

Оцінка напружено-деформованого стану пальових фундаментів багатопверхового будинку при можливому водонасиченні лесового ґрунту

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: 10.32347/0475-1132.45.2022.40-54

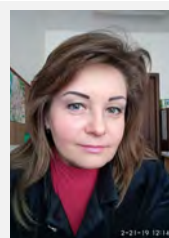
Анотація. Зростання щільності забудови призводить до необхідності відведення під забудову ділянок, що раніше вважались несприятливими з точки зору якості геологічної будови. Відкладення лесових порід вкривають майже 80% території України. Такі ґрунти характеризуються негативною особливістю – здатністю стрімко знижувати свої механічні властивості при контакті з рідиною та давати додаткові деформації просідання. Виходячи з цього, значна частина будівель і споруд зводиться в умовах можливого виникнення нерівномірних деформацій при водонасиченні просідаючих ґрунтів. Тому фундаментні конструкції цих споруд мають проектуватися з врахуванням виникнення просідання лесових ґрунтів.

У природному стані лесові ґрунти завдяки структурним зв'язкам мають достатньо високі показники механічних характеристик. Однак, із підвищенням вмісту води опір стисненню стрімко знижується, відбувається руйнування структурних зв'язків, спостерігається просідання ґрунту.

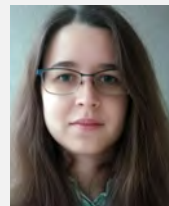
Сучасний рівень проектування фундаментних конструкцій передбачає пошук надійного та економічно ефективного варіанту фундаментів, особливо це актуально в умовах будівництва на ґрунтах, які мають властивість просідати при можливому підвищенні вмісту води.

У роботі представлено результати порівняння варіантів фундаментів будинку з урахуванням впливу можливого водонасичення лесових ґрунтів на напружено-деформований стан фундаментних конструкцій. Було розглянуто різні-схеми можливого замочування лесових ґрунтів залежно від їх розміру та розташування.

Дана публікація є продовженням раніше опублікованої роботи [4] - висвітлення результатів



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



Ірина Павленко
магістр кафедри
геотехніки

дослідження, яке було присвячено варіативному проектуванню фундаментів з використанням числового моделювання спільної роботи елементів системи «основа – фундамент – надземні конструкції». За результатами дослідження було обґрунтовано вибір раціонального варіанту фундаментів, виходячи із його показників надійності та економічної ефективності. Проведене дослідження підтверджує, що розміри та розташування в плані зон замочування просідаючого ґрунту впливають на характер розподілу напружень у фундаментних конструкціях. Показано, що використання варіативного проектування фундаментів, з врахуванням негативних факторів, що стосуються ґрунтових умов будівельного майданчика, а також, техногенних ситуацій, що можуть виникнути під час експлуатації будинку, дають можливість запроєктувати надійний та одночасно економічно ефективний варіант фундаментів.

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

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проведене дослідження присвячено аналізу впливу можливого замочування лесового ґрунту на перерозподіл напружено-деформованого стану фундаментів будинку. Актуальність дослідження обґрунтовується необхідністю врахування при розробці проектних рішень можливого виникнення просідання лесових ґрунтів, коли водонасичення може бути спричинено як природними, так і техногенними факторами – наприклад, внаслідок аварійних втрат з інженерних мереж.

Лесові ґрунти широко розповсюджені на території України та характеризуються негативною особливістю - здатністю знижувати свої механічні властивості при контакті з водою і давати додаткові деформації просідання. А отже, переважна частина будівель і споруд зводяться та експлуатуються саме в таких ґрунтових умовах. Цим обґрунтовується необхідність проектування фундаментних конструкцій з врахуванням виникнення нерівномірних деформацій просідання внаслідок можливого водонасичення лесових ґрунтів.

Завдяки своїм структурним зв'язкам лесові ґрунти у природному стані мають достатньо високі за величиною показники механічних властивостей. Проте зі збільшенням вмісту вологи відбувається руйнування структурних зв'язків, опір стисненню стрімко знижується, спостерігається явище просідання. Врахування такої поведінки ґрунту основи є обов'язковим при проектуванні фундаментів будівель і споруд, що зводяться на просідаючих ґрунтах.

Сучасний рівень проектування фундаментів передбачає пошук надійного та 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. Використання числового моделювання та виконання варіативних розрахунків дозволяє обрати раціональний варіант

фундаментів, який буде запроєктовано з врахуванням можливого розвитку негативних факторів у геологічній будові будівельного майданчика і різних аварійних ситуацій, що можуть виникнути під час експлуатації будинку чи споруди.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вивченням властивостей лесових ґрунтів, закономірностей їх поведінки присвячено праці багатьох вчених, серед яких Бойко І.П., Винников Ю.Л. [2], Дранніков А.М., Зоценко Н.Л., Красв В.Ф., Соколов М. [10] 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.

Подальшою розробкою та вдосконаленням розрахункових моделей займалися ряд науковців, серед яких Бойко І.П. [1], Корнієнко М.В. [6], Моргун А.С. [8]. Наприклад, з використанням числового методу граничних елементів авторами публікації [8] представлено розв'язання нелінійної задачі впливу на несучу спроможність палі від зміни напружено-деформованого стану лесових ґрунтів через їх замокання.

Моторний М.А. у публікації [9] представив результати визначення напружено-деформованого стану основи пальових фундаментів при замочуванні лесової товщі знизу вгору (випадок можливого підтоплення території забудови).

Авторами публікації [5] розглянуто причини виникнення та характер нерівномірних деформацій основи фундаментів при дослідженні взаємодії елементів системи «ґрунтова основа – фундамент - будівля».

Колектив авторів, серед яких Моргун А.С., Меті І.М. та інші [7], розглянули за методом граничних елементів взаємодію фундаментів будівлі з пружно-пластичною багатопаровою основою для явища замокання основи. Публікація Янко К.О. [11] присвячена дослідженню зміни напружено-деформованого стану лесової основи пальового фундаменту внаслідок її замокання.

Представлена робота є продовженням раніше опублікованих результатів варіантного проектування фундаментів будинку з врахуванням можливого водонасичення лесових ґрунтів основи [4], де було розглянуто вплив можливого виникнення нерівномірних деформацій основи на напружено-деформований стан ростверків пальових фундаментів із врахуванням різних схем замочування лесових ґрунтів - залежно від розмірів зони водонасичення та її розташування в плані.

МЕТА РОБОТИ

Метою дослідження є пошук оптимального варіанту фундаментних конструкцій будинку в умовах виникнення нерівномірних деформацій основи спричинених можливим підвищенням вологості лесових ґрунтів від аварійних втрат із водоносних мереж.

Об'єкт дослідження - взаємодія будинку з основою, ґрунти якої характеризуються здатністю давати додаткові деформації просідання.

Предмет дослідження - напружено-деформований стан фундаментів будинку.

Задачі, що були поставлені для досягнення мети:

1) аналіз найнебезпечніших схем водонасичення лесового ґрунту, які викликають максимально-нерівномірні деформації фундаментів;

2) варіантне проектування фундаментів в умовах нерівномірних деформацій основи;

3) дослідження перерозподілу навантажень на палі при можливому просіданні лесового шару ґрунту внаслідок його водонасичення;

4) оцінка впливу розмірів зони зволоження лесових ґрунтів та її розташування в плані на перерозподіл зусиль у ростверках пальових фундаментів;

5) аналіз впливу схем можливого замочування лесових ґрунтів на характер деформування фундаментів.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження було виконано на прикладі багатоквартирного житлового будинку [4],

який за об'ємно-планувальним рішенням складається з однієї 16-поверхової секції з підвалом та технічним горищним поверхом. Конструктивна схема житлового будинку каркасна. Ядро жорсткості запроєктовано у вигляді залізобетонних стін сходової клітини та ліфтової шахти.

Будівельний майданчик знаходиться у м. Києві. Геологічна будова [4] ділянки будівництва складена лесовими супісками потужністю 4-8 м, які знизу підстеляються суглинками змінної консистенції, а з поверхні вкриті насипними ґрунтами та делювіальними супісками.

Фундаменти будинку пальові із забивних паль перерізом 350x350 мм, що влаштовуються до проектного положення із застосуванням лідерного буріння. В якості несучого шару фундаментів будинку було прийнято суглинок моренний (ІГЕ-5). Несуча здатність одиночної палі по ґрунту, визначена за формулою норм, для ґрунтів в природному стані склала 702,62 кН 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 пошуку оптимального варіанту фундаментів було виконано варіантне проектування –пальових фундаментів (рис.1), для яких було виконано числове моделювання спільної роботи ґрунтового масиву, фундаментних конструкцій та каркасу будівлі. Числове моделювання було виконано з використанням ПК ЛІРА-САПР 2017, скінчено-елементна модель [4] включає всі елементи системи «ґрунтова основа – фундамент - будівля». Ґрунтовий масив моделювався СЕ типу 271-276 з характеристиками згідно даних інженерно-геологічних випробувань, палі моделювалися ланцюжком одноузлових скінчених елементів паль СЕ 57.

В рамках варіантного проектування фундаментів було розглянуто пальові фундаменти, які мають різні типи ростверків (рис.1): у вигляді окремих куців паль, перехресних стрічок та з суцільним плитним ростверком. При цьому було виконано дослідження впливу можливого замочування лесових ґрунтів на напружено-деформований стан

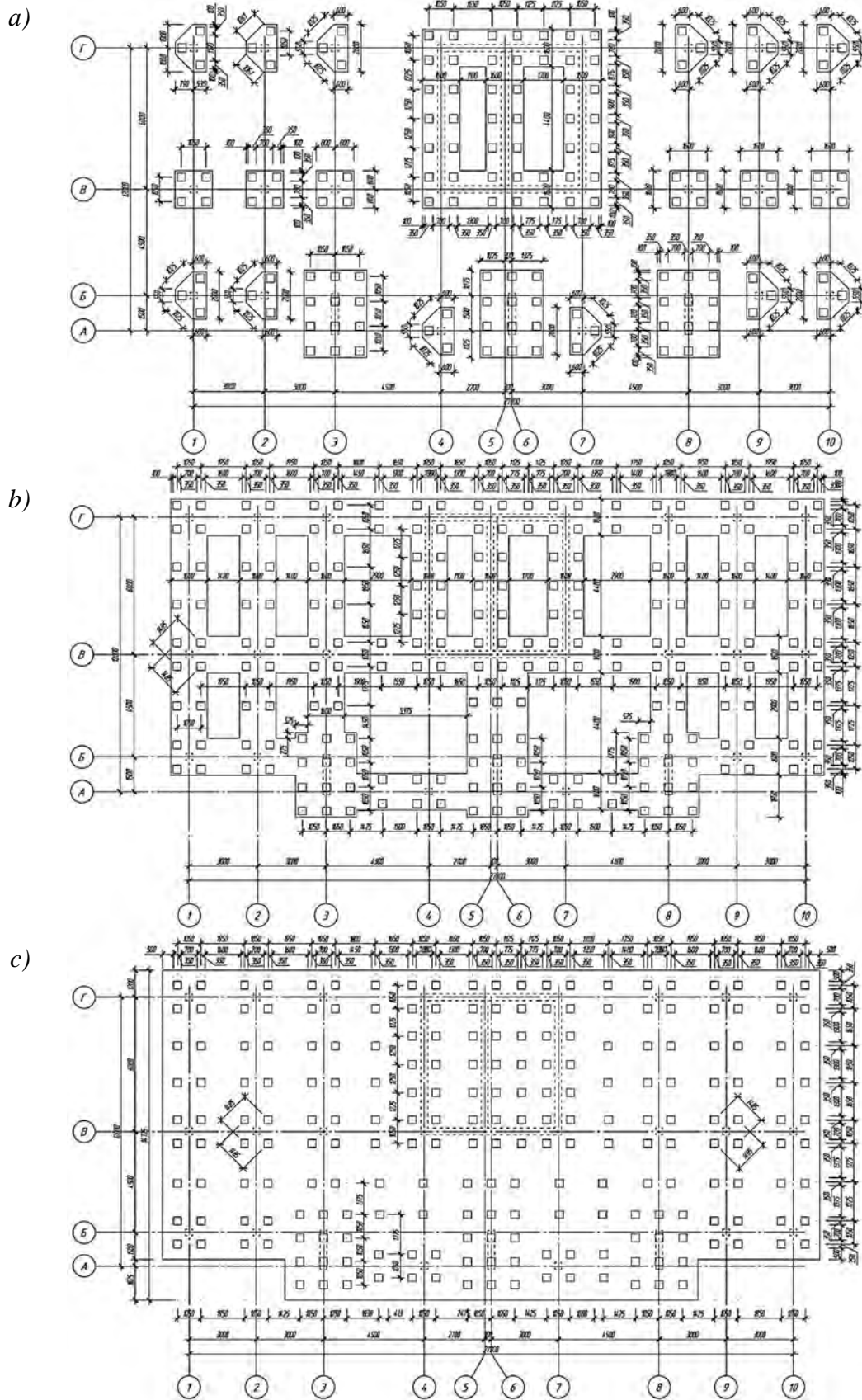


Рис.1 Варіанти паливих фундаментів будинку: *a* -окремі куці палі, *b* – з перехресно-стрічковими ростверками, *c* – з плитним суцільним ростверком.

Fig.1 Options for pile foundations of the building: *a* – pile cap; *b* – strip pile cap; *c* – raft pile cap.

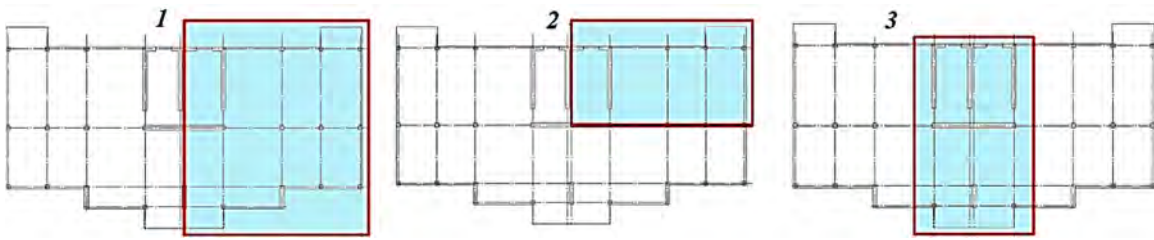


Рис.2 Розташування зон водонасичених лесових ґрунтів: 1 - права половина будинку; 2 - права кутова зона будинку; 3 - центральна зона будинку

Fig.2 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

фундаментів (водонасичення лесових супісків ПЕ-2, ПЕ-3 внаслідок аварійних втрат води з водоносних мереж). Розташування зон замочування (рис.2) в межах плану забудови було обрано виходячи із найбільших та найнебезпечніших наслідків впливу на перерозподіл напружено-деформованого стану ґрунтової основи та несучих конструкцій будинку, а саме: під половиною будинку, під кутовою зоною будинку та під центральною частиною будинку (рис.2). Вибір зон з можливим проявленням додаткових деформацій просідання лесових ґрунтів при водонасиченні обумовлений очікуваним максимально небезпечним характером деформування основи та фундаментів будинку у вигляді перекосу, крену, прогину відповідно. Отже, для кожного із трьох варіантів пальових фундаментів (рис.1-а, б, с) було виконано розрахунки спільної роботи будівлі з ґрунтовою основою для випадку ґрунтів у природному стані та для трьох схем водонасичення (рис.2) лесових ґрунтів. Замочування приймалося на всю товщину лесових ґрунтів основи - на глибину 9 м.

Для аналізу результатів розрахунків було призначено характерні зони та палі (рис.3), що є єдиними для всіх постановок задач, вибір яких обумовлений розташуванням їх під несучими вертикальними елементами надземної частини будинку (колони, пілони, стіни) та охопленням різної локалізації в межах плями забудови (кутова, периферійна та центральна).

Числове моделювання взаємодії пальових фундаментів будівлі для варіанту окремих куців паль з ґрунтовою основою у

природному стані (рис.4-а) показало, що максимальні значення зусиль у оголовках паль складає $N=664\dots759$ кН, що є характерними для паль, які розміщені на зовнішніх кутах ядра жорсткості (зона ліфтових шахт та сходових клітин) та для фундаментів з найбільш підвіреної сторони будинку. Несуча здатність паль при цьому за результатами моделювання має величину в діапазоні $F_d=948\dots978$ кН, максимальне значення відносної несучої здатності складає $F'_d=0,788$ у характерних місцях з великими значеннями зусиль N у палях.

Для постановки задачі із замочуванням лесових ґрунтів у лівій половині будівлі максимальні значення зусиль у оголовках паль склали $N=829\dots975$ кН (рис.4-б), при цьому локалізація найбільш навантажених паль зберігається. Несуча здатність паль при цьому має значення, що варіюються в межах $F_d=462\dots964$ кН, з погіршенням у зоні водонасичених ґрунтів основи. Максимальне значення відносної несучої здатності складає $F'_d=2,11$ у характерних місцях з великими значеннями зусиль N .

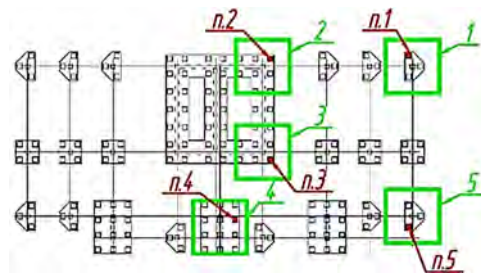


Рис.3 Характерні зони та палі для аналізу результатів розрахунків

Fig.3 Characteristic zones and piles for problem-solving analysis

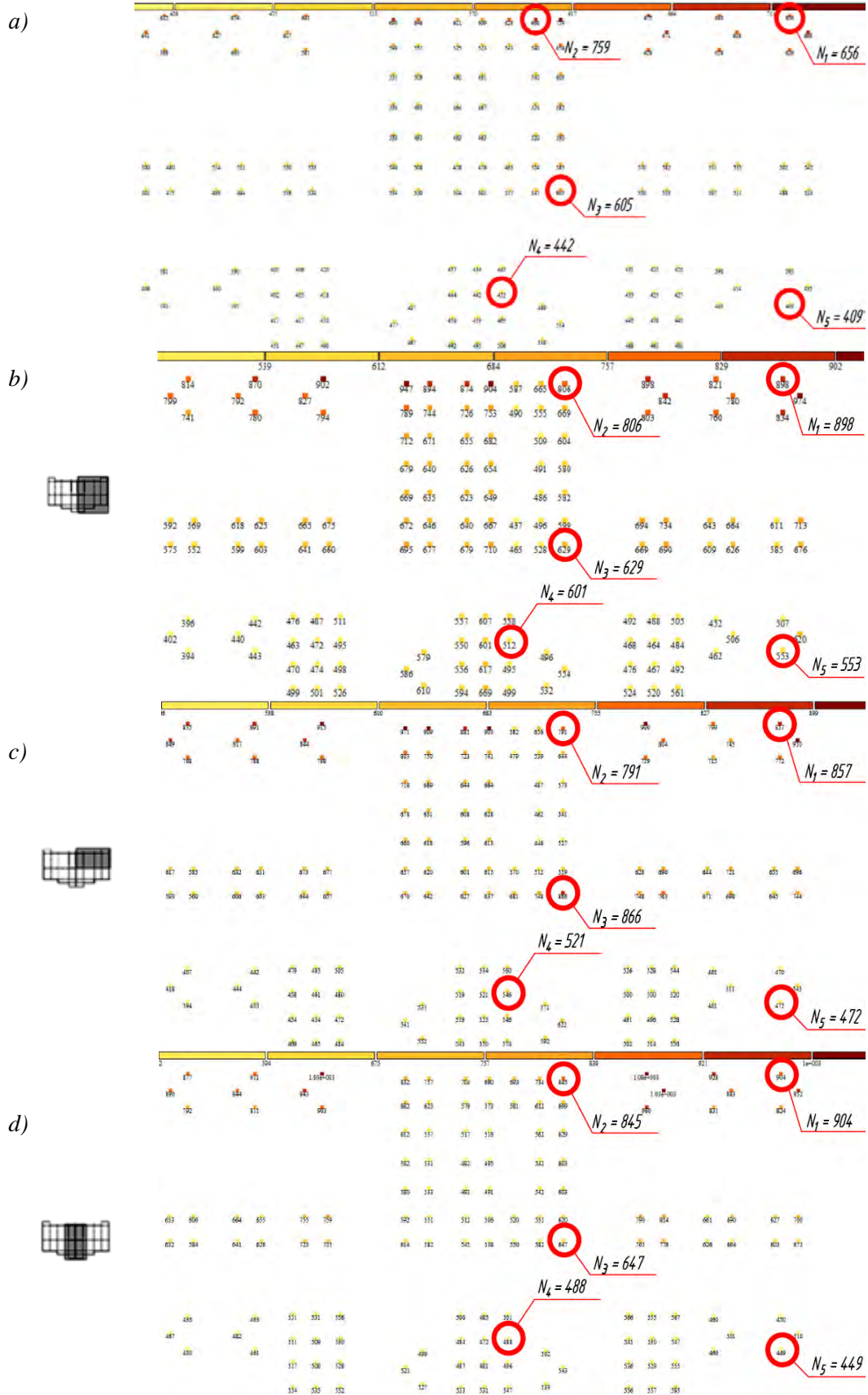


Рис.4 Зусилля N в палях, kH (окремі кущі паля): *a* - ґрунти в природному стані; *b* - замочування лесових супісків за схемою «1»; *c* - теж за схемою «2»; *d* - теж за схемою «3».
 Fig.4 Internal forces N in piles, kH (pile cap option): *a* - natural condition of the soils; *b* - water saturation of loess soils in zone «1»; *c* - the same in zone «2»; *d* - the same in zone «3».

При замочуванні лесових ґрунтів у правій кутовій зоні будівлі за результатами розрахунків максимальні значення зусиль у оголовках паль становлять $N=827\dots 972$ кН (рис.4-с) у палях в зоні ліфтових шахт та сходових клітин з найбільш підвітреної сторони будинку. Несуча здатність паль має значення за результатами моделювання, які варіюються в межах $F_d=978$ кН – для ділянки з ґрунтами у природному стані та $F_d=462$ кН – для паль у зоні водонасичення ґрунтової основи. Максимальне значення відносної несучої здатності складає $F'_d=1,97$ – для зони з водонасиченими лесовими супісками та $F'_d=0,415$ – для паль ділянки з ґрунтами у природному стані.

Розглядаючи замочування лесових ґрунтів під центральною зоною будівлі, комп'ютерне моделювання показало, що максимальні значення зусиль у оголовках паль сягають $N=921\dots 1090$ кН (рис.4-d), розташування найбільш навантажених паль характерно для зони підвітреної сторони будинку. Несуча здатність паль згідно числового моделювання має значення, що варіюються в межах $F_d=980$ кН – для ділянки з ґрунтами у природному стані та $F_d=538$ кН – у зоні водонасичення ґрунтової основи. При цьому максимальне значення відносної несучої здатності складає $F'_d=1,57$ – для зони з водонасиченими ґрунтами основи та $F'_d=0,453$ – для ділянки з ґрунтами у природному стані.

Дослідження взаємодії палювих фундаментів будівлі для варіанту стрічкових ростверків з ґрунтовою основою у природному стані (рис.5-a) показало, що максимальні значення зусиль у оголовках паль склали $N=921\dots 1090$ кН, у палях, що розміщені на зовнішніх кутах ядра жорсткості (зона ліфтових шахт та сходових клітин). Несуча здатність паль при цьому за результатами моделювання має величину в діапазоні $F_d=948\dots 978$ кН, значення відносної несучої здатності складає $F'_d=0,735$.

Для постановки задачі із замочуванням лесових ґрунтів у лівій половині будівлі максимальні значення зусиль у оголовках паль склали $N=649\dots 775$ кН (рис.5-b), локалізація найбільш навантажених паль – під

частиною ядра жорсткості. При цьому несуча здатність паль за даними моделювання варіюється в межах $F_d=964$ кН – для ділянки з ґрунтами у природному стані та $F_d=462$ кН – у зоні водонасичення лесових ґрунтів основи фундаментів будинку. Максимальне значення відносної несучої здатності складає $F'_d=1,33$ – для зони з водонасиченими лесовими супісками та $F'_d=0,288$ – для ділянки з ґрунтами у природному стані.

При замочуванні лесових ґрунтів у правій кутовій зоні будівлі за результатами розрахунків максимальні значення зусиль у оголовках паль становлять $N=651\dots 778$ кН (рис.5-с), розташування найбільш навантажених паль – під зовнішньою частиною ядра жорсткості. За даними числового моделювання несуча здатність паль має значення в діапазоні від $F_d=978$ кН – для ділянки з ґрунтами у природному стані до $F_d=462$ кН – у зоні водонасичення ґрунтової основи. Максимальне значення відносної несучої здатності $F'_d=1,32$ – для зони з водонасиченими ґрунтами основи та $F'_d=0,288$ – для ділянки з ґрунтами у природному стані.

Розглядаючи замочування лесових ґрунтів під центральною зоною будівлі, комп'ютерне моделювання показало, що максимальні значення зусиль у оголовках паль сягають $N=658\dots 780$ кН (рис.5-d), ці палі розташовані у місцях поєднання фундаменту ядра жорсткості з фундаментами колон. Несуча здатність паль за результатами розрахунків має значення $F_d=980$ кН – для ділянки з ґрунтами у природному стані та $F_d=538$ кН – у зоні водонасичення лесових супісків. Максимальне значення відносної несучої здатності $F'_d=1,14$ – для зони з водонасиченими ґрунтами основи та $F'_d=0,288$ – для ділянки з ґрунтами у природному стані.

Моделювання взаємодії палювих фундаментів будівлі з суцільним плитним ростверком з ґрунтовою основою у природному стані (рис.6-a) показало, що максимальні значення зусиль у оголовках паль склали $N=463\dots 522$ кН, локалізація цих паль – під частиною ядра жорсткості. При цьому несуча здатність паль має значення варіюються в межах $F_d=871\dots 843$ кН.

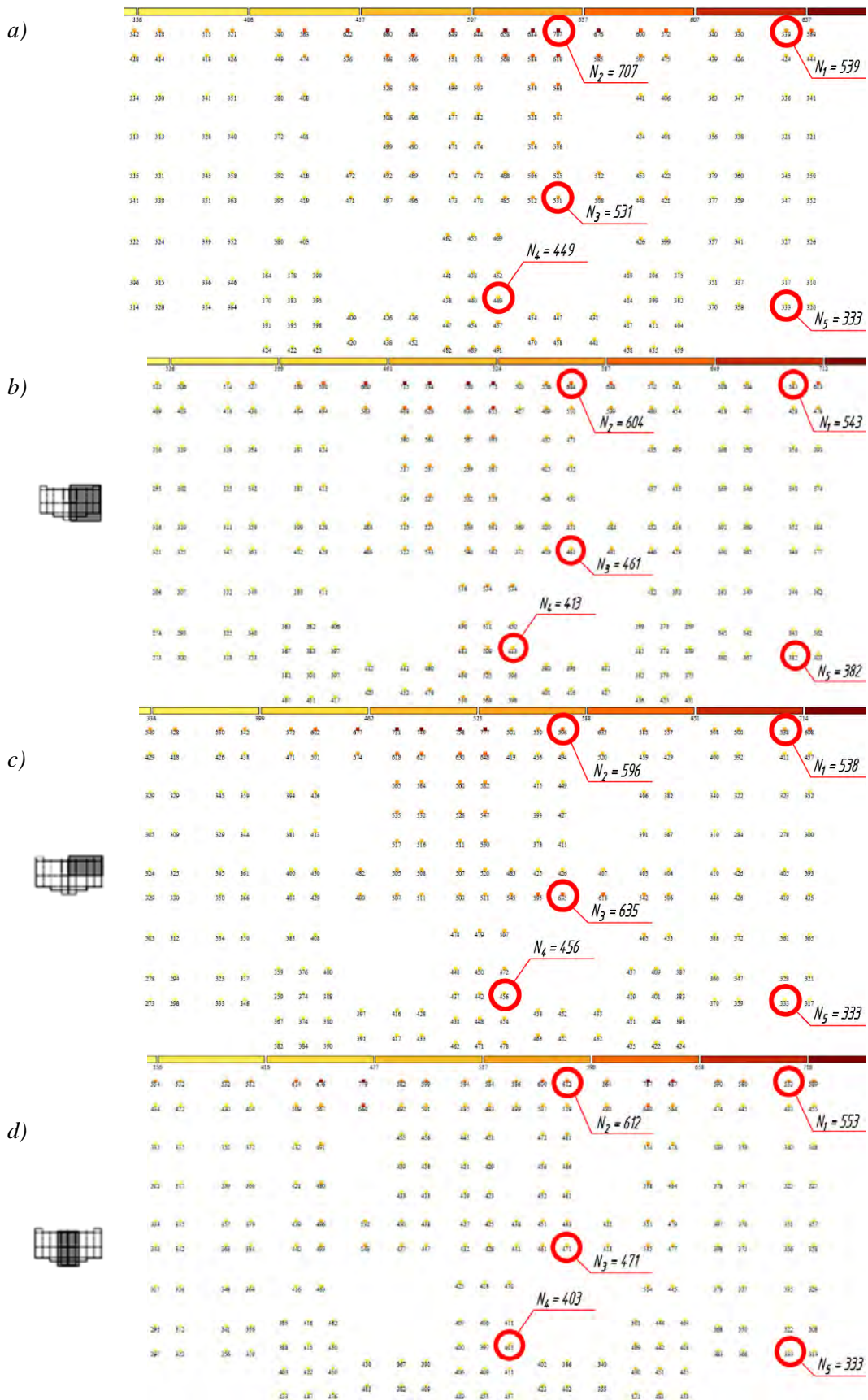


Рис.5 Зусилля N в палях, kN (перехресно-стрічкові ростверки): a - ґрунти в природному стані; b - за-мочування лесових супісків за схемою «1»; c - теж за схемою «2»; d - теж за схемою «3».

Fig.5 Internal forces N in piles, kN (strip pile cap option): 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».

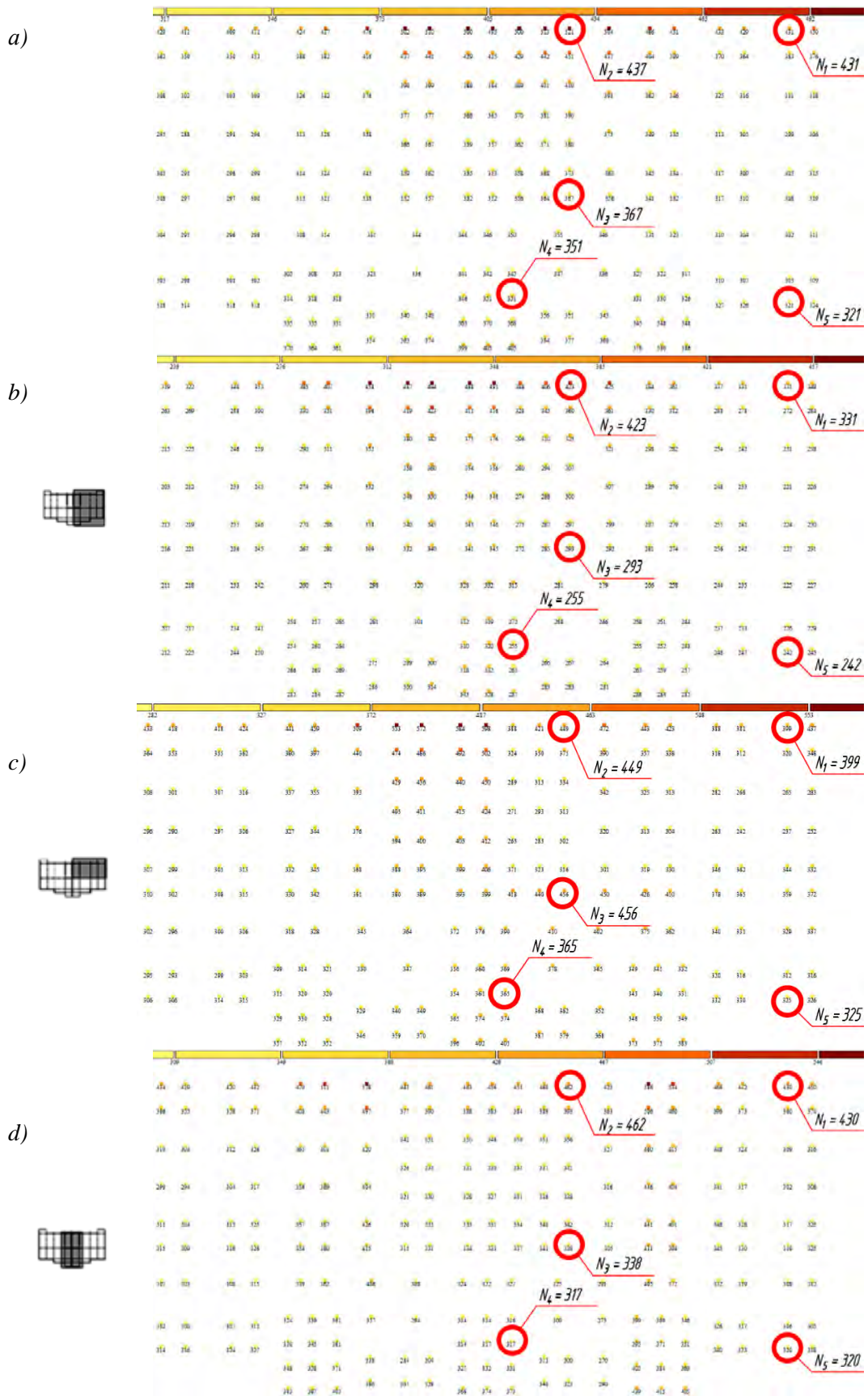


Рис.6 Зусилля N в палях, kH (плитний суцільний ростверк): a - ґрунти в природному стані; b - замочування лесових супісків за схемою «1»; c - теж за схемою «2»; d - теж за схемою «3».
 Fig.6 Internal forces N in piles, kN (raft pile cap option): a - natural condition of the soils; b - water saturation of loess soils in zone «1»; c - the same in zone «2»; d - the same in zone «3».

Для постановки задачі із замочуванням лесових ґрунтів у лівій половині будівлі максимальні значення зусиль у оголовках паль склали $N=421\dots494$ кН (рис.6-*b*), при цьому локалізація найбільш навантажених паль зберігається. Несуча здатність паль згідно розрахунку має значення $F_d=858$ кН – для ділянки з ґрунтами у природному стані та $F_d=556$ кН – у зоні водонасичення ґрунтової основи. Максимальне значення відносної несучої здатності $F_d^{\text{відн}}=0,675$.

При замочуванні лесових ґрунтів у правій кутовій зоні будівлі за результатами розрахунків максимальні значення зусиль у оголовках паль становлять $N=508\dots599$ кН (рис.6-*c*), розташування цих паль – під частиною ядра жорсткості будинку. За даними розрахунку значення несучої здатності паль складає $F_d=978$ кН – для ділянки з ґрунтами у природному стані та $F_d=462$ кН – у зоні водонасичення лесових порід ґрунтової основи. Максимальне значення відносної несучої здатності $F_d^{\text{відн}}=0,946$ – для зони з водонасиченими ґрунтами основи та $F_d^{\text{відн}}=0,305$ – для ділянки з ґрунтами у природному стані.

Розглядаючи замочування лесових ґрунтів під центральною зоною будівлі, комп'ютерне моделювання показало, що максимальні значення зусиль у оголовках паль сягають $N=507\dots586$ кН (рис.6-*d*). Несуча здатність паль при цьому складає $F_d=980$ кН – для ділянки з ґрунтами у природному стані та $F_d=538$ кН – у зоні водонасичення ґрунтової основи. Максимальне значення відносної несучої здатності $F_d^{\text{відн}}=0,859$ – для зони з водонасиченими ґрунтами основи та $F_d^{\text{відн}}=0,308$ – для ділянки з ґрунтами у природному стані.

Результати дослідження зміни несучої здатності F_d та зусилля N в оголовках паль, що були відібрані для аналізу результатів (рис. 3) в залежності від постановки задачі (зони замочування ґрунтів) наведено у вигляді графіків (рис. 7, 8). Проведено порівняння величин відносної несучої здатності обраних паль $F_d^{\text{відн}}$ до мінімально допустимого значення (рис. 9).

При проведенні аналізу зміни несучої здатності досліджуваних паль виявлено падіння величини F_d для всіх 5 досліджуваних

паль в постановці задачі #2 – при замочуванні правої половини ґрунтового масиву (рис. 8-*a*). Для паль при постановках #3-4 є характерним зменшення чи збільшення показника несучої здатності відповідно до розташування зони замочування.

При постановці задачі #1 (ґрунти основи в природному стані) відносна несуча здатність $F_d^{\text{відн}}$ забезпечується для всіх досліджуваних паль і знаходиться в межах $0,4\dots0,8$ (рис. 9-*a*). При замочуванні різних зон ґрунтового масиву (постановки #2-4) спостерігається погіршення несучої здатності паль,

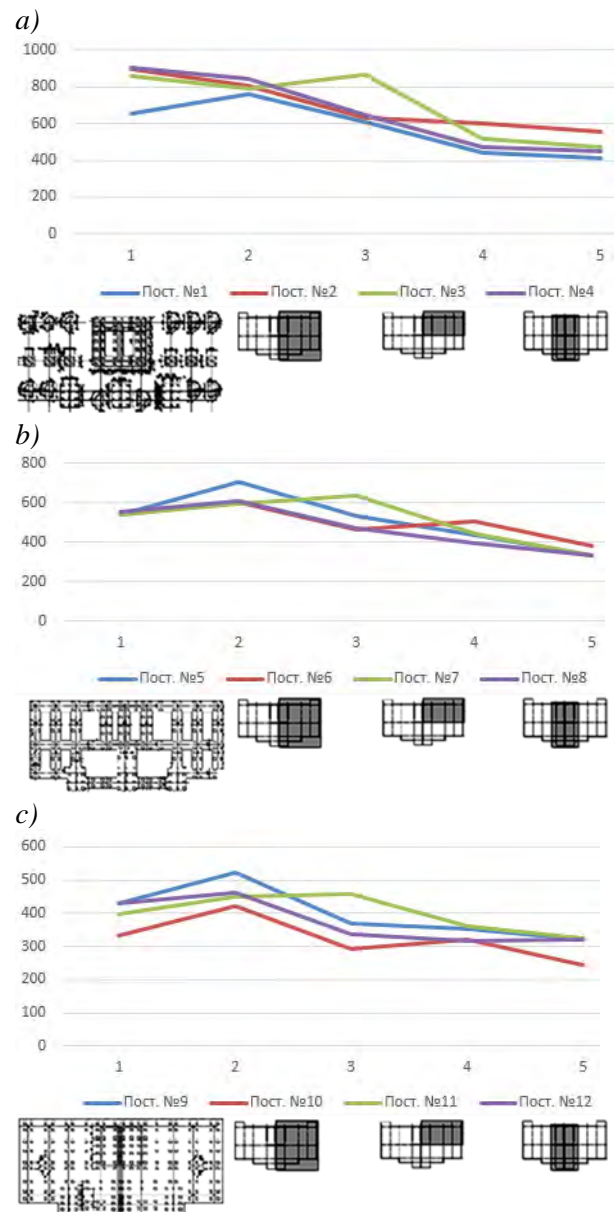


Рис.7 Зусилля N в палях, кН: *a* – кушті паль; *b* – стрічкові ростверки; *c* – плитний ростверк.
Fig.7 Internal forces N in piles, кН: *a* – pile cap; *b* – strip pile cap; *c* – raft pile cap.

що знаходяться в зонах з погіршеними характеристиками ґрунтів. Так, величини F_d для палі 1 змінюються з 0,67 при початковій постановці задачі до 1,94...1,85 при постановках задач із замочуванням лесових супісків у зоні, де вона розташована.

При проведенні аналізу зміни несучої здатності F_d палі зі стрічковими ростверками (рис. 8-*b*) виявлено падіння її величини для всіх 5 досліджуваних палі в постановці задачі #6 – при замочуванні правої половини ґрунтового масиву. Для палі при постановках #6-8 є характерним зменшення чи збільшення показника несучої здатності відповідно до розташування зони

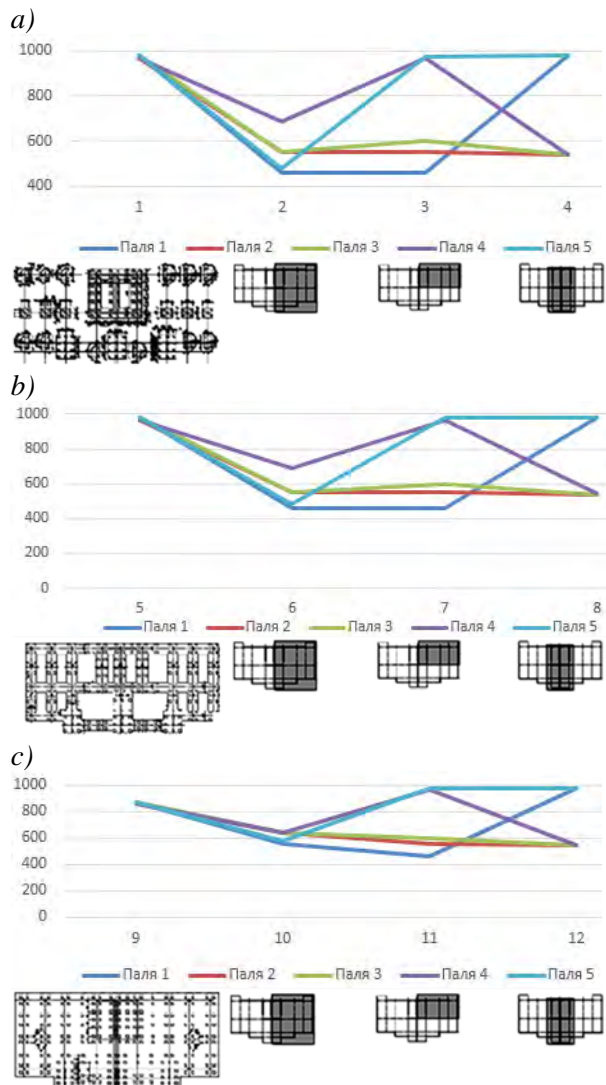


Рис.8 Несуча здатність палі F_d , кН: *a* – куці палі; *b* – стрічкові ростверки; *c* – плитний ростверк.

Fig.8 Bearing capacity of pile F_d , kN: *a* – pile cap; *b* – strip pile cap; *c* – raft pile cap.

замочування лесових супісків.

При постановці задач #5 (ґрунти у природньому стані) відносна несуча здатність F_d знаходилась в межах 0,34...0,73 для всіх досліджуваних палі (рис. 9-*b*). Після моделювання постановок задач #5-8 можна зробити висновок, що для досліджуваних палі 1 та 2 при погіршенні характеристик ґрунтів основи внаслідок замочування лесових супісків відбувається зменшення несучої здатності. Значення F_d для цих палі змінюються до 1,18...1,16 та 1,09...1,14 відповідно у

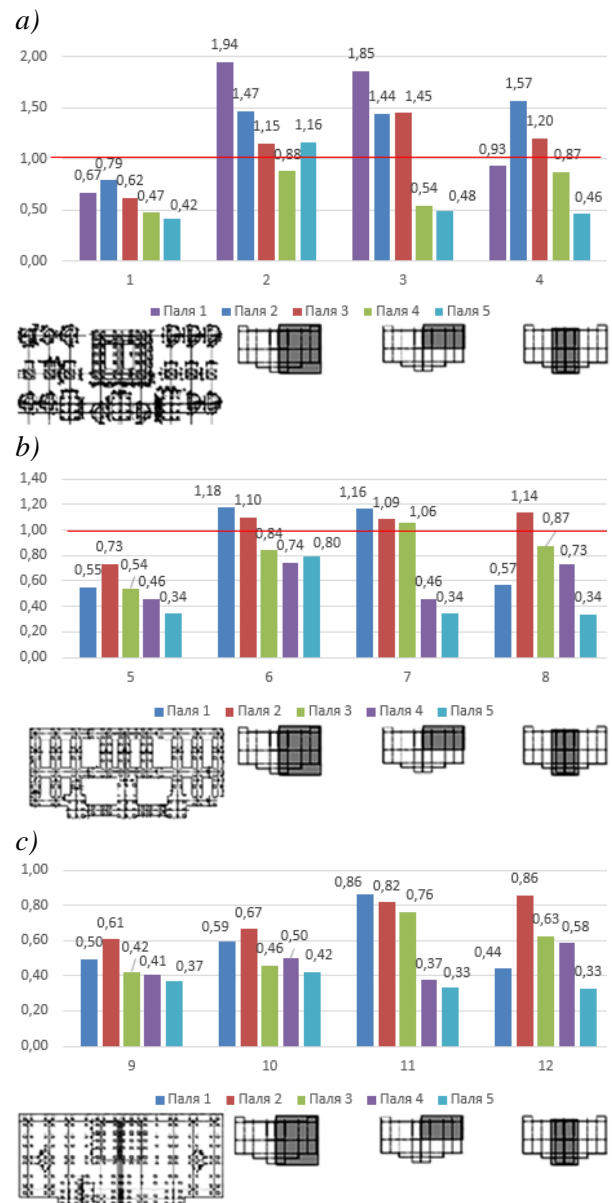


Рис.9 Відносна несуча здатність палі F'_d , кН: *a* – куці палі; *b* – стрічкові ростверки; *c* – плитний ростверк.

Fig.9 Relative bearing capacity of pile F'_d , kN: *a* – pile cap; *b* – strip pile cap; *c* – raft pile cap.

випадку розташування під ними зони замочування. Гістограму зміни відносної несучої здатності досліджуваних палей для постановок задач #5-8 представлено на рис. 9-*b*.

При проведенні аналізу зміни несучої здатності палей для варіанту суцільного плитного ростверку (рис. 8-*c*) виявлено падіння її величини для всіх 5 досліджуваних палей в постановці задачі #10 – при замочуванні правої половини ґрунтового масиву. Для палей при постановках #11-12 є характерним зменшення чи збільшення показника несучої здатності відповідно до розташування зони замочування.

При постановці задач #9 (ґрунти основи в природньому стані) відносна несуча здатність F_d знаходилась в межах 0,37...0,61 для всіх досліджуваних палей (рис. 9-*c*). Після моделювання постановок #10-12 можна зробити висновок, що несучої здатності для всіх досліджуваних палей в даному типі фундаменту достатньо. Значення F_d для цих палей залишаються меншими за 1 при всіх варіантах замочування лесових шарів ґрунтів основи (рис. 9-*c*).

Аналіз результатів всіх розглянутих постановок задач (рис. 10) показав, що згідно з результатами числового моделювання на дослідні палі 1,2,3 вплив замочування ґрунтів основи виявився найбільшим, тому для них наведено графіки порівняння навантаження та несучої здатності при 12 постановках задач (рис. 11).

Можна пересвідчитись, що показники відносної несучої здатності F_d для дослідних палей 1,2,3 та постановок задач з кущами палей та перехресно-стрічковим палевим фундаментом перевищують допустимі значення (рис.10).

Для варіанту кущів палей та перехресно-стрічкових ростверків палевих фундаментів показники відносної несучої здатності F_d становили 1,94 та 1,19 відповідно для палей з найбільшим впливом водонасичення лесових ґрунтів, при цьому для палевого фундаменту з суцільним плитним ростверком цей показник становив 0,86.

Для забезпечення надійної експлуатації будинку в умовах можливого водонасичення лесових супісків ґрунтової основи

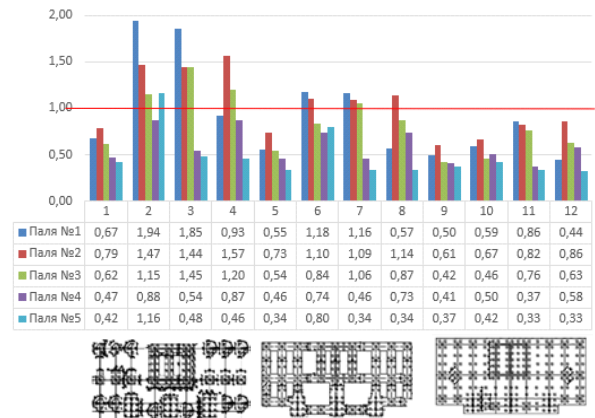


Рис.10 Відносна несуча здатність палей F_d , кН.
Fig.10 Relative bearing capacity of pile F_d , kN.

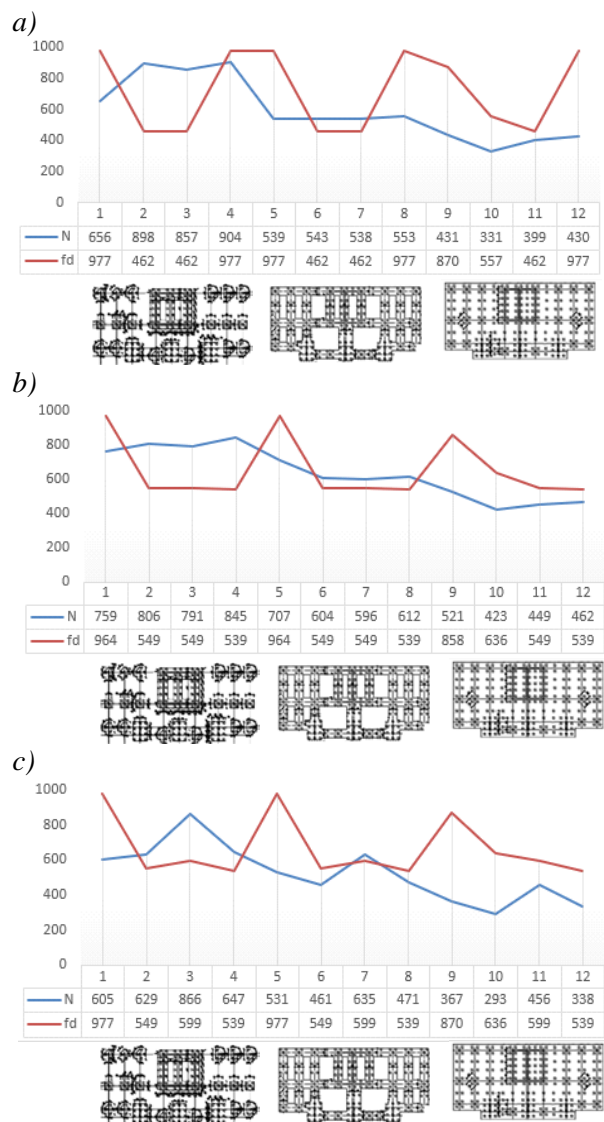


Рис.11 Порівняння F_d та N , кН: *a* – для дослідної палі #1; *b* – теж для #2; *c* – для #3.
Fig.11 F_d and N value comparison, kN: *a* – for pile #1; *b* – for pile #2; *c* – for pile #3.

внаслідок аварійних втрат міських мереж водопостачання найкращим варіантом буде влаштування пальового фундаменту з суцільним плитним ростверком.

Результати аналізу впливу зон замочування просідаючих ґрунтів на зміну характеру деформування фундаментів та перерозподіл зусиль у ростверках було наведено у публікації [4], що була опублікована раніше.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Комп'ютерне моделювання взаємовпливу елементів системи «ґрунтова основа – фундамент – надземні конструкції будівлі», дає змогу відслідковувати зміну характеру розподілу напружень у несучих конструкціях будинку, особливо для ділянок будівництва з можливістю реалізації випадків нерівномірного деформування ґрунтової основи фундаментів.

Застосування комп'ютерних програмних комплексів для варіантного проектування фундаментних конструкцій за результатами числового моделювання спільної роботи будівлі з ґрунтовою основою забезпечує можливість пошуку та обґрунтування надійного та раціонального варіанту проектного рішення.

Аналіз результатів дослідження дозволяє зробити наступні висновки:

- Показано, що числове 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 зволоження лесових порід та їх розміри впливають на перерозподіл напружень у конструкціях фундаментів.

- Отримано, що для куштів паль та перехресно стрічкового пальового фундаменту показники відносної несучої здатності F_d становили 1,94 та 1,18 відповідно для паль з найбільшим впливом водонасичення ґрунтів основи, при цьому для пальового фундаменту з суцільним плитним ростверком цей показник становив 0,86.

- Встановлено, що з трьох запроєктованих відповідно до нормативних вимог варіантів

фундаментів будинку, після оцінки впливу можливого водонасичення лесових ґрунтів показники несучої здатності для обраних для аналізу паль є прийнятними лише для пальового фундаменту із суцільним плитним ростверком

- Показано, що варіативне проектування фундаментів, з можливістю зміни їх параметрів та ґрунтових умов будівельного майданчика з врахуванням проявлення негативних факторів, що можуть виникнути під час експлуатації будинку, дозволяє обґрунтувати економічно ефективний та 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 замкнених 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. Вплив можливого водонасичення лесового ґрунту на напружено-деформований стан фундаментів багатоповерхового будинку / Вероніка Жук, Ірина Павленко // *Основи і фундаменти: Науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2022. – Вип.44. – С.27-43.
5. Жук В.В. До розрахунків спільної роботи будівлі з ґрунтовою основою в умовах нерівномірних деформацій / В.В. Жук, В.Л. Підлучський // *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2015. – Вип.36. – С.122-130.
6. 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 «НВК «Інтер-М». – 2013. – Вип.2(38). – С.2-7.

7. Моргун А.С. Вплив техногенного фактора замочання 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.
8. Моргун А.С. Прогнозування впливу води на напружено-деформований стан лесової основи пальових фундаментів / А.С. Моргун, І.А. Моргун // *Вісник Вінницького політехн. інст-ту*. – 2007. – #2. – С.20-23.
9. 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.
10. Соколов Н. Проблема лессов / Н. Соколов // *Соросовский образовательный журнал*. – 1996. – #9. – С.86–93.
11. Янко К.О. До зміни напружено-деформованого стану лесової основи пальового фундаменту внаслідок її замочання / 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 naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, K.: KNUBA, 30, 3-8. (in Ukrainian).
2. Vynnykov Yu.L. (2010). Problemy vyznachennia modulua deformatsii zamoklykh lesopodobnykh 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 fizyko-mekhanichnykh 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., Pavlenko I. (2022). Vplyv mozhyvoho vodonasychennia lesovoho gruntu na napruzhenodeformovanyi stan fundamentiv bahatopo-verkhovoho budynku [The effect of possible water saturation of loess soil on the stress-strain state of the foundations of a multi-story building]. *Osnovy i fundamente: naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, K.: KNUBA, 44, 27-43. (in Ukrainian).
5. Zhuk V.V., Pidlutskyi V.L. (2015). Do rozrakhunkiv spilnoi roboty budivli z gruntovoio 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 naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, K.: KNUBA, 36, 122-130. (in Ukrainian)
6. 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 colapsible soils]. *Svit heotekhniki: Naukovo-tekhnichnyi zhurnal, Zaporizhzhia: TOV «NVK «Inter-M»*, 2(38), 2-7. (in Ukrainian)..
7. 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).
8. 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).
9. Motorny A.N., Motorny N.A. (2014). Napriazhenodeformirovannoe sostoianye osnovaniya svainykh fundamentov na lessovykh prosadochnykh hruntakh pry zamachyvanny prosadochnoi tolshchy snyzu vverkh (podtoplenye terrytory) [Stress-strain state of the base of pile foundations on loess colapsible soils when the collapse stratum is soaked from the bottom up (flooding of the territory)]. *Visnyk PDABA*, 2(191), 20-30. (in Russian).
10. Sokolov N. (1996). Problema lessov [The loess problem]. *Sorosovskiy obrazovatelnyi zhurnal*, 9, 86–93. (in Russian).
11. 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 (Haluzeva mashynobud., bud-vo)*, P.: PoltNTU, 12, 277-280. (in Ukrainian).

Assessment of the stress-strain state of pile foundations of a multi-story building with possible water saturation of loess soil

*Veronika Zhuk,
Iryna Pavlenko*

Summary. The increase in the density of buildings leads to the need to set aside for development areas that were previously considered unfavorable from the point of view of the quality of the geological conditions. Deposits of loess rocks cover almost 80% of the territory of Ukraine. Such soils are characterized by a negative feature - the ability to rapidly reduce their mechanical properties in contact with liquid and to cause additional subsidence deformations. Based on this, a significant part of buildings and structures is erected in conditions of the possible occurrence of uneven deformations due to water saturation of subsidence soils. Therefore, the foundation structures of these structures must be designed with taking into account the occurrence of subsidence of loess soils.

In their natural state, loess soils have sufficiently high mechanical characteristics due to structural connections. However, as the moisture content increases, the resistance to compression rapidly decreases, structural bonds are destroyed, and soil subsidence is observed.

The modern level of foundation structures design involves the search for a reliable and cost-effective foundation option. This is especially relevant in the conditions of construction on soils that have the property of settling with possible increase in moisture content.

The paper presents the results of a comparison of foundation options, taking into account the influence of possible water saturation of loess soils on the stress-strain state of foundation structures. Different schemes of possible water saturation of loess soils were considered depending on their size and location.

This publication is a continuation of the previously published work [4]. It was about the results of the research, which was devoted to the variant

design of foundations using numerical simulation of the joint work of the elements of the "soil base - foundation - above-ground structures" system. According to the results of the study, the choice of a rational option of foundations was substantiated, based on its indicators of reliability and economic efficiency. The conducted research confirms that the size and location of the soaking zones of the subsiding soil affect the nature of the stress distribution in the foundation structures. It is shown that the variant design of foundations, taking into account the negative factors related to the soil conditions of the construction site, as well as man-made situations that may arise during the operation of the building, make it possible to design a reliable and at the same time cost-effective option of the foundations.

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