

Вплив можливого водонасичення лесового ґрунту на напружено-деформований стан фундаментів багатоповерхового будинку

Вероніка Жук¹, Ірина Павленко²

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,
¹zhuk.vv@knuba.edu.ua, orcid.org/ 0000-0002-1114-3192
²iryna_pavlenko@ukr.net

DOI: 10.32347/0475-1132.44.2022.27-43

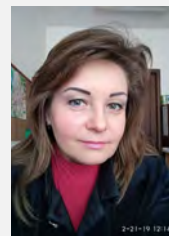
Анотація. Господарська діяльність людини у сфері будівництва має своїм наслідком зростання щільності забудови, як наслідок, відведення під забудову ділянок, що раніше вважались ризикованими з точки зору якості ґрунтових умов, збільшення насичення ґрунтової товщі підземними комунікаціями. Усі ці фактори мають безпосереднє значення, коли мова йде про використання лесових ґрунтів у якості основи при проектуванні, зведенні та експлуатації нових об'єктів будівництва.

Лесові ґрунти вкривають близько 80% території України. Ці ґрунти мають негативну особливість – здатність знижувати свої механічні властивості при контакті з водою та давати додаткові деформації просідання. Отже, значна частина будинків зводиться саме в таких ґрунтових умовах, а тому фундаментні конструкції цих будівель і споруд мають проектуватися з врахуванням можливості виникнення нерівномірних деформацій. Тому актуальність врахування спільної роботи системи «просідаюча основа – фундамент – надземні конструкції» не зменшується, а навіть зростає.

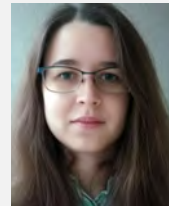
Лесові ґрунти у сухому стані завдяки структурним зв'язкам мають добрі фізико-механічні характеристики. Проте зі збільшенням вологості пористість ґрунту зазнає різкої зміни, опір стисненню стрімко знижується. Відбувається руйнування структурних зв'язків, виникає просідання.

Пошук надійного та економічного варіанту фундаментних конструкцій є актуальним питанням при проектуванні будівель і споруд на сучасному рівні, особливо в умовах будівництва на ґрунтах, що здатні просідати при можливому водонасиченні.

У роботі представлено варіантне проектування фундаментів будинку. При цьому було



Вероніка Жук
доцент кафедри
геотехніки
к.т.н., доц.



Ірина Павленко
магістр кафедри
геотехніки

розглянуто вплив можливого водонасичення лесових ґрунтів основи на напружено-деформований стан фундаментів із врахуванням різних схем можливого замочування лесових ґрунтів залежно від розмірів та розташування зон водонасичення в плані будинку. Виконано аналіз результатів числового моделювання спільної роботи елементів системи «основа – фундамент – надземні конструкції», обґрунтовано вибір найбільш надійного варіанту фундаментів. Підтверджено, що розміри та розташування в плані зон замочування лесового ґрунту здійснюють вплив на перерозподіл напружень у конструкціях фундаментів. Показано, що використання варіативного проектування фундаментів, їх параметрів з врахуванням негативних факторів відносно ґрунтових умов будівельного майданчика і ситуацій, що можуть виникнути під час експлуатації будинку, дозволяє обрати економічний та надійний варіант фундаменту.

Ключові слова. Числове моделювання, напружено-деформований стан, лесовий ґрунт, нерівномірні деформації, пальовий фундамент, залізобетонний каркас.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Дослідження присвячено впливу можливого водонасичення лесового ґрунту основи на напружено-деформований стан фундаментів будинку. Актуальність виконаного дослідження полягає в необхідності врахування при проектуванні нових будівельних об'єктів можливого виникнення негативного явища просідання в ґрунтах основи, коли водонасичення може виникати не лише прогнозовано, а й внаслідок аварійних ситуацій на міських інженерних мережах, техногенних катастроф, штучної зміни характеру руху підземних вод, непродуманих рішень на будівельному майданчику тощо.

Лесові ґрунти мають значне поширення на території України та вкривають близько 80% її поверхні. Такі ґрунти відрізняються своєю негативною особливістю при контакті з водою – здатністю знижувати свої механічні властивості та давати додаткові деформації просідання. Отже, переважна частина будівель і споруд в Україні будується та експлуатується саме в таких ґрунтових умовах. Цим пояснюється необхідність проектування фундаментних конструкцій цих будівель і споруд з врахуванням можливості виникнення нерівномірних деформацій внаслідок просідання лесових ґрунтів при їх можливому водонасиченні. В зв'язку з цим, актуальність виконання розрахунків спільної роботи елементів системи «основа – фундамент – надземні конструкції» не зменшується, а навіть зростає для відслідковування перерозподілу внутрішніх зусиль у несучих конструкціях внаслідок виникнення можливих нерівномірних деформацій ґрунтової основи.

Лесові ґрунти завдяки своїм структурним зв'язкам у природному стані мають достатньо добрі за величиною показники фізико-механічних властивостей. Проте зі збільшенням вмісту вологи відбувається руйнування структурних зв'язків, опір стисненню стрімко знижується, пористість ґрунту зазнає різкої зміни, спостерігається явище просідання. Врахування такої поведінки ґрунту основи фундаментів є обов'язковим

при проектуванні будівель і споруд, що зводяться на просідаючих ґрунтах.

Для сучасного рівня проектування фундаментів актуальним питанням є пошук надійного та одночасно економічного варіанту фундаментних конструкцій, особливо в умовах будівництва на ґрунтах, що здатні просідати при їх можливому водонасиченні внаслідок аварійних втрат із водонесних мереж або інших техногенних чи природних причин підвищення вмісту вологи.

У представленій роботі наведено результати виконаного варіантного проектування фундаментів будинку з врахуванням можливого водонасичення лесових ґрунтів основи. Було розглянуто вплив можливого виникнення нерівномірних деформацій основи на напружено-деформований стан фундаментів із врахуванням різних схем замочування лесових ґрунтів - залежно від розмірів зон водонасичення та їх розташування в плані будинку.

Безумовно, числове моделювання спільної роботи елементів системи «основа – фундамент – надземні конструкції», дає можливість відслідковувати перерозподіл напружень у несучих конструкціях будівель і споруд, що є особливо важливим для випадків можливого виникнення нерівномірних деформацій ґрунтової основи. Застосування комп'ютерної симуляції та виконання варіативних розрахунків відкриває шлях для пошуку та обґрунтування раціонального та одночасно надійного варіанту фундаментів. Сучасний рівень проектування основ і фундаментів будівель і споруд на просідаючих ґрунтах має обов'язково враховувати можливий розвиток негативних факторів стосовно ґрунтових умов будівельного майданчика і різних аварійних ситуацій, що можуть виникнути під час експлуатації будинку чи споруди.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сучасний підхід використання комп'ютерної симуляції є найдоступнішим та дуже зручним способом прогнозування поведінки ґрунтової основи фундаментів будівель та споруд. Врахування взаємодії ґрунтової

основи з фундаментами при виконанні геотехнічних розрахунків є важливим етапом проектування фундаментних та надземних конструкцій багатоповерхових будівель. Достовірність результатів розрахунків з використанням числового моделювання залежить від цілого ряду складових:

- вихідних даних про параметри ґрунтового середовища;
- моделі середовища, що описує закономірності його поведінки;
- розрахункової схеми, яка включає всі елементи системи «основа – фундамент – надземні конструкції»;
- постановки задач розрахунку, що враховує необхідні змінні параметри, етапність змін тощо.

Якщо можливості програмних комплексів сьогодні, як правило, задовольняють вимоги конструкторів-проектувальників та дослідників, то моделі середовищ на даний момент все ще потребують розвитку, вдосконалення або уточнення, коли питання йде про будівництво в складних ґрунтових умовах з можливістю розвитку певних негативних гідро-геологічних ситуацій.

Питаннями вивчення властивостей лесових ґрунтів, закономірностей їх поведінки присвячено численні праці багатьох вчених, серед яких Бойко І.П., Винников Ю.Л. [2], Дранников А.М., Зоценко Н.Л., Краєв В.Ф., Соколов М. [9] та інші. Наприклад, публікація Гранько О.В. [3] присвячена висвітленню результатів дослідження зміни значень фізико-механічних показників лесових суглинків під фундаментами за умов їх підтоплення.

Над подальшою розробкою та вдосконаленням розрахункових моделей працювали і працюють ряд науковців, серед яких Бойко І.П. [1], Корнієнко М.В. [5], Моргун А.С. [7]. Наприклад, з використанням числового методу граничних елементів авторами публікації [7] було представлено розв'язання нелінійної задачі впливу на несучу спроможність палі від зміни напружено-деформованого стану лесових ґрунтів через їх замокання.

Публікація Моторного М.А. [8] висвітлює результати визначення напружено-

деформованого стану основи пальових фундаментів на лесових просідаючих ґрунтах при замочуванні просідаючої товщі знизу вгору (розглянуто випадок можливого підтоплення території забудови).

Авторами публікації [4] Жук В.В. та Підлуцьким В.Л. розглянуто причини та характер нерівномірних деформацій основи фундаментів будівель і споруд для дослідження взаємодії елементів системи «ґрунтова основа – фундамент – будівля».

Колектив авторів, серед яких Моргун А.С., Меть І.М. та інші [6], розглянули за методом граничних елементів взаємодію фундаментів будівлі з пружно-пластичною багатошаровою основою для явища замокання основи. Публікація Янко К.О. [10] присвячена дослідженню зміни напружено-деформованого стану лесової основи пальового фундаменту внаслідок її замокання.

МЕТА РОБОТИ

Метою виконаного дослідження є пошук оптимального варіанту фундаментних конструкцій будинку в умовах нерівномірних деформацій основи внаслідок можливого підвищення вологості лесових ґрунтів від аварійних втрат із водоносних мереж.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом виконаного дослідження є взаємодія будинку з основою, ґрунти якої характеризуються зниженням своїх механічних властивостей при водонасиченні та здатністю давати додаткові деформації просідання. Предмет дослідження - напружено-деформований стан фундаментів будинку.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні задачі:

- виявлення найнебезпечніших схем можливого водонасичення лесового ґрунту, що викликають найбільші нерівномірні деформації фундаментів.
- варіантне проектування фундаментів в умовах нерівномірних деформацій основи при можливих аварійних втратах із водоносних мереж.
- дослідження перерозподілу

навантажень на палі при можливому просіданні лесового шару ґрунту внаслідок його водонасичення.

- оцінка впливу розмірів зони зволоження лесових ґрунтів та її розташування в плані на перерозподіл зусиль у ростверках пальових фундаментів.
- аналіз впливу схем можливого замочування лесових ґрунтів на характер деформування фундаментів.

Дослідження було виконано на прикладі багатоквартирного житлового будинку, що за класом наслідків відповідальності відноситься до СС2. Коефіцієнт надійності за призначенням для II класу відповідальності $\gamma_n = 1,15$. Граничне осідання основ для заданого виду будівель і споруд $S_u = 15$ см.

За об'ємно-планувальним рішенням житловий будинок складається з однієї 16-поверхової секції з підвалом та технічним горіщним поверхом та має габаритні розміри в плані 27 x 12 м. Конструктивна схема житлового будинку каркасна (монолітний залізобетонний безригельний в'язевий каркас) з несучими залізобетонними колонами із заповненням зовнішніх стін кладкою з керамічної цегли. Ядро жорсткості запроектовано

у вигляді залізобетонних стін сходової клітини та ліфтової шахти. Вертикальну жорсткість каркасу будинку забезпечують жорсткі вузли сполучення колон, діафрагм жорсткості та плит перекриття і покриття між собою в поздовжньому і поперечному напрямках. Просторова жорсткість будівлі забезпечується сумісною роботою всіх елементів каркасу будівлі – колонами, стінами стовбура жорсткості та монолітними залізобетонними плитами перекриття. Перекриття запроектовано залізобетонне монолітне, товщиною 200 мм, колони каркасу перерізом 300 x 400 мм.

Будівельний майданчик знаходиться у м. Києві. Рельєф місцевості похилий у північно-східному напрямку, є перепад позначок поверхні в межах 3..5 м, абсолютні позначки знаходяться в діапазоні 182,5...177,5 м (рис.1). Район будівництва відноситься до розвинутої мережі правих приток р. Либідь, поверхня цього району хвиляста, прорізана долинами струмків, річок та глибокими балками. У зв'язку зі зношеністю міських інженерних мереж, їх аварійною експлуатацією можливий ризик підтоплення території будівництва, що потрібно врахувати при проє-

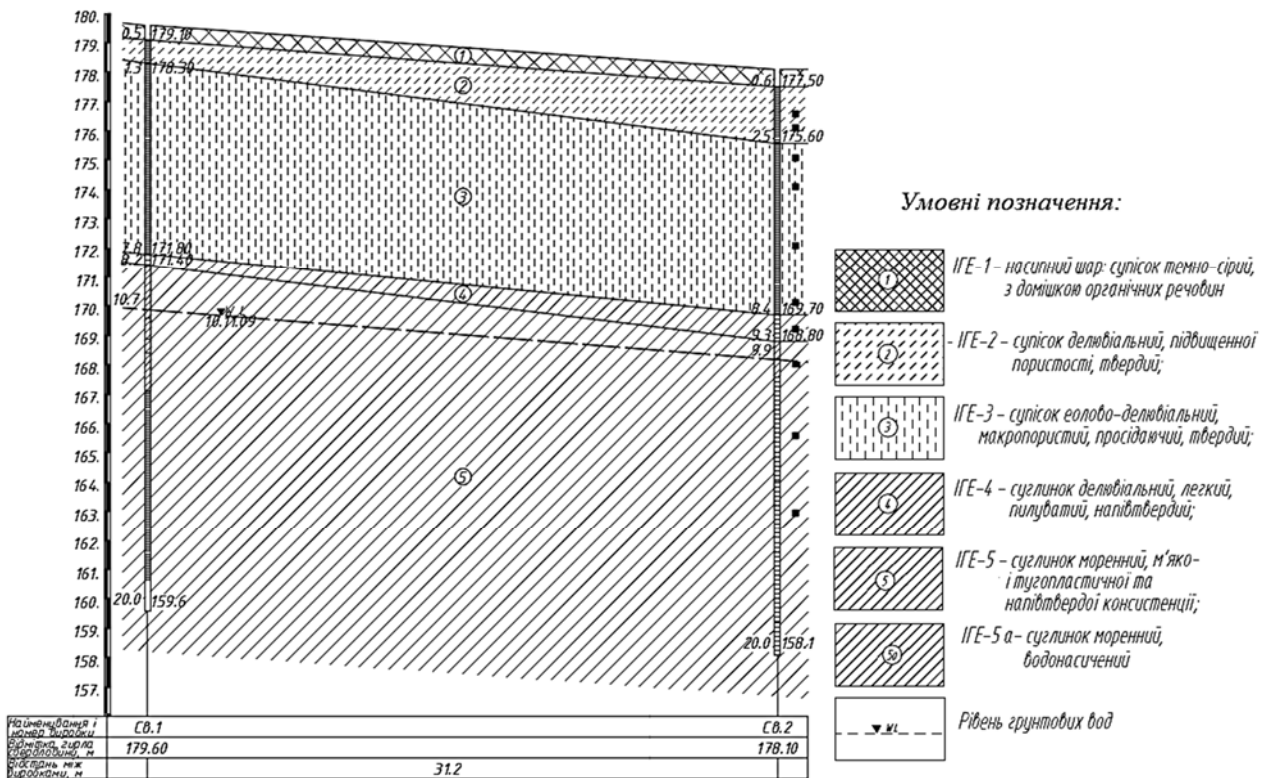


Рис.1 Інженерно-геологічний розріз
Fig.1 Geological conditions of the construction site

ктування фундаментних конструкцій.

Геологічна будова (рис.1) ділянки будівництва складена наступними відкладами:

- верхня частина ґрунтової товщі представлена насипними ґрунтами та делювіальними супісками невитриманого залягання підвищеної пористості, неоднорідні та сильно стисливі;

- підстеляючі їх еолово-делювіальні лесові супіски є неоднорідними за своїми будівельними властивостями, знаходяться в твердому стані, можливе проявлення просідаючих властивостей при їх водонасиченні;

- нижче залягають моренні суглинки змінної консистенції (від напівтвердої до м'якопластичної), неоднорідність вологості суглинків по глибині і за простиранням пов'язана з наявністю водонасичених лінз та прошарків супісків пилюватих і дрібних пісків середньої щільності.

На майданчику за даними інженерно-геологічних вишукувань було виділено 5 інженерно-геологічних елементів (ІГЕ). При цьому загальна потужність лесових ґрунтів (ІГЕ-2 та ІГЕ-3) в межах майданчика складає 4.8...8.4 м, погіршення властивостей цих лесових супісків можливе при їх водонасиченні (табл.1). Зазначені лесові супіски під дією природного тиску по глибині не просідають, проте, при додатковому тиску, що

перевищує величину початкового тиску просідання буде спостерігатись просідання основи при замочуванні.

Ґрунтові води на момент розвідувального буріння були зустрінуті на глибині 9,9..10,7 м від поверхні рельєфу майданчика.

В якості несучого шару фундаментів будинку було прийнято суглинок моренний (ІГЕ-5). Фундаменти будинку пальові із забивних паль перерізом 350x350 мм, що влаштовуються до проектного положення із застосуванням лідерного буріння. Несуча здатність одиночної палі по ґрунту склала 702,62 кН для ґрунтів в природному стані та 491,75 кН при можливому водонасиченні лесових супісків (ІГЕ-2 та ІГЕ-3), в цьому випадку допустиме навантаження на палю становить 466,81 кН з врахуванням виникнення негативного тертя.

Для вибору оптимального варіанту фундаментів було виконано варіантне проектування – розроблено 3 варіанти пальових фундаментів (рис.2), для яких було виконано числове моделювання спільної роботи ґрунтового масиву, фундаментних конструкцій та каркасу будівлі. Розроблена для цього скінчено-елементна модель системи «ґрунтова основа - фундамент - будівля» враховує згідно даних вишукувань похиле залягання

Табл. 1. Фізичні характеристики ґрунтів будівельного майданчика
Table 1. Physical characteristics of soils of the construction site

№ шару	Найменування ґрунту	Глибина закладання підстави шару, м	Щільність, ρ		Питома вага ґрунту, γ		Природна вологість W	Межа текучості W_L	Межа вологості W_P	Число пластичності I_P	Показник текучості IL	Коефіцієнт пористості e	Ступінь водонасичення S_r	Питома зчеплення C_u , кПа	Кут внутрішнього тертя φ	Модуль деформації E , МПа	Розрахунковий опір R_0 , кПа
			ρ	ρ_s	γ	γ_s											
1	Насипний супісок делювіальний, твердий	0,5-0,6	1,47	-	14,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	супісок делювіальний, твердий	1,3-2,5	1,49/1,85	2,66	14,6/18,1	26,1	0,09/0,35	0,24	0,21	0,03	0/1	0,942	0,25/1	6/4	16/14	7/5	250/200
3	супісок еолово-делювіальний, твердий	7,8-8,4	1,66/1,91	2,67	16,3/18,7	26,2	0,14/0,31	0,27	0,22	0,05	0/1	0,829	0,45/1	12/9	20/18	13/10	250/200
4	суглинок делювіальний, напівтвердий	8,2-9,3	1,79/1,95	2,69	17,6/19,1	26,4	0,18/0,29	0,3	0,23	0,07	0,11/0,47	0,770	0,63/1	14/11	19/7	16/13	242/217
5	суглинок моренний	10,7-9,9	1,94	2,71	19	26,6	0,26/0,28	0,34	0,24	0,1	0,2/0,4	0,760	0,78/0,93	26/19	18/16	23/19	236/223
5a	суглинок моренний водонасичений	20	1,97	2,71	19,3	26,6	0,28	0,34	0,24	0,1	0,4	0,760	0,93	19	16	19	223

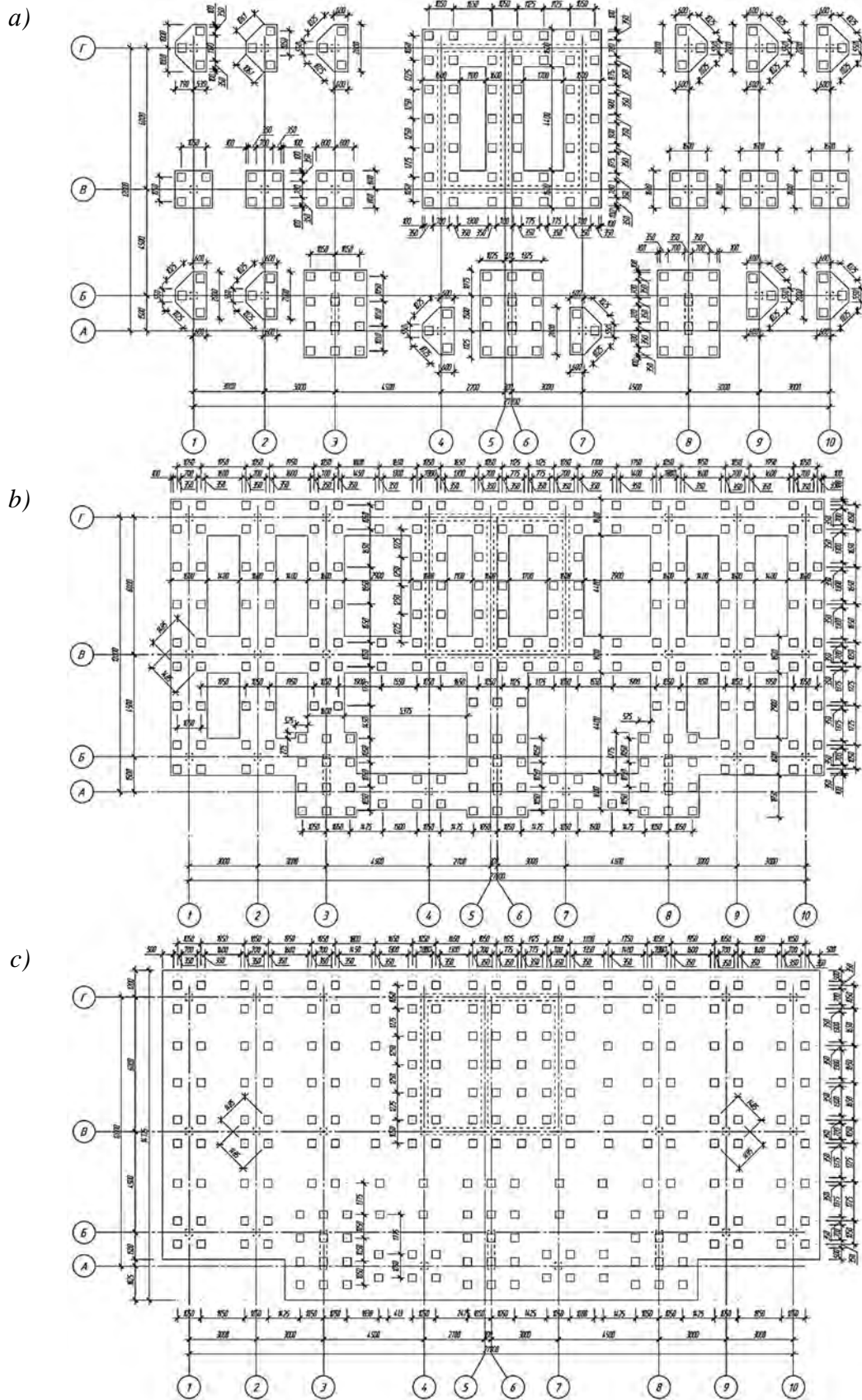


Рис.2 Варіанти пильових фундаментів будинку: *a* - окремі куці пиль, *b* - з перехресно-стрічковими ростверками, *c* - з плитним суцільним ростверком.

Fig.2 Options for pile foundations of the building: *a* - pile cap; *b* - strip pile cap; *c* - raft pile cap.

грунтів (неоднорідність ґрунтових умов в межах плями забудови), а також відповідно інженерно-геологічному розрізу змінну потужність шарів ґрунту (рис.3) на території будівництва.

Варіантне проектування фундаментів будинку полягало у порівнянні пальових фундаментів, які мають різні типи ростверків (рис.2): у вигляді окремих кушів паль, перехресних стрічок та у вигляді суцільного плитного ростверку. Інші параметри пальових фундаментів будинку (несучий шар ґрунту паль, товщина ростверку, тип паль, поперечний переріз паль та їх довжина) залишилися незмінними, однаковими для всіх варіантів, що розглядалися.

При проектуванні фундаментних конструкцій житлового будинку додатково було виконано дослідження впливу можливого замочування лесового ґрунту на напружено-

деформований стан фундаментів. Розглядалося можливе водонасичення лесових супісків (ІГЕ-2 та ІГЕ-3) внаслідок аварійних втрат води з інженерних мереж. Дослідження передбачало аналіз внутрішніх зусиль і деформацій осідання, що виникають у конструкціях фундаментів при реалізації ситуацій можливого водонасичення з водоносних мереж різних зон масиву просідаючих ґрунтів. При цьому розташування цих зон замочування в межах плану забудови (рис.4) було обрано виходячи із найбільших та найнебезпечніших наслідків впливу на перерозподіл напружено-деформованого стану ґрунтової основи та несучих конструкцій будинку, а саме, за спричиненням розвитку нерівномірних деформацій основи фундаментів будинку. Отже, для дослідження було розглянуто варіанти можливого водонасичення лесових ґрунтів основи внаслідок можливих

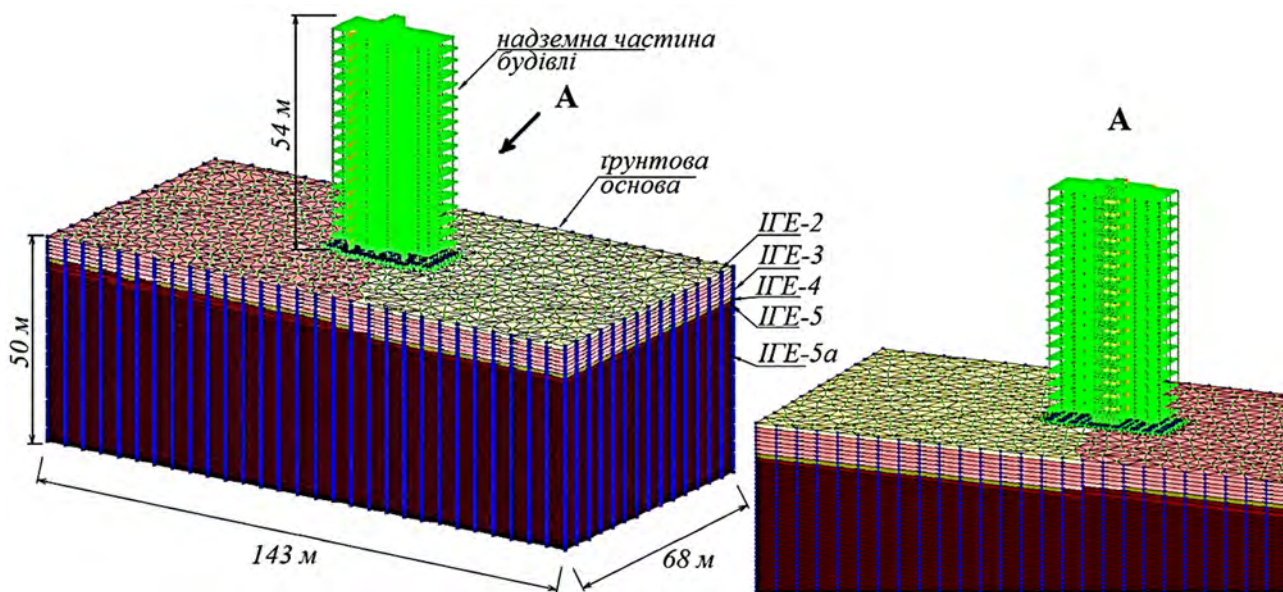


Рис.3 Скінчено-елементна модель системи «ґрунтова основа – фундамент - будівля»

Fig.3 Finite element model of the "soil base - foundation - building" system

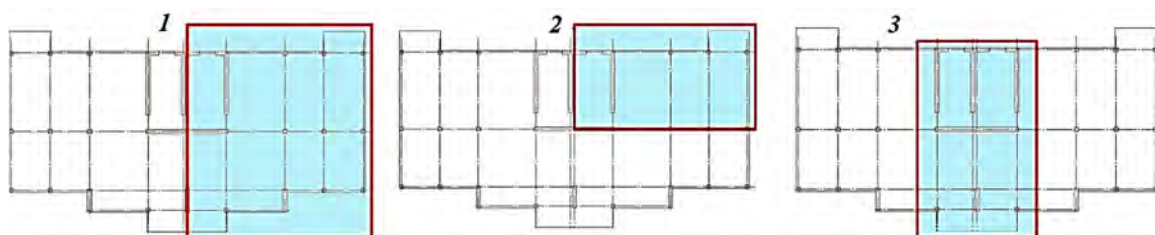


Рис.4 Розташування зон водонасичених лесових ґрунтів: 1 - права половина будинку; 2 - права кутова зона будинку; 3 - центральна зона будинку

Fig.4 Location of zones of water-saturated loess soils: 1 – the right half of the building; 2 - the right corner of the building; 3 – the central part of the building

аварійних втрат із водоносних мереж для наступних зон: під половиною будинку, під кутовою зоною будинку та під центральною частиною будинку (рис.4). Прогнозувалося, що таке розташування зон з можливим проявленням додаткових деформацій просідання лесових ґрунтів при водонасиченні спричинить максимально небезпечний характер деформування основи та фундаментів будинку у вигляді перекоосу, крену, прогину.

Таким чином, для кожного із трьох варіантів пальових фундаментів (рис.2-а,б,с) було виконано розрахунки спільної роботи будівлі з ґрунтовою основою для випадку ґрунтів у природному стані та для трьох схем водонасичення (рис.4) лесових ґрунтів через можливі аварійні втрати із водоносних мереж.

Дослідження взаємодії будинку з ґрунтовою основою шляхом числового моделювання було виконано з використанням ПК ЛІРА-САПР 2017. Скінчено-елементна модель (рис.3) включає всі елементи системи «ґрунтова основа – фундамент - будівля». Ґрунтовий масив представлено скінченими елементами (СЕ) типу 271-276 з характеристиками згідно даних звіту інженерно-геологічних випробувань ґрунтів майданчика будівництва. Палі моделювалися у вигляді ланцюжка СЕ-57 (одновузловий скінченний елемент палі). Призначено шарнірне обпирання ростверку на оголовок палі, передбачено врахування взаємного впливу паль. Розрахункова область ґрунтового масиву прийнята розмірами 140 x 68 м з триангуляцією 1 м по глибині та 5 м по ширині розрахункової області. Замочування приймалося на всю товщину лесових ґрунтів основи, тобто на глибину 9 м.

Для проведення аналізу результатів розрахунків було призначено характерні зони (рис.5), що є єдиними для всіх постановок задач. Призначені зони розташовані під несучими вертикальними елементами надземної частини будинку (колони, пілони, стіни) та охоплюють різну локалізацію в межах плями забудови (кутова, периферійна та центральна). Для цих зон буде виконано порівняння значень внутрішніх зусиль в конструкціях фундаментів будинку та інших

досліджуваних показників.

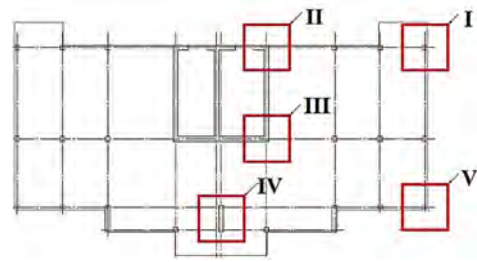


Рис.5 Характерні зони для аналізу результатів розрахунків

Fig.5 Characteristic zones for problem-solving analysis

За результатами комп'ютерного моделювання взаємодії будівлі з ґрунтовою основою було отримано наступні результати: зона з максимальними значеннями вертикальних переміщень ростверків (рис.6) формується в місці розташування ядра жорсткості будинку (східової клітини та ліфтових шахт). Для варіанту фундаментів будинку у вигляді окремих кушів паль діапазон значень осідання ростверку складає 10...37 мм для випадку ґрунтових умов у природному стані (рис.6-а). Для пальових фундаментів з стрічковими ростверками спостерігається характер розподілу деформацій осідання більш рівномірний, з меншим перепадом між екстремальними значеннями, при цьому діапазон значень вертикальних переміщень ростверків для ґрунтів у природному стані становить 8...33 мм. Очікувано, що пальовий фундамент з суцільним плитним ростверком сприяє формуванню ще більш рівномірного характеру розподілу вертикальних переміщень, діапазон значень осідання ростверку для ґрунтів у природному стані в цьому випадку складає 8...29 мм. Рівномірність розподілу деформацій осідання очікувано зростає зі збільшенням площі ростверку та об'єднанням більшої кількості паль у єдину конструкцію, при цьому, додатково, спостерігається зменшення абсолютних значень осідання фундаментів будинку.

Розглядаючи випадки можливого водонасичення лесових супісків та прояви додаткових деформацій просідання ґрунтової основи внаслідок аварійних втрат із водоносних мереж можна зробити наступні висновки: очікувано, характер розподілу

деформацій осідання змінюється із тенденцією пересування зони максимальних значень вертикальних переміщень (воронки осідання) у напрямку локалізації зони замочування (рис.6-*b,c,d*). Зона максимальних деформацій осідання для всіх постановок задач залишається під ядром жорсткості каркасу будинку із незначним пересуванням воронки осідання у відповідності до застосованої схеми замочування (рис.4) лесових ґрунтів основи. Так, при водонасиченні лесових супісків під правою половиною будинку (схема «1», рис.4), діапазон значень вертикальних переміщень ростверків пальових фундаментів у вигляді куців паль зростає до 10...52 мм (рис.6-*b*), а при водонасиченні лесових ґрунтів під центральною частиною будинку (схема «3», рис.4) очікується збільшення величини осідання в зоні ядра жорсткості до 55 мм (рис.6-*d*).

У порівнянні з куцями паль пальові фундаменти з стрічковими ростверками

показали менший вплив прояву нерівномірних деформацій основи фундаментів та більш рівномірний розподіл значень осідання, так, при замочуванні ґрунту центральної частини будинку діапазон значень вертикальних переміщень ростверків складає 8...42 мм (рис.6-*d*).

Відповідно, пальовий фундамент з суцільним плитним ростверком, у порівнянні з іншими варіантами пальових фундаментів, показав результат з найменшими абсолютними значеннями осідання та з найменшим перепадом між їх екстремальними значеннями. Розглянуті випадки можливого водонасичення лесових супісків показали найменший вплив для цього варіанту фундаментів на характер розподілу деформацій осідання, так, при замочуванні ґрунту під центральною частиною будинку діапазон значень вертикальних переміщень ростверків складає 7...35 мм.

Прогнозована відносна різниця осідань

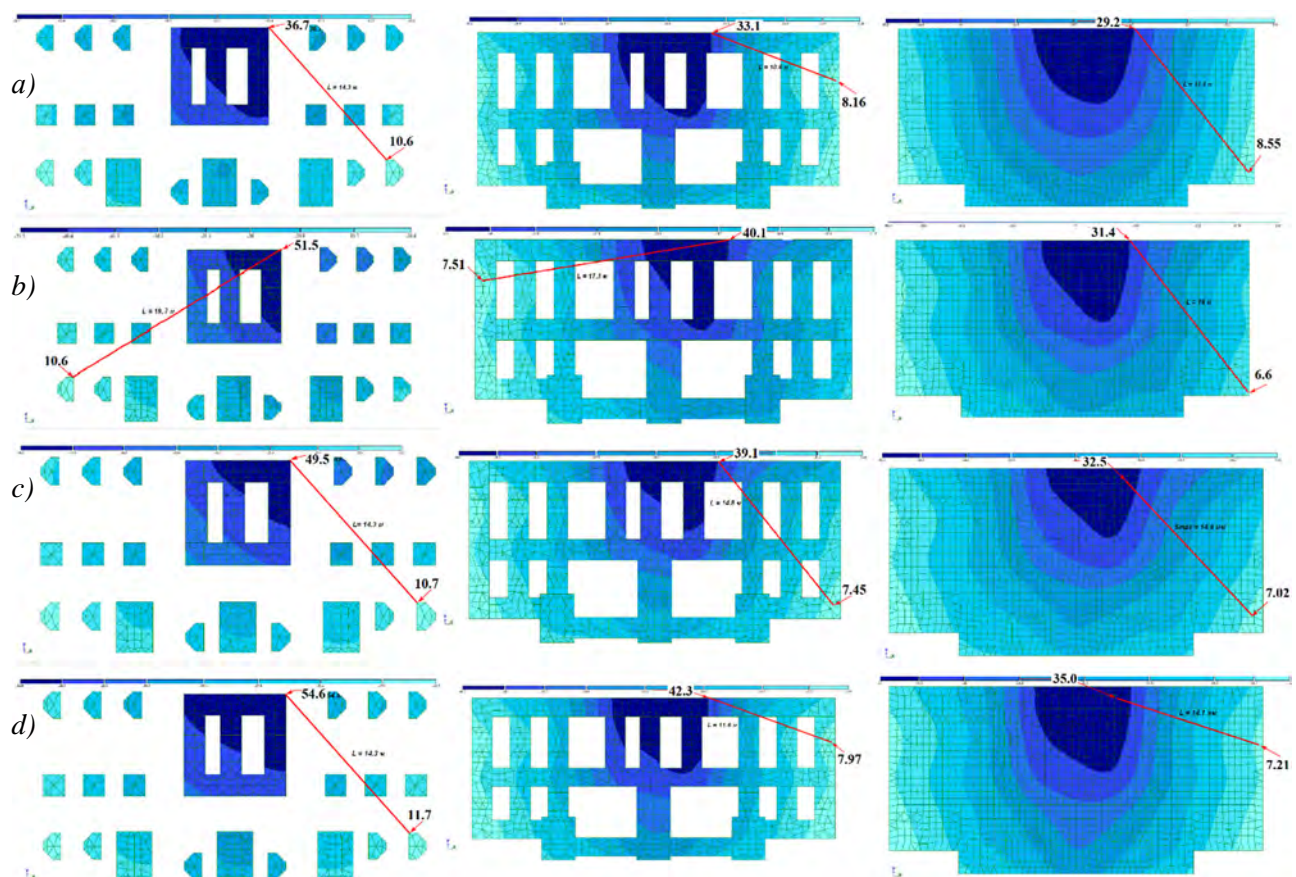


Рис.6 Ізополя осідання ростверку, мм: *a* - ґрунти в природному стані; *b* - замочування лесових супісків за схемою «1»; *c* - теж за схемою «2»; *d* - теж за схемою «3».

Fig.6 Settlement of pile caps, mm: *a* - natural condition of the soils; *b* - water saturation of loess soils in zone «1»; *c* - the same in zone «2»; *d* - the same in zone «3».

ростверків для всіх випадків замочування лесових супісків не перевищує граничного значення згідно вимог чинних норм.

Якщо порівнювати між собою всі постановки задач (#1 – куці паль з ґрунтовими умовами у природному стані ... #12 - пально-плитний фундамент з суцільним плитним ростверком при замочуванні під центром будинку) за максимальним значенням осідання ростверку S_{max} , що виникає для відповідної постановки задачі, то пально-плитний варіант фундаментів показав найменше значення S_{max} як для ґрунтів у природному стані, так і для всіх розглянутих схем водонасичення лесових ґрунтів (рис.7). Максимальні значення осідань очікуються в постановках задач з кущами паль. Для постановки #4 (замочування лесових ґрунтів основи під центральною частиною будівлі, що збігається з розташуванням ядра жорсткості каркасу будинку) величина S_{max} сягає 55 мм.

Аналізуючи вертикальні переміщення (рис.8) у призначених характерних зонах ростверків I...V для різних схем водонасичення лесових ґрунтів можна констатувати, що варіант палових фундаментів з плитним ростверком показав найбільш рівномірний характер розподілу значень деформацій осідання. Спостерігається схожа, проте затухаюча закономірність зміни значень осідання у зонах I...V, якщо порівнювати різні варіанти палових фундаментів (рис.8- a,b,c) для різних застосованих при розрахунках схем водонасичення лесових ґрунтів основи фундаментів будинку.

На діаграмах (рис.9) наведено приріст вертикальних деформацій у зонах I...V ростверків, які були призначені для виконання аналізу результатів розрахунків. Приріст наведено у відсотках для різних схем замочування лесових супісків відносно варіанту з ґрунтовими умовами у природному стані.

Результати числового моделювання показали, що для варіанту фундаментів у вигляді куців паль очікуваний приріст осідання при замочуванні ґрунту під центральною частиною будинку складає 30...50 % (рис.9-a), тоді як при водонасиченні лесових супісків під правою половиною будинку очікується приріст величини осідання на 93 % (зона I).

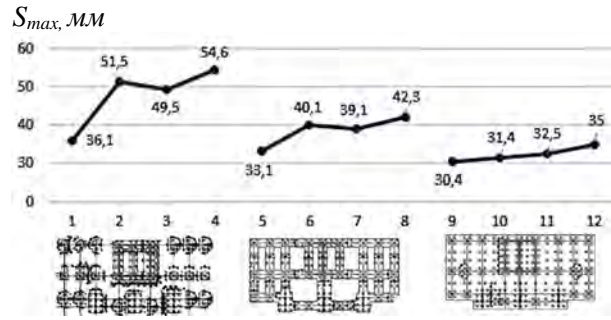


Рис.7 Максимальне осідання ростверку пального фундаменту всіх постановок, S_{max} , мм.
Fig.7 Maximum settlement value of the pile cap foundation for all tasks, S_{max} , mm.

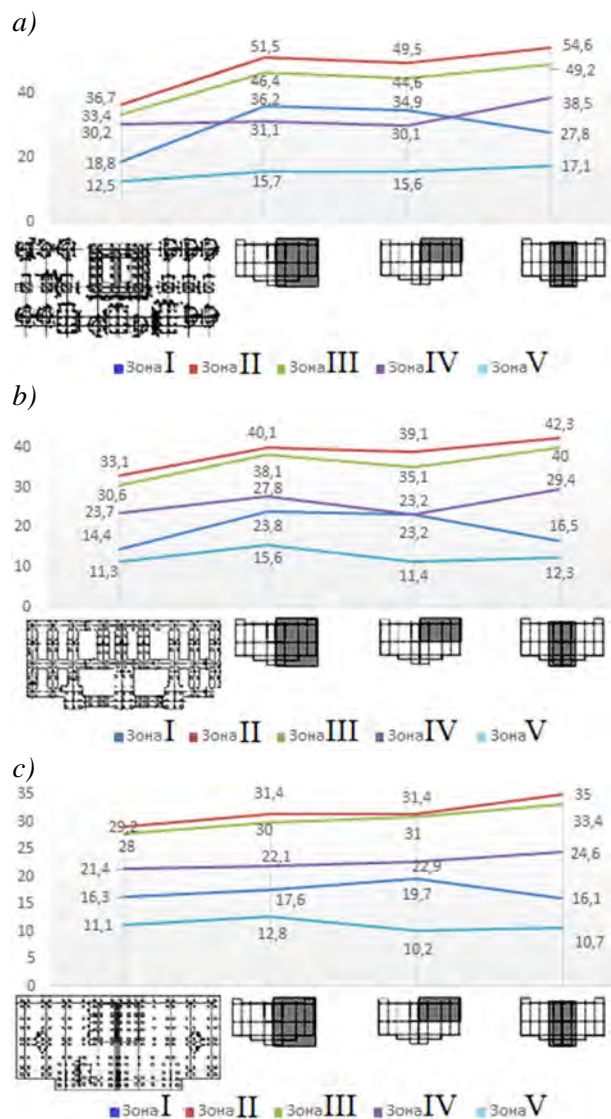


Рис.8 Значення вертикальних переміщень ростверку пального фундаменту, мм: a – куці паль; b – стрічкові ростверки; c – плитний ростверк.
Fig.8 Settlement value of the pile cap, mm: a – pile cap; b – strip pile cap; c – raft pile cap.

Для пальових фундаментів зі стрічковими ростверками середній приріст вертикальних переміщень очікується у діапазоні 10...30 % (рис.9-*b*), а максимальний приріст очікується до 65 % (зона I). Варіант пальового фундаменту з плитним ростверком (рис.9-*c*) показав приріст, що не перевищує 20 % у всіх призначених для аналізу зонах та для всіх розглянутих схем замочування лесових супісків в основі фундаментів будинку.

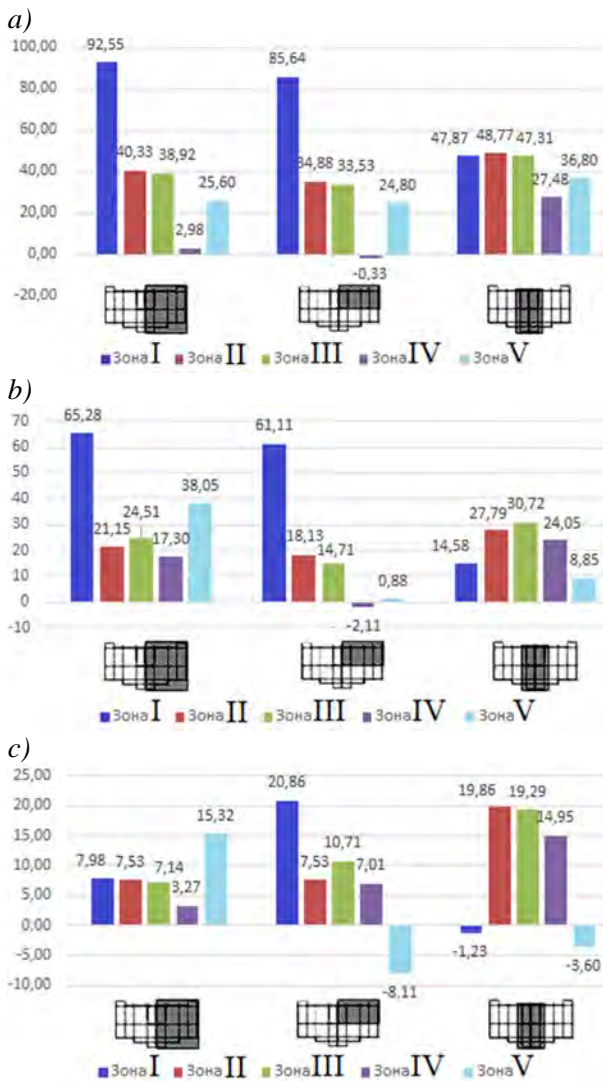


Рис.9 Приріст вертикальних переміщень ростверку пальового фундаменту, %: *a* – куці паль; *b* – стрічкові ростверки; *c* – плитний ростверк.
Fig.9 Increase of the pile cap foundation settlement, %: *a* – pile cap; *b* – strip pile cap; *c* – raft pile cap.

Слід звернути увагу, що у зоні IV (рис.9-*a, b*) та у зоні I (рис.9-*c*) зафіксовано від'ємний приріст вертикальних переміщень для випадків можливого просідання лесових

грунтів, що пов'язано із просторовою роботою пальових фундаментів в умовах виникнення нерівномірних деформацій. Цей факт спричиняє відрив підошви ростверку від поверхні ґрунту та виключення відповідних паль із роботи або призводить до їх роботи на висмикування (дослідження впливу на палі в межах даної публікації не передбачено та буде висвітлено у окремій публікації).

На діаграмах (рис.10) наведено значення внутрішніх зусиль у ростверках (згинальних моментів M_x , M_y) у характерних зонах I...V, що були призначені для виконання аналізу перерозподілу внутрішніх зусиль та деформацій.

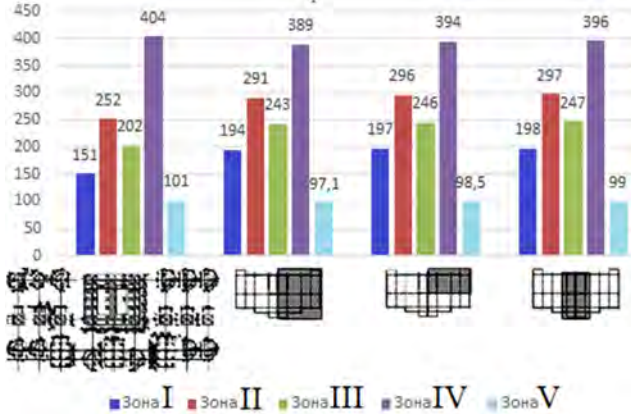
За результатами числового моделювання зафіксовано перерозподіл згинальних моментів M_x та M_y у ростверках пальових фундаментів будинку внаслідок просідання лесових супісків при можливому їх водонасиченні через аварійні втрати з водоносних мереж. Для пальових фундаментів у вигляді окремих куців паль максимальні прогнозовані значення M_x та M_y для всіх порівнюваних постановок спостерігаються для зони IV – місця спирання центрального пілону (рис.10-*a*). Спостерігається збільшення величин моментів у всіх зонах внаслідок замочування ґрунтів основи. Загалом характер розподілу згинальних моментів в конструкції ростверку є типовим. Для порівняння приростів (рис.11-*a*) та розподілу зусиль вихідною вважалася постановка #1 – куці паль з ґрунтами у природному стані, тоді по відношенню до неї максимальні прирости M_y у межах 25 % у зоні V для постановок #2 і #4. Також наявний приріст величин M_y на 14 % у зоні II для постановки #3. Максимальний приріст M_x прогнозується для зони I – місця спирання кутової колони в осях "10"-*"Г"*, він знаходиться у межах 30 % для різних постановок задач. Очікується і зменшення величин M_x у межах 2...4 % для зони IV та V – місць спирання центрального пілону та кутової колони в осях "10"-*"А"*.

Для варіанту перехресно-стрічкового пальового фундаменту (рис.10-*b*) максимальний приріст величини M_y спостерігається для зони IV – місця спирання центрального

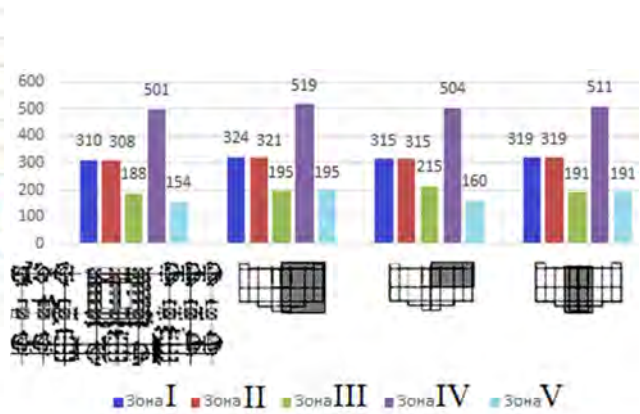
пілону, в цій зоні показник змінюється від 346 кН/м для постановки з ґрунтами у природному стані до 422 кН/м для постановки із замочуванням ґрунтів основи під центральною зоною будинку. Максимальні значення моментів M_x спостерігаються для зони II (верхньої кутової зони ядра жорсткості), що

виникають при постановці з замочуванням ґрунтів основи під цією зоною. Максимальний приріст величин M_y для зони IV складає 16...22 % (рис.11-*b*). Збільшення величини моменту M_x характерне для зон II...V на 30 % при замочуванні відповідних зон ґрунтової основи.

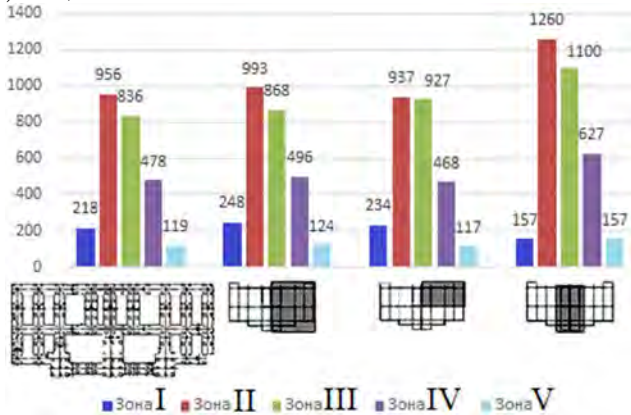
a) M_x , кН/м



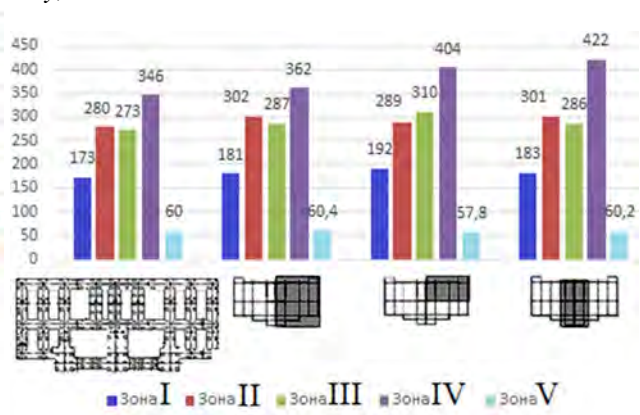
M_y , кН/м



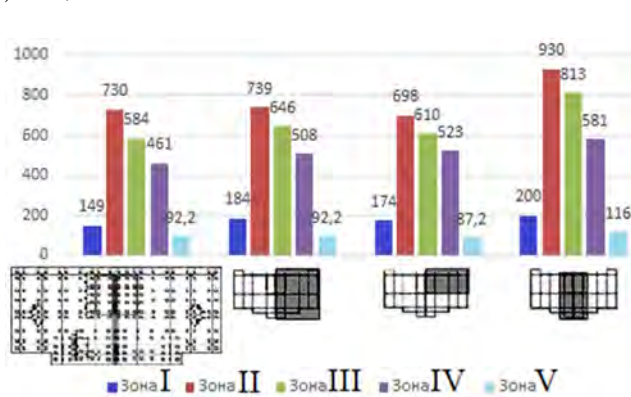
b) M_x , кН/м



M_y , кН/м



c) M_x , кН/м



M_y , кН/м

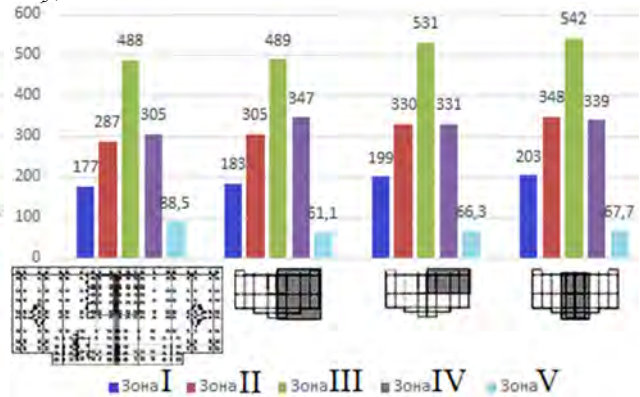


Рис.10 Внутрішні зусилля у ростверку пальового фундаменту M_x , M_y , кН/м: *a* – куці паль; *b* – стрічкові ростверки; *c* – плитний ростверк.

Fig.10 Internal forces in the cap of the pile foundation M_x , M_y , кН/м: *a* – pile cap; *b* – strip pile cap; *c* – raft pile cap.

Стосовно пального фундаменту з суцільним плитним ростверком - максимальні значення M_u за даними числового моделювання очікується отримати для зони III – нижнього кута ядра жорсткості каркасу будинку (рис.10-с), коли локалізація цієї зони збігається із розміщенням зони замочування під центральною частиною будівлі. Максимальний приріст значень у відсотках в порівнянні з постановкою для ґрунтів у природному стані є характерним для зони II – верхнього кута ядра жорсткості - в цій зоні величини збільшились на 15...22 % відповідно

для схем замочування лесових ґрунтів під кутовою та центральною частинами будівлі (рис.11-с). Також зафіксовано зменшення величин M_u на 20...30 % для зони V – місце спірання колони в осях "10"- "А". Ситуація з формуванням максимальних величин M_x збігається із іншими типами фундаментів: максимальні значення M_x прогножуються у зоні II та III – місцях розташування зовнішнього та внутрішнього кута ядра жорсткості, в цих зонах значення згинального моменту у ростверку (рис.10-с) сягають 930 кН/м та 813 кН/м відповідно при постановці задач із

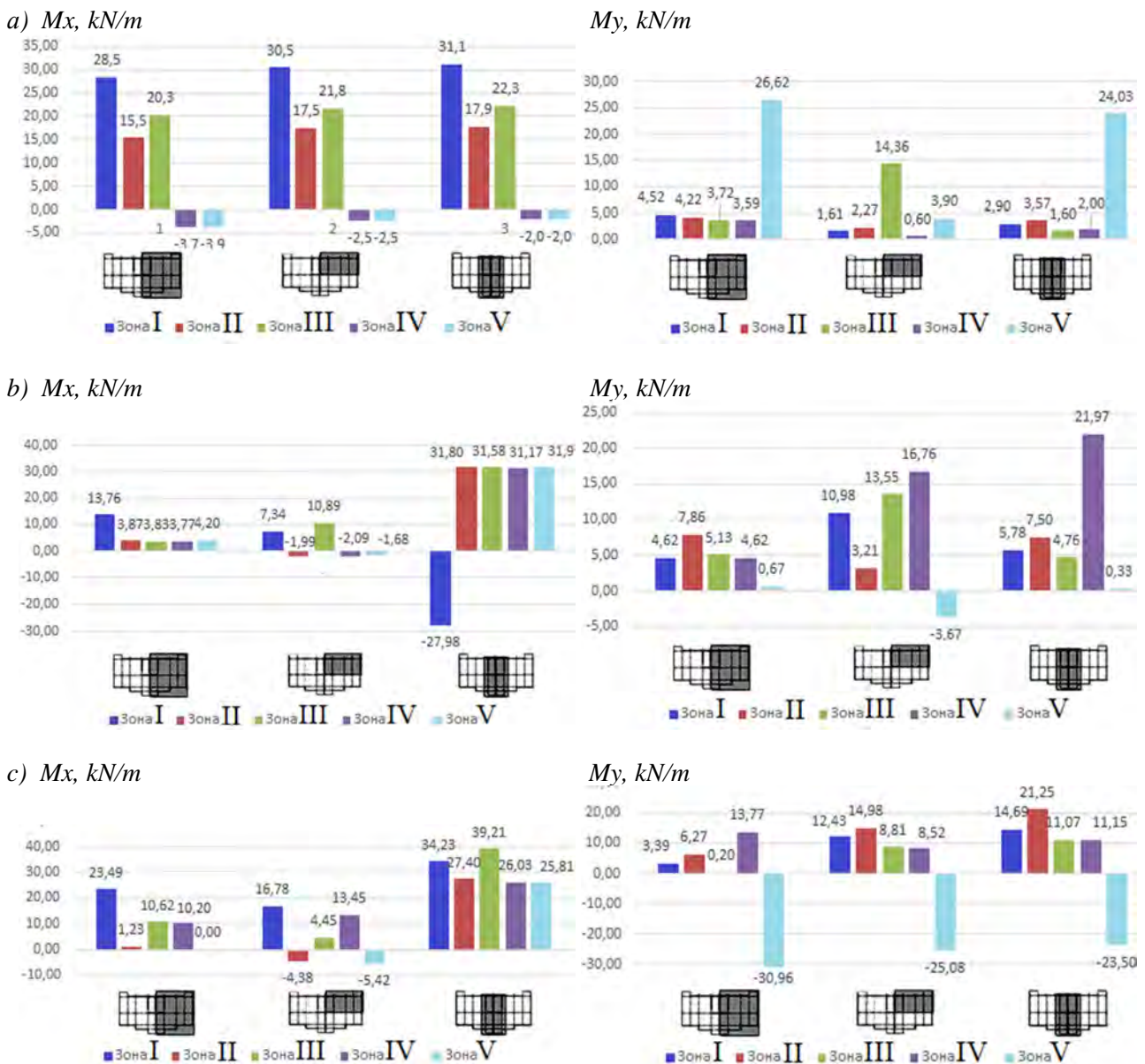


Рис.11 Приріст внутрішніх зусиль у ростверку пального фундаменту, M_x , M_y , %: а – куці палі; б – стрічкові ростверки; с – плитний ростверк.

Fig.11 Increase of the internal forces in the cap of the pile foundation, M_x , M_y , %: а – pile cap; б – strip pile cap; с – raft pile cap.

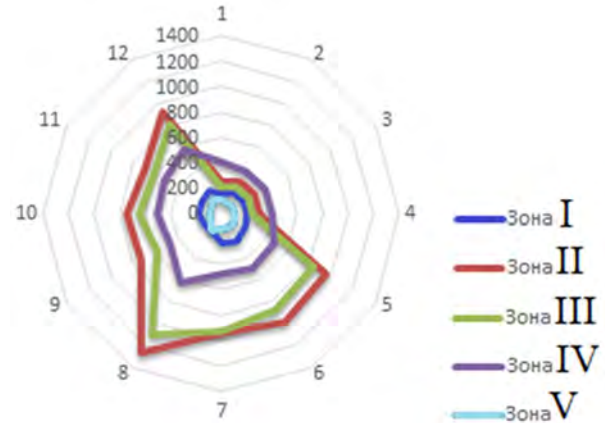
замочуванням лесових ґрунтів основи під центральною частиною будівлі. В порівнянні з постановкою задач для ґрунтів основи в природньому стані спостерігається збільшення величини M_x для зони III на 40 % (рис.11-с) при співпадінні її розташування із ділянкою замочування. Також спостерігається збільшення величин M_x для зони I – місця спирання кутової колони в осях "10"- "Г" на 15...35 % відповідно до локалізації зон замочування просідаючих ґрунтів основи.

Для порівняння розподілу згинальних моментів у зонах I...V ростверків пальових фундаментів будинку значення M_x та M_y було наведено у вигляді зведених графіків (рис.12) для всіх розглянутих постановок задач (#1 – куці паль з ґрунтовими умовами у природньому стані ... #12 - пальовий фундамент з суцільним плитним ростверком при замочуванні під центром будинку). Розподіл згинальних моментів відповідає характеру просторової роботи фундаменту. Найбільші значення моментів M_y виникають у постановках задач з куцями паль, проте в цьому випадку величини M_x залишаються найменшими. У постановках задач з перехресно-стрічковими пальовими фундаментами та з суцільним плитним ростверком спостерігається перерозподіл напружень, тому величини M_y зменшуються, а M_x при цьому навпаки зростають.

Максимальні значення M_x та M_y , що виникають у ростверках для розглянутих варіантів фундаментів для відповідної постановки задач, зведено до загального графіку (рис.13), де наочно видно, що просторова робота ростверку під час можливого виникнення нерівномірних деформацій ґрунтів основи викликає збільшення величини згинальних моментів.

Отже, результати числового моделювання спільної роботи будівлі з ґрунтовою основою показали, що всі розглянуті варіанти фундаментів будинку відповідають вимогам норм стосовно величини осідання фундаментів та відносної різниці осідань як для ґрунтів у природньому стані, так і у випадку просідання лесових супісків внаслідок можливого підвищення вмісту вологи через

a) M_x , kN/m



b) M_y , kN/m

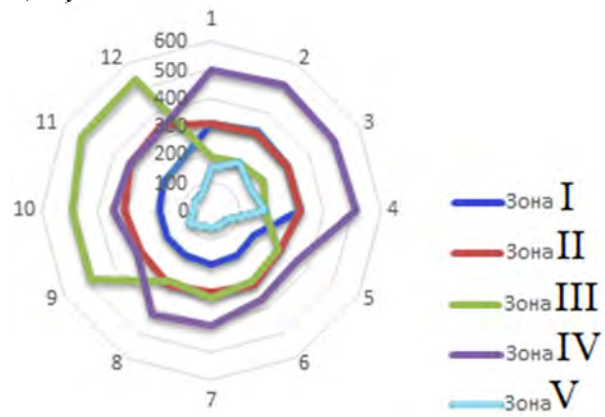


Рис.12 Внутрішні зусилля у характерних зонах ростверку пальового фундаменту, кН/м: a – згинальні моменти M_x ; b – згинальні моменти M_y .
Fig.12 Internal forces in characteristic zones of the pile cap of foundation, kN/m: a – bending moment M_x ; b – bending moment M_y .

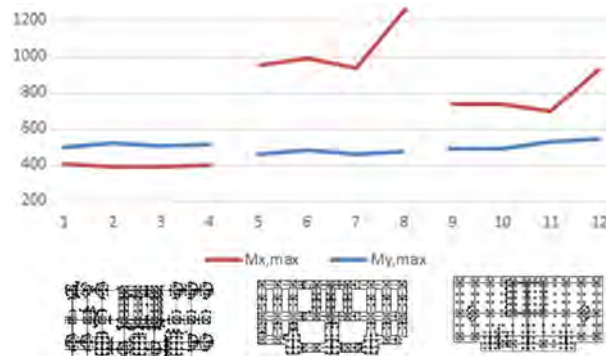


Рис.13 Максимальні значення внутрішніх зусиль у ростверку пальового фундаменту для всіх постановок задач, кН/м: a – згинальні моменти M_x ; b – згинальні моменти M_y .
Fig.13 Maximum internal forces of the pile cap of foundation for all tasks, kN/m: a – bending moment M_x ; b – bending moment M_y .

аварійні втрати з водоносних мереж. Якщо надійність всіх розглянутих у дослідженні варіантів пальових фундаментів будинку забезпечена, то доцільність їх застосування має бути обґрунтована з точки зору їх матеріалоемності, їх економічної ефективності.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Отже, комп'ютерна симуляція взаємовпливу елементів системи «грунтова основа – фундамент – надземні конструкції будівлі», дає можливість відслідковувати зміну характеру розподілу напружень у несучих конструкціях будинку. Особливо важливим та корисним таке дослідження є для ділянок будівництва з можливістю реалізації випадків можливого нерівномірного деформування ґрунтової основи фундаментів. Виконання варіативних розрахунків із застосуванням комп'ютерних програмних комплексів для числового моделювання спільної роботи будівлі з ґрунтовою основою дає можливість пошуку та обґрунтування раціонального варіанту фундаментних конструкцій.

Аналіз результатів дослідження дозволяє зробити наступні висновки:

- Підтверджено, що комп'ютерне моделювання дає змогу досліджувати вплив нерівномірних деформацій лесових ґрунтів при їх можливому водонасиченні на зміну напружено-деформованого стану фундаментів будинку.
- Підтверджено, що розташування в плані зон замокання лесового ґрунту та їх розміри здійснюють вплив на перерозподіл напружень у конструкціях фундаментів.
- Доведено, що просторова жорсткість фундаменту впливає на характер деформування ґрунтової основи. За результатами виконаного варіантного проектування, очікується для кущів паль $S_{max}=55$ мм, для перехресно-стрічкового пальового фундаменту $S_{max}=42$ мм та для пальового фундаменту із суцільним плитним ростверком $S_{max}=35$ мм, що свідчить про зменшення величини осідання для третього типу фундаменту по відношенню до двох попередніх на 35 % та 17 % відповідно.
- Проаналізовано вплив зон замочування

просідаючих ґрунтів на зміну характеру деформування фундаментів та встановлено, що для варіанту кущів паль максимальний приріст осідань внаслідок водонасичення становив 93 %, для перехресно-стрічкового пальового фундаменту 65 % та для пальового фундаменту із суцільним плитним ростверком склав 20 %. При цьому значення відносної різниці осідань для всіх постановок задач не перевищували граничного значення згідно вимог чинних норм.

- Показано, що використання варіативного проектування шляхом оцінки можливості застосування різних типів фундаментів, їх параметрів та ґрунтових умов будівельного майданчика з врахуванням негативних факторів і ситуацій, що можуть виникнути під час експлуатації будинку, дозволяє обрати оптимальний та одночасно надійний варіант фундаменту.

- За результатами виконаного дослідження було обрано в якості основного варіанту фундаментних конструкцій будинку пальовий фундамент з плитним ростверком.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко І.П. Особливості взаємодії пальових фундаментів під висотними будинками з їх основою / І.П. Бойко // *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2006. – Вип.30. – С.3-8.
2. Винников Ю.Л. Проблеми визначення модуля деформації замочених лесоподібних ґрунтів / Ю.Л. Винников // *Зб. наук. праць (Галузеве машинобуд., буд-во)*. – П.: ПолтНТУ. – 2010. – Вип.3(28). – С.62–68.
3. Гранько О.В. Зміна значень фізико-механічних показників лесових суглинків під фундаментами за умов підтоплення / О.В. Гранько // *Зб. наук. праць (Галузеве машинобуд., буд-во)*. – П.: ПолтНТУ. – 2005. – Вип.15. – С.126-129.
4. Жук В.В. До розрахунків спільної роботи будівлі з ґрунтовою основою в умовах нерівномірних деформацій / В.В. Жук, В.Л. Підлуцький // *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2015. – Вип.36. – С.122-130.
5. Жук В.В. Про покращення розрахункових схем каркасних будівель на просідаючих ґрунтах / В.В. Жук, М.В. Корнієнко // *Світ геотехніки: Науково-технічний журнал*. –

- Запоріжжя.: ТОВ «НБК «Інтер-М» . – 2013. – Вип.2(38) . – С.2-7.
6. Моргун А.С. Вплив техногенного фактора замощання ґрунтової основи на напружено-деформований стан висотної будівлі / А.С. Моргун, В.М. Андрухов, І.М. Меть, І.Ю. Яркіна // *Дороги і мости*. – Київ. – 2009. – Вип.11. – С.233-238.
 7. Моргун А.С. Прогнозування впливу води на напружено-деформований стан лесової основи паливових фундаментів / А.С. Моргун, І.А. Моргун // *Вісник Вінницького політехн. інст-ту*. – 2007. – №2. – С.20-23.
 8. Моторный А.Н. Напряженно-деформированное состояние основания свайных фундаментов на лёссовых просадочных грунтах при замачивании просадочной толщи снизу вверх (подтопление территории) / А.Н. Моторный, Н.А. Моторный // *Вісник ПДАБА*. – 2014. – №2(191). – С.20-30.
 9. Соколов Н. Проблема лессов / Н. Соколов // *Соросовский образовательный журнал*. – 1996. – №9. – С.86–93.
 10. Янко К.О. До зміни напружено-деформованого стану лесової основи паливового фундаменту внаслідок її замощання / К.О. Янко, С.П. Школяр, В.А. Муха // *Зб. наук. праць (Галузеве машинобуд., буд-во)*. – П.: ПолтНТУ. – 2003. – Вип.12. – С. 277-280.

REFERENCES

1. Boiko I.P. (2006). Osoblyvosti vzaiemodii palovykh fundamentiv pid vysotnymy budynkamy z yikh osnovoiu [Peculiarities of the interaction of pile foundations under high-rise buildings with their base]. *Osnovy i fundamente: Mizhvidomchyi naukovotekhnichnyi zbirnyk*, K.: KNUBA, 30, 3-8. (in Ukrainian)
2. Vynnykov Yu.L. (2010). Problemy vyznachennia modulua deformatsii zamoklykh lesopodibnykh gruntiv [Problems of determining the modulus of deformation of dense loess-like soils]. *Zb. nauk. prats (Haluzeve mashynobud., bud-vo)*, P.: PoltNTU, 3(28), 62–68. (in Ukrainian)
3. Hranko O.V. (2005). Zmina znachen fizykomekhanichnykh pokaznykiv lesovykh suhlynkiv pid fundamentamy za umov pidtoplennia [Changes in the values of physical and mechanical parameters of loess loams under foundations under conditions of flooding]. *Zb. nauk. prats (Haluzeve mashynobud., bud-vo)*, P.: PoltNTU, 15, 126-129. (in Ukrainian)
4. Zhuk V.V., Pidlutskyi V.L. (2015). Do rozrakhunkiv spilnoi roboty budivli z gruntovoiu osnovoiu v umovakh nerivnomirnykh deformatsii [To the calculations of the joint work of the building with the soil base in conditions of uneven deformations]. *Osnovy i fundamente: Mizhvidomchyi naukovotekhnichnyi zbirnyk*, K.: KNUBA, 36, 122-130. (in Ukrainian)
5. Zhuk V.V., Korniienko M.V. (2013). Pro pokrashchennia rozrakhunkovykh skhem karkasnykh budivel na prosidaiuchykh gruntakh [On the improvement of calculation schemes of frame buildings on collapsible soils]. *Svit heotekhniki: Naukovotekhnichnyi zhurnal, Zaporizhzhia: TOV «NVK «Inter-M»*, 2(38), 2-7. (in Ukrainian)
6. Morhun A.S., Andrukhov V.M., Met I.M., Yarkina I.Iu. (2009). Vplyv tekhnogennoho faktora zamokannia gruntovoi osnovy na napruzhenodeformovanyi stan vysotnoi budivli [The influence of the man-made factor of soil base locking on the stress-strain state of a high-rise building]. *Dorohy i mosty*, Kyiv, 11, 233-238. (in Ukrainian)
7. Morhun A.S., Morhun I.A. (2007). Prohnozuvannia vplyvu vody na napruzhenodeformovanyi stan lesovoi osnovy palovykh fundamentiv [Forecasting the effect of water on the stress-strain state of the loess base of pile foundations]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho inst.*, 2, 20-23. (in Ukrainian)
8. Motornyi A.N., Motornyi N.A. (2014). Napriazhenodeformirovannoe sostoianye osnovaniya svainykh fundamentov na lessovykh prosadochnykh hruntakh pry zamachyvannyi prosadochnoi tolschchy snyzu vverkh (podtoplenye terrytoryi) [Stress-strain state of the base of pile foundations on loess collapsible soils when the collapse stratum is soaked from the bottom up (flooding of the territory)]. *Visnyk PDABA*, 2(191), 20-30. (in Russian)
9. Sokolov N. (1996). Problema lessov [The loess problem]. *Sorosovskiy obrazovatelnyi zhurnal*, 9, 86–93. (in Russian)
10. Yanko K.O., Shkoliar S.P., Mukha V.A. (2003). Do zminy napruzhenodeformovanoho stanu lesovoi osnovy palovoho fundamentu vnaslidok yii zamokannia [To change the stress-strain state of the loess base of the pile foundation due to its locking]. *Zb. nauk. prats (Haluzeve mashynobud., bud-vo)*, P.: PoltNTU, 12, 277-280. (in Ukrainian)

Influence of possible water saturation of loess soil on the stress-strain state of the foundations of a multi-storey building

*Veronika Zhuk,
Iryna Pavlenko*

Summary. The consequence of human activity in the field of construction is an increase in the density of buildings. As a result, areas that were previously considered risky from the point of view of the quality of soil conditions or increased saturation of the soil stratum with underground communications are allocated for development. All these factors are of direct importance when it comes to the use of loess soils as a basis for the design, erection and operation of new construction facilities.

Loess soils cover about 80% of the territory of Ukraine. These soils have a negative feature - the ability to reduce their mechanical properties when in contact with water and give additional collapse deformations. Therefore, a significant part of the buildings is erected in such soil conditions. That's why, the foundation structures of these buildings and structures must be designed taking into account the possibility of uneven deformations. For this reason, the relevance of taking into account the joint work of the "collapsible base - foundation - above-ground structures" system does not decrease, but even increases.

Loess soils in a dry state have good physical and mechanical characteristics due to structural bonds. However, with increasing humidity, the soil porosity undergoes a sharp change, the compressive strength decreases rapidly, structural bonds are destroyed and collapse deformations occur.

The search for a reliable and economical option for foundation structures is an urgent issue in the design of buildings and structures at the modern level. This is especially relevant in the conditions of construction on soils capable of collapsing with possible water saturation.

The work presents a variant design of the foundations of the building. At the same time, the impact of possible water saturation of the loess soils of the base on the stress-strain state of the foundations was considered. Different schemes of possible soaking of loess soils were considered. Different sizes and locations of water saturation zones within the building plan were considered. An analysis of the results of the numerical simulation of the joint work of the elements of the "base - foundation - above-ground structures" system was performed. The choice of the most reliable foundation option is substantiated. It has been confirmed that the size and location of loess soil water saturation zones influence the redistribution of stresses in foundation structures. It is shown that the use of variable design of foundations allows choosing an economical and reliable foundation option, if we consider different options for their parameters and take into account the negative factors of the soil conditions of the construction site and emergency situations that may occur during the operation of the building.

Key words. Numerical simulation, stress-strain state, loess soil, uneven deformations, pile foundation, reinforced concrete frame.