівтверда та тверда, каолізована
ІГЕ-15	Суглинок від напівтвердого до тугопластичного, каолізований
ІГЕ-16	Супісок з прошарками піску, твердий, каолізований
ІГЕ-16п	Супісок пластичний, запіскований, каолізований
ІГЕ-17	Пісок середній, щільний, насичений водою
ІГЕ-18	Пісок дрібний, щільний, насичений водою

Таблиця 2

Основні фізико-механічні нормативні характеристики ґрунтів у природному водонасиченому стані

Характеристика ґрунту	Умовні позначення	Одиниці вимірювання	ІГЕ															
			ІГЕ-2	ІГЕ-4	ІГЕ-7	ІГЕ-7а	ІГЕ-8	ІГЕ-12	ІГЕ-13	ІГЕ-14	ІГЕ-15	ІГЕ-16	ІГЕ-16п	ІГЕ-17	ІГЕ-18			
Щільність ґрунту	ρ	Г/М ³	1,95	1,94	2,01	2,03	2,11	1,96	1,98	2,09	2,05	1,88	2,00	2,06	2,04			
Щільність сухого ґрунту	ρ_d	Г/М ³	1,60	1,61	1,68	1,75	1,84	1,53	1,56	1,82	1,79	1,70	1,69	1,73	1,69			
Природна вологість	W	д.од.	0,29	0,22	0,20	0,16	0,15	0,28	0,27	0,15	0,14	0,11	0,19	0,19	0,21			
Коефіцієнт пористості	e	д.од.	0,79	0,67	0,60	0,53	0,47	0,80	0,76	0,50	0,51	0,58	0,59	0,53	0,57			
Число пластичності	I_p	д.од.	0,12	0,09	0,06	0,05	0,1	0,29	0,26	0,2	0,12	0,06	0,05	-	-			
Показник текучості	I_L	д.од.	0,67	0,55	0,75÷1,0	0,60	0,20	0÷0,04	0÷0,15	<0÷0,27	0÷0,25	<0	0,75÷1,0	-	-			
Питоме зчеплення	c	кПа	14	18	9	8	29	76	72	53	37	20	15	2	4			
Кут внутрішнього тертя	φ	град.	16	15	16	18	17	14	14	15	17	23	20	37	36			
Коефіцієнт Пуассона	ν	д.од.	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,4	0,4	0,4	0,35	0,35	0,35	0,3	0,3			
Модуль деформації	E	МПа	6	10	10	11	10	18	20	15	16	24	18	40	37			

Формування напружено-деформованого стану (НДС) великорозмірного пальово-плитного фундаменту у системі «ОФС» буде розглянуто при впливі 3-х лінійно-деформованих (лінійних, пружних) моделей (рис. 9):

- модель «Шару» (див. рис. 9 (а));
- комбінована модель «Шару-Вінклера» (див. рис. 9 (б));
- модель «Вінклера» (див. рис. 9 (в)).

Розгляд впливу саме лінійно-деформованих (пружних) моделей для моделювання ґрунтової основи великорозмірних пальово-плитних фундаментів обумовлений власними експериментальними результатами інструментального моніторингу НДС пальово-плитних фундаментів споруд [10, 12]. Це характерно для випадків, коли розрахунковий опір основи R умовно-суцільного пальово-плитного фундаменту у кілька разів перевищує тиск p на рівні підшви паль ($p < R$).

Моделювання та розрахунок системи «ОФС» виконувалося у німецькому програмному комплексі SOFiStiK у поєднанні з програмою WinTUBE (спеціальний геотехнічний модуль SOFiStiK). Елементи будівлі: плитний ростверк, колони, пілони, стіни, діафрагми жорсткості, перекриття та сходові марші моделювалися пластинчастими скінченними елементами. На плитний ростверк та перекриття будівлі прикладалося постійне рівномірне розподілене навантаження 5,4 кПа. При цьому, результати розрахунків при використанні різних моделей аналізувалися додатково для виключення помилок із збереженням фізичного сенсу результатів. Наприклад, при використанні різних моделей середня реакція у головах паль складала $R_m \approx 1539$ кН, що відповідає середньому тиску $p = 490$ кПа під підшвою плитного ростверку тощо.

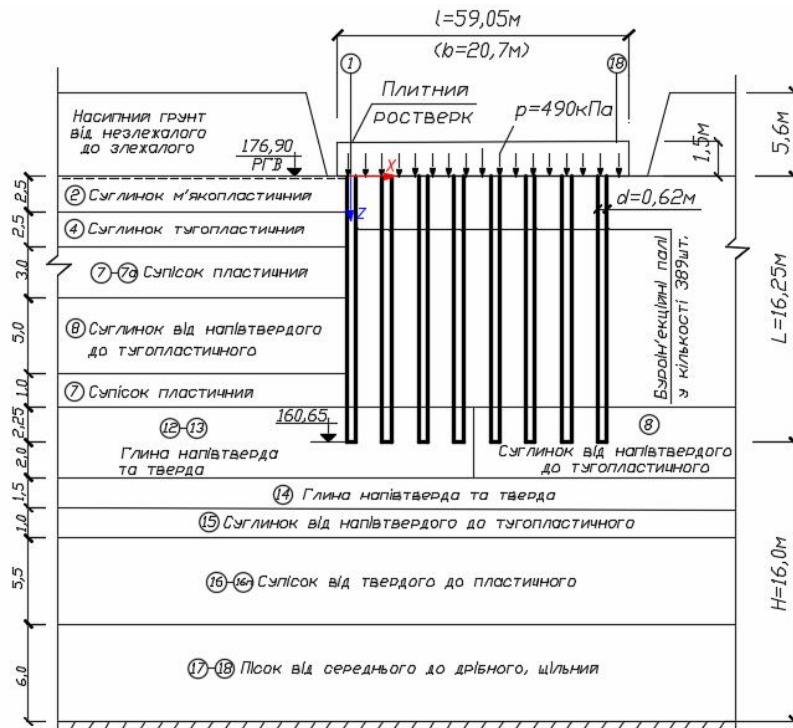


Рис. 8. Умовна розрахункова схема взаємодії великорозмірного пальово-плитного фундаменту з ґрунтовою основою

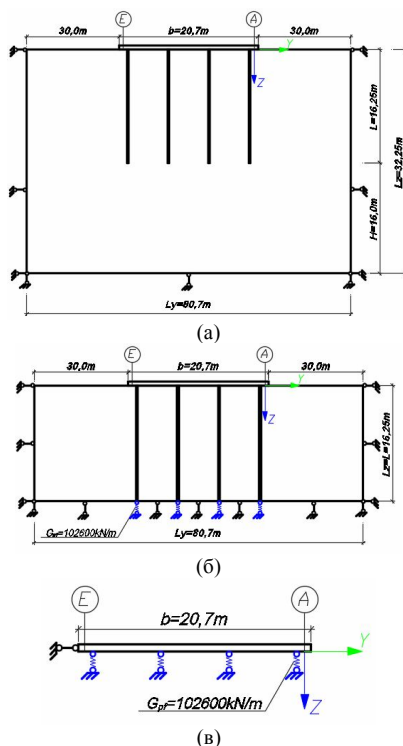


Рис. 9. Геометричні параметри та граничні умови лінійно-деформованих моделей основи, що досліджуються: (а) модель «Шару»; (б) комбінована модель «Шару-Вінклера»; (в) модель «Вінклера»

На рис. 9 показано дослідні моделі з геометричними параметрами та граничними умовами. Геометричні параметри моделей $L_x \times L_y \times L_z$ є достатніми на підставі досліджень [6].

Для наочності на рис. 10 показано візуалізацію скінченно-елементної моделі системи «ОФС» із використанням комбінованої моделі «Шару-Вінклера» (див. рис. 9 (б)) з напрямком «розрахункових» позитивних осей будівлі «+X», «+Y», «+Z» з центром на перетині модульних координаційних осей будівлі «1» та «А» у плані (див. рис. 6-7).

Наприклад, кількість скінченних елементів та вузлів моделі системи «ОФС» з використанням моделі «Шару» (див. рис. 9 (а)) складає: 286174 об'ємних елементів, 92893 пластинчастих елементів та 391097 вузлів.

Особливостями моделювання та розрахунку системи «ОФС» з різними моделями основи є:

- для моделі «Шару» (див. рис. 3 та рис. 9 (а)): розміри моделі дорівнюють $L_x \times L_y \times L_z = 124,6 \times 80,7 \times 32,25$ м. Ґрунтова основа та палі моделюються об'ємними скінченними елементами з відповідними фізико-механічними характеристиками (див. рис. 8 та табл. 2). Уздовж довжини паль $L=16,25$ м та стисливої товщі $H=16,0$ м ґрунти мають модулі деформації E та коефіцієнти Пуассона ν , що відповідають величинам у табл. 2.

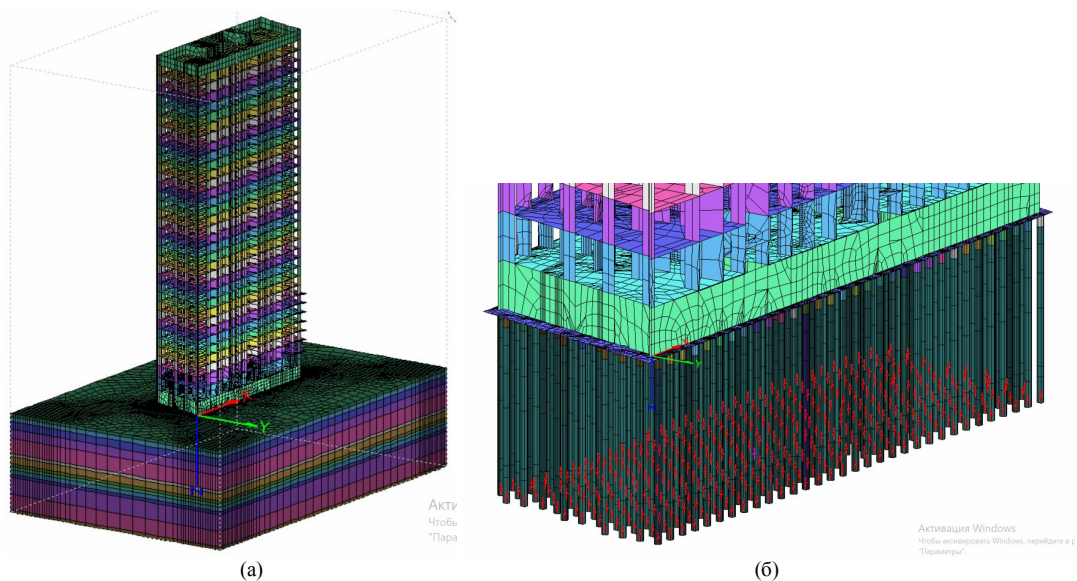


Рис. 10. Візуалізація скінченно-елементної моделі «ОФС» з комбінованою моделлю «Шару-Вінклера»: (а) повна модель «ОФС»; (б) частина моделі «пальово-плитний фундамент – елементи будівлі» зі зв'язками кінцевої жорсткості G_{pf} під підшою паль (див. рис. 9 (б))

Розрахунок системи «ОФС» передбачає 3-х етапне формування НДС: 1-й етап – формування НДС ґрунтового масиву від власної ваги; 2-й етап – додаткове формування НДС від власної ваги паль; 3-й етап – додаткове формування НДС від власної ваги елементів будівлі та постійних навантажень на перекриттях і плитному ростверку фундаменту будівлі;

- **для комбінованої моделі «Шару-Вінклера»** (див. рис. 5 та рис. 9 (б)): розміри моделі дорівнюють $L_x \times L_y \times L_z = 124,6 \times 80,7 \times 16,25$ м. Ґрунтова основа та палі моделюються об'ємними скінченними елементами з відповідними фізико-механічними характеристиками (див. рис. 8 та табл. 2). Уздовж довжини паль $L = L_z = 16,25$ м ґрунти мають модулі деформації E та коефіцієнти Пуассона ν , що відповідають величинам у табл. 2, а під підшою паль вводяться зв'язки кінцевої лінійної жорсткості величиною G_{pf} , що моделюють роботу стисливої товщі H пальово-плитного фундаменту. Для цього окремо (або на побудованій моделі) моделюється взаємодія основи з одиночною палею. На підставі чисельних розрахунків та результатів випробувань ґрунтів палами на будівельному майданчику ітераційно визначається лінійна жорсткість зв'язку G_p під нижнім кінцем одиночної палі. Для визначення жорсткості паль у пальовому полі фундаменту слід враховувати їх взаємодію, тому значення жорсткості під нижніми кінцями паль G_{pf} буде дорівнювати:

$$G_{pf} = G_p \cdot \zeta = 513000 \cdot 0,2 = 102600 \text{ кН/м}, \quad (1)$$

де $G_p = R_m / S_p = 1539 / 0,003 = 513000$ кН/м – вертикальна лінійна жорсткість зв'язку під нижнім кінцем (підшою) одиночної палі, $R_m \approx 1539$ кН – середня реакція паль або середнє навантаження на палі (визначається попереднім розрахунком), $S_p = 0,003$ м – осідання одиночної палі на підставі результатів випробування ґрунтів палею при вертикальному навантаженні $F = R_m \approx 1539$ кН [15], ζ – коефіцієнт переходу від осідання одиночної палі S_p до середнього осідання пальового фундаменту s_m , од. Приймається нормативне значення $\zeta = 0,2$ [16].

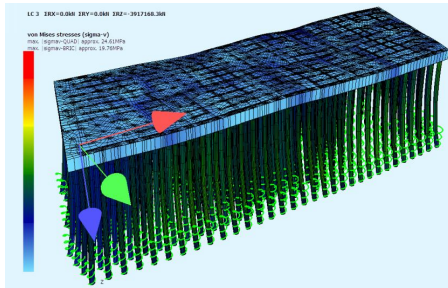
Розрахунок системи «ОФС» виконується як і для моделі «Шару»;

- **для моделі «Вінклера»** (див. рис. 9 (в)): робота паль з основою моделюється у вигляді вертикальних зв'язків кінцевої лінійної жорсткості G_{pf} під плитним ростверком, значення яких приймається як і для комбінованої моделі «Шару-Вінклера»: $G_{pf} = 102600$ кН/м.

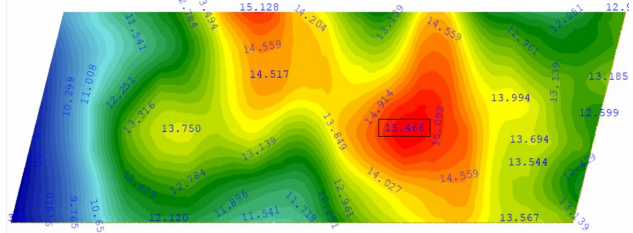
Розрахунок системи «ОФС» передбачає одноетапне формування НДС від власної ваги елементів будівлі та постійних навантажень на перекриттях і плитному ростверку фундаменту будівлі.

Результати та обговорення. На рис. 11-16 для наочності представлено деякі компоненти НДС пальово-плитного фундаменту у системі «ОФС», що отримані на підставі розрахунків методом скінченних елементів у програмі SOFiSTiK та геодезичного спостереження [17].

На рис. 11 представлено деформований стан пальово-плитного фундаменту у системі «ОФС» з комбінованою моделлю «Шару-Вінклера», а на рис. 12 – напрямок (вектор) та горизонтальні переміщення у рівні верху будівлі (від верху плитного ростверку фундаменту дорівнює $\approx 116,4$ м) у системі «ОФС» з використанням різних моделей.

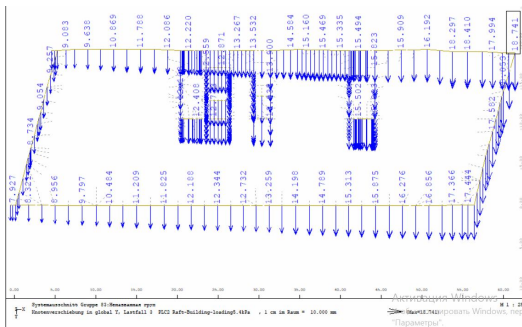


(a)

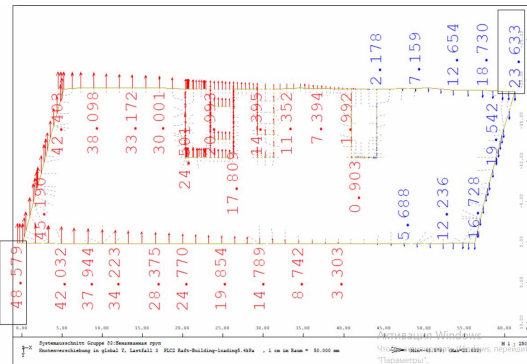


(б)

Рис. 11. Деформований стан пальово-плитного фундаменту у системі «ОФС» з використанням комбінованої моделі «Шару-Вінклера»: (а) деформована схема пальово-плитного фундаменту; (б) ізополя осідань плитного ростверку (мм)



(a)



(б)

Рис. 12. Горизонтальні переміщення уздовж осі «Y» у рівні верху будівлі у системі «ОФС» з використанням різних моделей: (а) модель «Шару»; (б) комбінована модель «Шару-Вінклера»

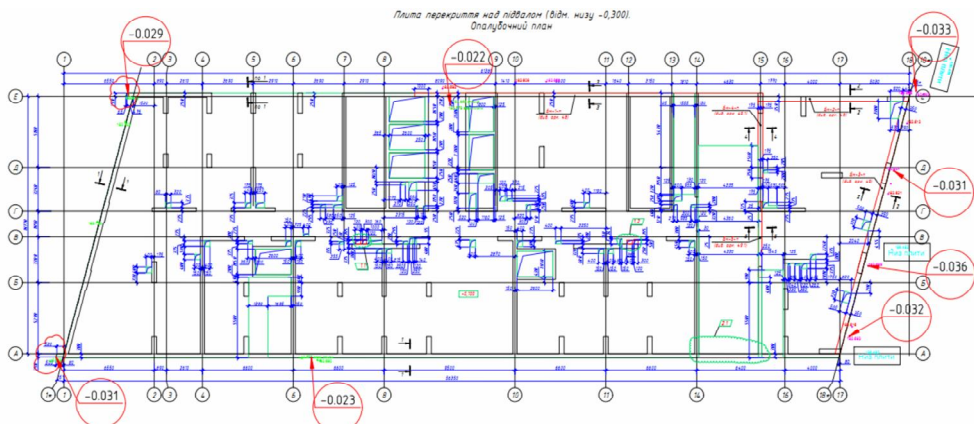


Рис. 13. Вертикальні переміщення (осідання) геодезичних марок у рівні перекриття над підвалом (абс. відм. $\approx 182,70$ м) (червень, 2025 р.)

У табл. 3 представлено дані для аналізу деформованого стану системи «ОФС» з різними моделями при середньому тиску $p \approx 490$ кПа під плитним ростверком та порівняння з даними геодезичного моніторингу за осіданнями будівлі (рис. 13) [17]. Для визначення осідань будівлі було застосовано високоточний роботизований електронний тахеометр - Leica Viva TS12 2" A R1000.

Таблиця 3

Порівняння компонентів деформованого стану системи «ОФС»
при середньому тиску $p \approx 490$ кПа під плитним ростверком

Дані	Чисельні дослідження			Геодезичні спостереження
	Модель «Шару»	Комбінована модель «Шару-Вінклера»	Модель «Вінклера»	
Максимальне значення осідання плитного ростверку фундаменту (будівлі) s_{max} , мм	196,0	15,5	18,0	36,0
Середнє значення осідання плитного ростверку фундаменту (будівлі) s_m , мм	180,0	13,0	15,0	30,0
Крен будівлі: напрямок (вектор) та максимальне горизонтальне переміщення верху будівлі (див. приклади на рис. 12)	Уздовж осі «+X», 94,0 мм. Вісь 1: Уздовж осі «-Y», 49,0 мм. Вісь 18: Уздовж осі «+Y», 24,0 мм	Уздовж осі «+X», 11,0 мм. Уздовж осі «+Y», 19,0 мм.	Уздовж осі «+X», 5,0 мм. Уздовж осі «+Y», 20,0 мм.	-

Аналіз результатів з табл. 3 дозволяє зробити наступні висновки:

- найбільш адекватними моделями ґрунтової основи за деформаціями споруди (плитного ростверку) є модель «Вінклера» та комбінована модель «Шару-Вінклера», осідання яких мають близькі значення до результатів спостережень, хоча і в 2 рази менші порівняно з експериментальними даними. При використанні комбінованої моделі «Шару-Вінклера» у порівнянні з моделлю «Вінклера» значення осідань є незначно меншими через розподільчу здатність та додатковий опір основи під плитним ростверком у межах довжини паль, що має фізичний сенс. Однак, осідання плитного ростверку з комбінованою моделлю «Шару-Вінклера» та моделлю «Вінклера» при рівній величині G_{pf} є практично рівними, тобто шари ґрунтів уздовж довжини паль у комбінованій моделі «Шару-Вінклера» практично не створюють опору навантаженому фундаменту із суцільним пальовим полем, що є експериментально обґрунтованим та приймається у нормах для розрахунку осідань пальових фундаментів: практично все навантаження p під плитним ростверком передається у рівень підшви паль;
- використання моделі «Шару» показує неадекватне максимальне осідання плитного ростверку ($s_{max}=196$ мм), що перевищує експериментальне значення у 5-ть разів, при фактичному тиску під підшвою ростверку $p \approx 490,0$ кПа. Слід зазначити, що при розрахунковому тиску ($p \approx 580,0$ кПа) значення осідання буде ще більшим ($s_{max} \approx 232$ мм) для даної споруди, що за нормами [9] перебільшує допустиме осідання $s_{max,u}=15$ см та вимагає проектування «неефективного» фундаменту з більшою довжиною паль;
- порівняння результатів при використанні моделі «Шару» та комбінованої моделі «Шару-Вінклера» показує не тільки зміну кількісних показників, а й зміну характеру горизонтальних переміщень верху висотної будівлі (див. рис. 12), що слід враховувати при оцінці допустимих кренів споруд. При використанні моделі «Шару» відбувається кручення будівлі по висоті, що пов'язано з особливостями розташуванням ядер та діафрагм жорсткості каркаса, різною жорсткістю основи під пальями у плані (див. рис. 8) та відносно великими осіданнями;

• використання моделі «Вінклера», яка не має розподільчої здатності, показує значення кренів будівлі уздовж осей «X» та «Y» згідно з діючим ексцентриситетом рівнодіючої від власної ваги несучих конструкцій у каркасі будівлі та постійного навантаження відносно центру плитного ростверку, тобто без врахування жорсткості основи фундаменту у плані та по глибині.

На рис. 14-15 представлено реакції R у головах паль фундаменту уздовж видів «1-1» та «2-2» (див. рис. 6) у системі «ОФС» з використанням різних моделей.

Із аналізу даних, що представлені рис. 13-14, можна зробити висновки:

• комбінована модель «Шару-Вінклера» дозволяє зменшити концентрації реакцій R у крайових палях у порівнянні з моделлю «Шару». Найбільш показовим є розподіл реакцій на рис. 15 через те, що палі №19 та №379 дійсно є «крайовими» (див. рис. 6);

• очікуване зниження реакцій у крайових палях у порівнянні з моделлю «Шару», ще й супроводжується збільшенням реакцій у середніх палях у порівнянні з моделлю «Вінклера», яка взагалі не має розподільчої здатності, що є особливістю роботи комбінованої моделі «Шару-Вінклера» - суцільно-дискретної моделі.

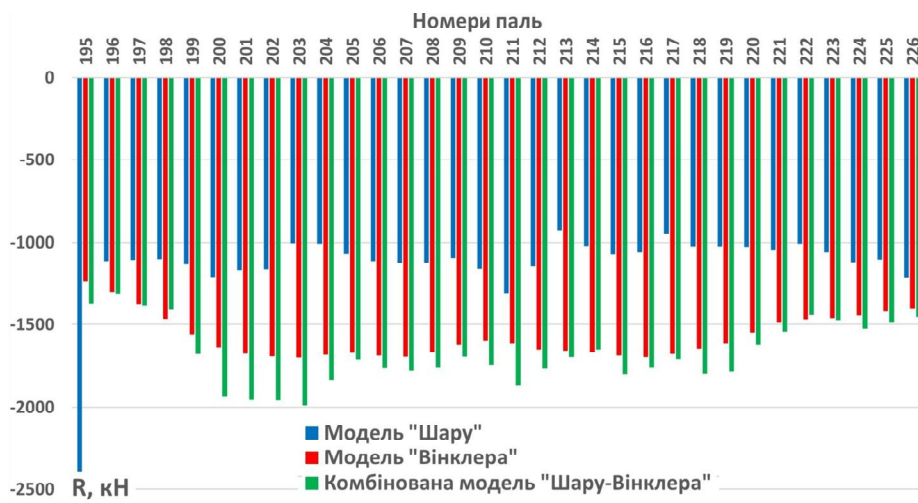


Рис. 14. Реакції R , що виникають у головах паль уздовж виду «1-1»

За критерій оцінки та для порівняння впливу моделей на напружений стан пально-плитного фундаменту пропонується прийняти суму згинальних моментів ($\Sigma|M_{X,Y}|$, кН·м/м) (див. рис. 17) в усіх скінченних елементах моделі плитного ростверку при рівних параметрах розбивки плити на скінченні елементи та умову у вигляді:

$$\Sigma|M_{X,Y}| = \Sigma|M_X| + \Sigma|M_Y| \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $\Sigma|M_X|$ - сума згинальних моментів уздовж осі X , кН·м/м, $\Sigma|M_Y|$ - сума згинальних моментів уздовж осі Y , кН·м/м.

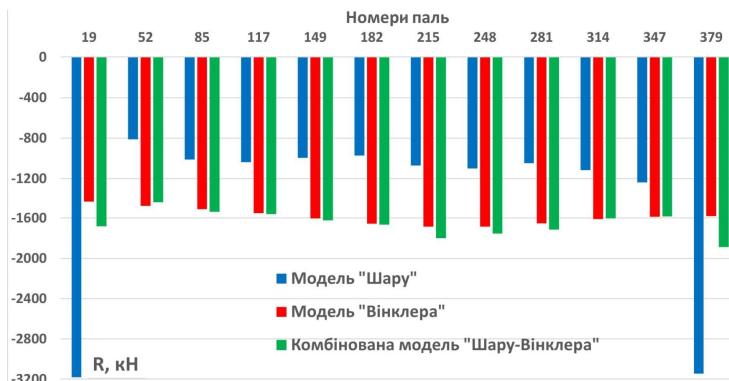


Рис. 15. Реакції R , що виникають у палях уздовж виду «2-2»

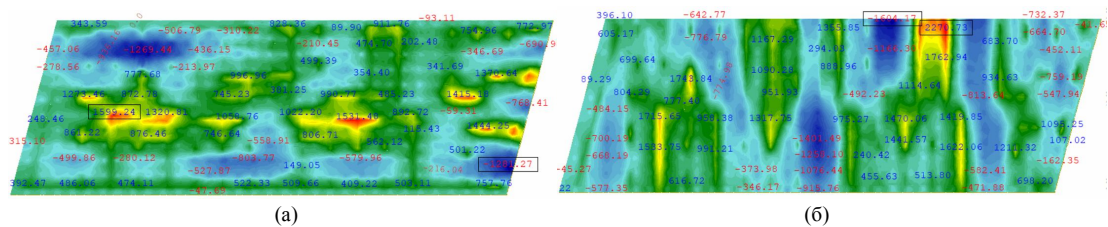


Рис. 16. Ізополя згинальних моментів у плитному ростверку у системі «ОФС» з використанням комбінованої моделі «Шару-Вінклера»: (а) згинальні моменти уздовж осі X (M_x , кН·м/м); (б) згинальні моменти уздовж осі Y (M_y , кН·м/м)

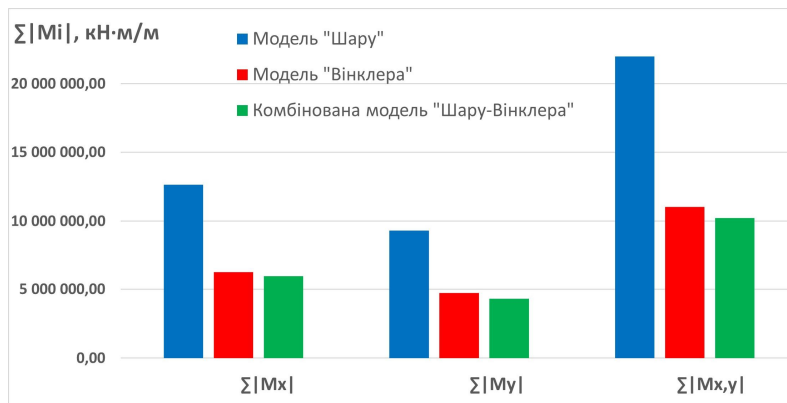


Рис. 17. Значення суми згинальних моментів $\Sigma|M_{x,y}|$ у плитному ростверку

Як видно з рис. 17, вплив комбінованої моделі «Шару-Вінклера» дає мінімальне значення сумарного згинального моменту ($\Sigma|M_{x,y}|_{\min}$) у плитному ростверку пальово-плитного фундаменту, яке менше в 2-а рази по відношенню до значення при впливі загальноприйнятої моделі «Шару» та практично дорівнює значенню при використанні моделі «Вінклера», яка не має розподільчої здатності. Звичайно, значне зниження сумарного згинального моменту та можливість суттєвого зниження армування плити вимагає ретельного інструментального моніторингу напруженого стану плитного ростверку подібних фундаментів для підтвердження результатів моделювання та обґрунтування комбінованої моделі «Шару-Вінклера» [11].

Висновки. Проведено чисельні дослідження впливу комбінованої (суцільно-дискретної) лінійно-деформованої моделі ґрунтової основи «Шару-Вінклера» на напружено-деформований стан (НДС) великорозмірного пальово-плитного фундаменту висотної будівлі у системі «основа-фундамент-споруда» («ОФС») за допомогою розрахункового комплексу SOFiStiK (у поєднанні з програмою WinTUBE). На підставі аналізу чисельних результатів досліджень, порівнянні з впливом загальноприйнятих моделей ґрунтової основи та геодезичних спостережень за осіданнями будівлі можна зробити основні висновки та рекомендації:

- використання комбінованої моделі «Шару-Вінклера» прогнозує найбільш близькі значення до результатів геодезичних спостережень у порівнянні з моделлю «Шару», хоча і в 2-а рази менші у порівнянні з експериментальними даними. Тут слід звернути увагу на те, що у даному випадку на основу діє значний тиск (реальний - $p \approx 490,0$ кПа; розрахунковий - $p \approx 580,0$ кПа), що суттєво перевищує тиск ($p_{\max} \approx 300,0$ кПа), що зазвичай приймався у радянських нормах (положення яких прийняті за основу у сучасних вітчизняних нормах ДБН і ДСТУ з розрахунку основ та фундаментів) за максимальний тиск на ґрунтову основу, та на підставі чого розроблялися відповідні нормативні методики. Тому, пропонується при тисках на ґрунтову основу пальових фундаментів $p > 300,0$ кПа знизити нормативне значення коефіцієнту переходу ζ [16] від осідання одиночної палі до осідання пальового фундаменту до $\zeta = 0,1$ для прогнозування надійних осідань пальово-плитних фундаментів висотних будівель;

- особливістю роботи комбінованої моделі «Шару-Вінклера» є те, що реакції у кутових та крайових палях фундаменту знижуються, ніж при впливі суцільної моделі «Шару», а реакції у середніх палях є більшими, ніж при впливі моделі основи без розподільчої здатності

«Вінклера». Через це при використанні комбінованої моделі «Шару-Вінклера» конструкція плитного ростверку сприймає найменший сумарний згинальний момент відповідно до запропонованої методики оцінки напруженого стану фундаменту;

- на цьому етапі теоретично-експериментальних досліджень комбінованої моделі «Шару-Вінклера» з відповідною методикою моделювання та коефіцієнтом переходу $\zeta=0,1$ відповідно до норм [16] її можна рекомендувати для застосовування як альтернативну модель ґрунтової основи при розрахунках великорозмірних пальово-плитних фундаментів у системі «ОФС». Важливо те, що комбінована модель «Шару-Вінклера» може бути реалізована у вітчизняних розрахункових комплексах «SCAD» та «LIRA», тобто без використання складних та не завжди обґрунтованих нелінійних моделей ґрунтової основи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лущковский И. Я. Взаимодействие конструкций с основанием / И. Я. Лущковский. – Харьков: ХДАГХ (Бібліотека журналу ITE), 2000. – Т. 3. – 264 с.
2. Empfehlungen des Arbeitskreises "Numerik in der Geotechnik" – EANG. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (ed.), 2014. – 196 pp.
3. Katzenbach R., Leppla S., Choudhury D. Foundation Systems for High-Rise Structures. – CRC Press, Taylor & Francis Group, USA and UK, 2017. – 298 p. ISBN 978-1-4987-4477-5.
4. Wani Kh. M. N. S., Showkat R. Soil Constitutive Models and Their Application in Geotechnical Engineering: A Review // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – Vol. 7 Issue 04. – 2018. – pp. 137-145.
5. Samorodov O., Tabachnikov S., Dytiuk O., Bondar O. The improved soil base model for the calculation of the combine draft pile foundation with the structural nonlinear behavior of the elements // ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering. – Poltava: PNTU, 2023. – VOL. 1 (60). – PP. 38-46, DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2023.60.3185>
6. Бойко І. П., Скочко Л. О., Хоронжевський М. В. Ідентифікація параметрів ґрунту на основі натурних випробувань паль // Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 42. – С. 9-18. DOI: 10.32347/0475-1132.42.2021.9-18.
7. Носенко В.С., Кашиїда О.О. Числове моделювання експерименту випробування групи паль з використанням різних моделей ґрунтової основи // Опір матеріалів і теорія споруд. – К.: КНУБА, 2022. – Вип. 109. – С. 441-454. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.441-454.
8. Горбунов-Посадов М. И., Маликова Т. А., Соломин В. И. Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984. – [3-е изд.]. – 679 с.
9. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. – Київ: Мінрегіон України, ДП «Укрархбудінформ», 2018. – 36 с.
10. Самородов А. В. Проектирование эффективных комбинированных свайных и плитных фундаментов многоэтажных зданий: Монография. – Харьков: Типография Мадрид, 2017. – 204 с.
11. Патент на корисну модель №161453, Україна МПК E02D 27/12. СПОСІБ МОДЕЛЮВАННЯ ҐРУНТОВОЇ ОСНОВИ ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТІВ (Самородов О.В., Гударі Р., Табачников С.В., Муляр Д.Л., Бондар О.П.). Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова; Універсіте де Маскарень. – Заявл. 18.06.2024. Опубл. 10.12.2025, бюл. № 50/2025.
12. Самородов О. В., Дитюк О. Є. Експериментальне обґрунтування моделі ґрунтової основи для розрахунку комбінованого плитно-пального фундаменту // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – Вип. 1 (109). – С. 42-49. DOI: 10.33042/2311-7257.2023.109.1.7.
13. Самородов О. В. Патент на корисну модель UA № 153625. Великорозмірний пальново-плитний фундамент. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – Заявл. 11.07.2022. Опубл. 02.08.2023. Бюл. №31/2023.
14. Технічний звіт про інженерно-геологічні вишукування на об'єкті: «Будівництво житлового комплексу з об'єктами громадського призначення та дитячим дошкільним закладом на перетині вул. Академіка Глушкова та Академіка Заболотного, вул. Академіка Заболотного, 1, у Голосіївському районі м. Києва» (друга черга будівництва) / ТОВ «НВФ «ГЕОЛОГО-ГЕОДЕЗИЧНИЙ СЕРВІС»; гол. спец. Кулинич С.В. – Київ, 2018. – 26 с.
15. Науково-технічний звіт: «Дослідження несучої здатності 13 (тринадцяти) буровісційних паль вертикальним статичним навантаженням на ділянці будівництва об'єкта: «Будівництво житлового комплексу з об'єктами громадського призначення та дитячим дошкільним закладом на перетині вул. Академіка Глушкова та Академіка Заболотного, вул. Академіка Заболотного, 1 у Голосіївському районі м. Києва. Друга черга будівництва» / ПП «Пайл Тест Системс»; керівник та відп. викон. Самородов О.В. – Харків, 2021. – 158 с.
16. ДСТУ Б В.2.1-27:2010. Палі. Визначення несучої здатності за результатами польових випробувань. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 11 с.
17. Звіт з науково-дослідної роботи: «Інструментальний моніторинг напруженого стану системи «ґрунтова основа – пальново-плитний фундамент» будівельного об'єкту: «Будівництво житлового комплексу з об'єктами громадського призначення та дитячим дошкільним закладом на перетині вул. Академіка Глушкова та Академіка Заболотного, 1 у Голосіївському районі м. Києва (Друга черга будівництва, Житловий будинок № 3, секція № 1)» у рамках науково-технічного супроводу" / ХНУМГ ім. О.М. Бекетова; керівник д.т.н. О.В. Самородов. – Харків: 2025. – 82 с.

REFERENCES

1. Luchkovskiy I. Ya. (2000). Vzaimodeistvie konstruktssii s osnovaniem [Interaction of structures with the base]. Kharkiv: KhDAGKh (Biblioteka zhurnaluu ITE). Vol. 3, 264 p.
2. Empfehlungen des Arbeitskreises "Numerik in der Geotechnik" – EANG. (2014). Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (ed.). 196 pp.
3. Katzenbach R., Leppla S., Choudhury D. (2017). Foundation Systems for High-Rise Structures.CRC Press, Taylor & Francis Group, USA and UK. ISBN 978-1-4987-4477-5.

4. Wani Kh. M. N. S., Showkat R. (2018). Soil Constitutive Models and Their Application in Geotechnical Engineering: A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 7 (4), 137-145.
5. Samorodov O., Tabachnikov S., Dytiuk O., Bondar O. (2023). The improved soil base model for the calculation of the combined raft pile foundation with the structural nonlinear behavior of the elements. *Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 1 (60), 38-46. <https://doi.org/10.26906/znp.2023.60.3185>.
6. Boiko I. P., Skochko L. O., Khoronzhevskiy M. V. (2021). Identifikatsiya parametriv gruntu na osnovi naturnykh vyprobuvan pal [Identification soil parameters based on pile field tests]. *Osnovy ta fundamenti*, 42, 9-18. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.42.2021.9-18>.
7. Nosenko V. S., Kashoida O. O. (2022). Chyslove modeliuvannya eksperymentu vyprobuвання hrupy pal z vykorystanniam ryznykh modeli gruntovoi osnovy [Numerical modeling of pile group test experiment using different soil models]. *Opir materialiv i teoriya sporud*, 109, 441-454. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.441-454>.
8. Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. (1984). Raschet konstruktssii na uprugom osnovanii [Design of structures on elastic foundation]. Moscow: Stroyizdat. 679 p.
9. DBN V.2.1-10:2018. (2018). Osnovy i fundamenti budivel ta sporud. Osnovni polozhennia [Bases and foundations of buildings and structures. General provisions]. Kyiv: Minrehion Ukraine, DP Ukrarkhbudinform. 36 p.
10. Samorodov A. V. (2017). Proektirovanie effektivnykh kombinirovannykh svainykh i plitnykh fundamentov mnogoetazhnykh zdaniy [Design of effective combined pile-raft foundations of multistory buildings]. Kharkiv: Typohrafiia Madrid. 204 p.
11. Utility model patent No. 161453, Ukraine MPK E02D 27/12. Sposib modeliuvannya gruntovoi osnovy palovykh fundamentiv (Method for modeling the soil base of pile foundations) (Samorodov O.V., Gudari R., Tabachnikov S.V., Mulyar D.L., Bondar O.P.). Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov; Université de Mascarene. – Appl. 06/18/2024. Publ. 12/10/2025, Bulletin No. 50/2025.
12. Samorodov O. V., Dytiuk O. Ye. (2023). Eksperymentalne obgruntuvannya modeli gruntovoi osnovy dlia rozrakhunku kombinovanoho plytno-palovoho fundamentu [Experimental justification of the soil base model to calculate a combined pile-raft foundation]. *Naukovyi visnyk budivnytstva*, 1 (109), 42-49. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2023.109.1.7>.
13. Samorodov O. V. (2023). Utility model patent UA No. 153625. Velykorozmnyi palovo-plytnyi fundament [Large-sized pile-raft foundation]. Kharkiv: O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Filed on 07/11/2022. Published on 08/02/2023. Bulletin No. 31/2023.
14. LLC NVF GEOLOGICAL AND GEODETIC SERVICE, Chief specialist Kulinich, E.V. (2018) Tekhnichniy zvit pro inzhenerno-heolohichni vyshukuvannya na ob'ekti: "Budivnytstvo zhytlovoho kompleksu z ob'ekty hromadskoho pryznachennia ta dytyachym doshkilnym zakladom na peretyni vul. Akademika Hlushkova ta Akademika Zabolotnoho, vul. Akademika Zabolotnoho, 1, u Holosiivskomu raioni m. Kyieva (druha cherha budivnytstva)" [Technical Report on Engineering and Geological Investigations at the Site: "Construction of a Residential Complex with Public Facilities and a Kindergarten at the Intersection of Akademika Hlushkova Street and Akademika Zabolotnoho Street, 1, in the Holosiivskiy District of Kyiv (Second Construction Phase)"]. Kyiv: LLC "Geologo-Heodezychnyi Servis". 26 p.
15. PP Pile Test Systems, Head and resp. executive Samorodov, O.V. (2021). Naukovo-tekhichniy zvit «Doslidzhennia nesuchoi zdatnosti 13 (trynadsiaty) buroiniektsiinykh pal vertykalnym statychnym navantazhenniam na diliansi budivnytstva ob'ekta: «Budivnytstvo zhytlovoho kompleksu z ob'ekty hromadskoho pryznachennia ta dytyachym doshkilnym zakladom na peretyni vul. Akademika Hlushkova ta Akademika Zabolotnoho, vul. Akademika Zabolotnoho, 1 u Holosiivskomu raioni m. Kyieva. Druha cherha budivnytstva» [Scientific and Technical Report: "Investigation of the Bearing Capacity of Thirteen Bored Injection Piles under Vertical Static Loading at the Construction Site: 'Construction of a Residential Complex with Public Facilities and a Kindergarten at the Intersection of Akademika Hlushkova Street and Akademika Zabolotnoho Street, 1, in the Holosiivskiy District of Kyiv. Second Construction Phase'"]]. Kharkiv: PP "Pile Test Systems". 158 p.
16. DSTU B V.2.1-27:2010. (2011). Pali. Vyznachennia nesuchoi zdatnosti za rezultatamy polovykh vyprobuvan [Piles. Determination of bearing capacity from field tests]. Kyiv: Minrehionbud Ukraine. 11 p.
17. O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Head Samorodov, O.V., DSc(Tech). (2025). Instrumentalnyi monitoryng napruzhenoho stanu systemy "gruntova osnova – palovo-plytnyi fundament" budivelnogo ob'ektu. Budivnytstvo zhytlovoho kompleksu z ob'ekty hromadskoho pryznachennia ta dytyachym doshkilnym zakladom na peretyni vul. Akademika Hlushkova ta vul. Akademika Zabolotnoho, vul. Akademika Zabolotnoho, 1, u Holosiivskomu raioni m. Kyieva (druha cherha budivnytstva, zhytlovyi budynok №3, seksii №1) [Instrumental Monitoring of the Stress State of the "Soil Base – Pile-Raft Foundation" System of the Building Object: "Construction of a Residential Complex with Public Facilities and a Kindergarten at the Intersection of Akademika Hlushkova Street and Akademika Zabolotnoho Street, 1, in the Holosiivskiy District of Kyiv (Second Construction Phase, Residential Building No. 3, Section No. 1)"]. Kharkiv: O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. 82 p.

Стаття надійшла 07.10.2025

Самородов О.В., Бондар О.П.

ВПЛИВ СУЦІЛЬНО-ДИСКРЕТНОЇ МОДЕЛІ ҐРУНТОВОЇ ОСНОВИ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ВЕЛИКОРОЗМІРНОГО ПАЛОВО-ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТУ ВИСОТНОЇ БУДІВЛІ

У статті, по-перше, проаналізовано існуючі підходи до моделювання ґрунтових основ великорозмірних пальново-плитних фундаментів багатоповерхових будівель та споруд із застосуванням сучасних розрахункових комплексів «SOFiStiK», «ABAQUS», «Plaxis», «SCAD», «LIRA» тощо при розрахунках системи «основа – фундамент – споруда» та вказано на недоліки. Додатково у статті розглянуто методологію удосконалення моделі ґрунтової основи пальново-плитних фундаментів як спосіб моделювання ґрунтової основи палових фундаментів, що патентується в Україні. Основний матеріал статті присвячено дослідженню впливу удосконаленої лінійно-деформованої (пружної) комбінованої (суцільно-дискретної) моделі ґрунтової основи «Шару-Вінклера» для розрахунку великорозмірного пальново-плитного фундаменту висотної будівлі. Комбінована модель «Шару-Вінклера» поєднує в собі параметри та властивості двох найбільш відомих та застосовуваних моделей у практиці розрахунків: моделі суцільного шару скінченної розподільчої здатності (модель «Шару») та дискретної моделі без розподільчої здатності з вертикальними зв'язками кінцевої жорсткості під плитним ростверком (відомої як модель «Вінклера»). Отримані чисельні результати, їх аналіз та порівняння свідчать про те, що використання комбінованої моделі «Шару-Вінклера» знижує реакції у кутових та периферійних палях фундаменту у порівнянні з моделлю «Шару», а реакції у середніх палях виходять більшими, ніж при впливі моделі основи без розподільчої здатності «Вінклера». Через це при

використанні комбінованої моделі «Шару-Вінклера» конструкція плитного ростверку сприймає найменший сумарний згинальний момент відповідно до запропонованої методики оцінки напруженого стану фундаменту, тому застосування комбінованої моделі «Шару-Вінклера» на відміну від загальноприйнятої моделі «Шару» при розрахунках великорозмірних пальово-плитних фундаментів може мати практичне значення при їх раціональному проєктуванні, так як армування може бути суттєво знижено при відповідному натурному експериментальному обґрунтуванні. На цьому етапі теоретично-експериментальних досліджень удосконалена комбінована модель «Шару-Вінклера» (з відповідною методикою моделювання) рекомендується для застосування у якості альтернативної моделі ґрунтової основи при розрахунках великорозмірних пальово-плитних фундаментів будівель та споруд, що дає можливість її реалізації у вітчизняних розрахункових комплексах «SCAD» та «LIRA».

Ключові слова: ґрунтова основа, пальово-плитний фундамент, великорозмірний, висотна будівля, модель, пружна, суцільна, дискретна, комбінована, напружено-деформований стан, геодезичні спостереження.

Samorodov O.V., Bondar O.P.

THE EFFECT OF THE CONTINUOUS-DISCRETE SOIL BASE MODEL ON THE STRESS-STRAIN STATE OF THE LARGE-SIZED PILE-RAFT FOUNDATION OF A HIGH-RISE BUILDING

The paper firstly reviews existing approaches to simulating soil bases for large-sized pile-raft foundations of multistory buildings and structures using up-to-date calculation software packages such as SOFiSTiK, ABAQUS, Plaxis, SCAD, LIRA and others when calculating the base-foundation-building system, and points out their shortcomings. Additionally, the paper considers the methodology for improving the soil base model for pile-raft foundations as a method for simulating the soil base of pile foundations, which is patent pending in Ukraine. The main part of the paper is concerned with investigating the effect of the improved linearly deformed (elastic) combined (continuous-discrete) "Layer-Winkler" subsoil model to calculate a large-sized pile-raft foundation of a high-rise building. The combined "Layer-Winkler" model combines the parameters and properties of the two most well-known and widely used models in design calculation such as the model of the continuous layer of finite distribution capability (the "Layer" model) and the discrete model of no distribution capability with vertical braces of finite stiffness under the raft foundation structure (known as the "Winkler" model). The obtained numerical results, their analysis and comparison indicate that the use of the combined "Layer-Winkler" model reduces the reaction forces in the corner and peripheral piles of the foundation compared to the "Layer" model, while the reaction forces in the middle piles appear to be greater than those resulting from the use of the "Winkler" model of no distribution capability. As a result, when using the combined "Layer-Winkler" model, the raft foundation structure takes up the smallest total bending moment in accordance with the proposed method for assessing the stress state of the foundation. Therefore, unlike the conventional "Layer" model, the use of the combined "Layer-Winkler" model in the calculation of large-sized pile-raft foundations may be of practical importance in the rational design of this type of foundation, as reinforcement can be significantly reduced with an appropriate field-based experimental justification. At the current stage of theoretical and experimental research, the improved combined "Layer-Winkler" model (with the corresponding simulation method) is recommended to be used as an alternative soil base model in the calculation of large-sized pile-raft foundations for buildings and structures, which allows for its implementation in the domestic calculation software packages such as SCAD and LIRA.

Keywords: soil base, pile-raft foundation, large-sized, high-rise building, model, elastic, continuous, discrete, combined, stress-strain state, geodetic observations.

УДК 624.131 : 624.15

Самородов О.В., Бондар О.П. Вплив суцільно-дискретної моделі ґрунтової основи на напружено-деформований стан великорозмірного пальово-плитного фундаменту висотної будівлі // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник – К.: КНУБА, 2025. – Вип. 115. – С. 360-374.

У статті розглянуто методологію удосконалення моделі ґрунтової основи пальово-плитних фундаментів як способу моделювання ґрунтової основи пальових фундаментів, що патентується в Україні. Основний матеріал статті присвячено дослідженню впливу удосконаленої лінійно-деформованої (пружної) комбінованої (суцільно-дискретної) моделі ґрунтової основи «Шару-Вінклера» для розрахунку великорозмірного пальово-плитного фундаменту висотної будівлі.

Табл. 3. Іл. 17. Бібліогр. 17 назв.

UDC 624.131 : 624.15

Samorodov O.V., Bondar O.P. The Effect of the Continuous-Discrete Soil Base Model on the Stress-Strain State of the Large-Sized Pile-Raft Foundation of a High-Rise Building // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles. - K.: KNUBA, 2025. – Issue 115. – P. 360-374. – Ukr.

The paper considers the methodology for improving the soil base model for pile-raft foundations as a method for simulating the soil base of pile foundations, which is patent pending in Ukraine. The main part of the paper is concerned with investigating the effect of the improved linearly deformed (elastic) combined (continuous-discrete) "Layer-Winkler" subsoil model to calculate a large-sized pile-raft foundation of a high-rise building.

Tab. 3. Fig. 17. Ref. 17.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): д-р технічних наук, професор, професор кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова САМОРОДОВ Олександр Віталійович

Адреса: 61002 Україна, м. Харків, вулиця Черноголазівська 17, ХНУ міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail: osamorodov@ukr.net; oleksandr.samorodov@kname.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4395-9417>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): Аспірант кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова. БОНДАР Олександр Петрович

Адреса: 61002 Україна, м. Харків, вулиця Черноголазівська 17, ХНУ міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail: oleksandr.bondar2@kname.edu

ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0006-8468-6805>