

**Дослідження напружено-деформованого стану лесової основи позацентрово навантаженого фундаменту вежі при врахуванні можливого водонасичення ґрунту***Остан КАШОЇДА<sup>1</sup>, Вероніка ЖУК<sup>2</sup>*

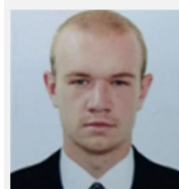
Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітряних сил, Київ, Україна, 03037,  
<sup>1</sup>o.o.kashoida@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9234-4489  
<sup>2</sup>zhuk.vv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-1114 -3192

DOI: 10.32347/0475-1132.48.2024.86-99

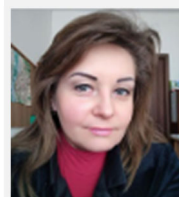
**Анотація.** У даній роботі виконано варіантне проектування фундаменту неглибокого закладання під вежу з використанням числового моделювання у програмному комплексі «Midas GTS NX». Фундаменти являють собою чотири окремі конструкції, що сприймають опорні реакції від опор вежі. В залежності від напрямку дії вітрового навантаження опорні реакції змінюються як кількісно, так і якісно (один фундамент сприймає вдавлююче зусилля, інший може сприймати висмикуюче зусилля). В роботі розглянуто два варіанти завантаження від дії вітру: вітрове навантаження діє на грань вежі або на ребро вежі.

Геологічна будова майданчика для дослідження прийнята спрощеною - такою, що складається із одного інженерно-геологічного елементу, що являє собою лесовий ґрунт (супісок пилюватий у твердому стані). Числове моделювання ґрунтового масиву було реалізовано з використанням об'ємних скінченних елементів з пружно-пластичним законом деформування та критерієм міцності Кулона-Мора.

Варіантне проектування передбачало розрахунок фундаменту вежі на природній основі та з влаштуванням ґрунтової подушки. Дослідження виконувалось для фундаментів споруди вежі у чотирьох постановках: 1) основа у природному стані; 2) влаштована ґрунтова подушка потужністю 1,6 м; 3) природна основа з локальним замочуванням ґрунту; 4) влаштована ґрунтова подушка з локальним водонасиченням ґрунту. Моделювання влаштування ґрунтової подушки відбувається за допомогою заміни жорсткості скінченного елементу на певній стадії розрахунку у ПК «Midas GTS NX». Алгоритм моделювання



**Остан КАШОЇДА**  
доцент кафедри геотехніки  
PhD



**Вероніка ЖУК**  
доцент кафедри геотехніки  
к.т.н., доцент

замочування ґрунтової основи під фундаментами виконано аналогічним чином, тобто відбувалася заміна фізико-механічних характеристик певних скінченних елементів. Локалізація зон замочування обиралася із умов виникнення найбільш невігідних сполучень навантажень і переміщень фундаментів. Форма зон водонасичення ґрунту обумовлена причинами можливого підвищення вологості ґрунтів основи фундаментів споруди, що розглядалася у дослідженні.

Виконано аналіз напружено-деформованого стану ґрунтової основи фундаментів під вежу на природній основі та з влаштуванням ґрунтової подушки в залежності від схеми прикладеного навантаження на рівні верхнього обрізу фундаменту та можливого локального водонасичення лесового ґрунту в основі фундаментів.

**Ключові слова.** Числове моделювання, напружено-деформований стан, лесовий ґрунт, стовпчастий фундамент, ґрунтова подушка, нерівномірні деформації.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Виконане дослідження присвячено аналізу впливу можливого водонасичення лесових ґрунтів основи на напружено-деформований стан (НДС) фундаментів вежі.

Актуальність виконаного дослідження полягає в необхідності врахування при проектуванні нових споруд, що зводяться на лесових ґрунтах, ймовірного виникнення негативного явища просідання ґрунтів основи, коли водонасичення може бути спричинено не тільки впливом техногенних факторів, а також дією кліматичних чинників.

Лесові ґрунти мають значне поширення на території України та покривають близько 80% її території. Такі ґрунти відрізняються своєю негативною особливістю при контакті з водою знижувати свої механічні властивості та давати додаткові деформації просідання. Більшість споруд в Україні будується та експлуатується саме в таких несприятливих ґрунтових умовах. Цим пояснюється необхідність проектування фундаментних конструкцій з врахуванням можливого розвитку нерівномірних деформацій, які спричинені просіданням лесових ґрунтів при можливому підвищенні їх вологості.

Лесові ґрунти в природному стані мають міцну структуру і високі значення фізико-механічних характеристик. Проте зі збільшенням вмісту вологи відбувається руйнування структури, що призводить до явища просідання. Врахування такої поведінки ґрунту основи фундаментів є обов'язковим при проектуванні будівель і споруд, що зводяться в таких ґрунтових умовах. У представленій роботі наведено результати виконаного варіантного проектування фундаментів вежі з врахуванням можливого локального 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 схеми завантаження вежі.

Сучасний рівень проектування основ і фундаментів споруд на просідаючих ґрунтах має враховувати ймовірний розвиток

негативних факторів на будівельному майданчику (можливу зміну гідро-геологічної ситуації).

## АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Напружено-деформований стан фундаментних конструкцій при можливому водонасиченні лесових ґрунтів залежить від цілого ряду чинників, таких як власна жорсткість надземної частини і фундаментних конструкцій, параметри ґрунтового середовища, розташування зон водонасичення ґрунтової основи, а також габарити і форма зон замочування лесового ґрунту. Вивчення впливу цих факторів можливе завдяки числовому моделюванню взаємодії всіх елементів системи "ґрунтова основа – фундаментні конструкції" з урахуванням можливості локального замочування лесових ґрунтів.

Точність розрахунків і відповідність їх результатів реальним умовам напряму залежать від можливостей розрахункового комплексу, моделі ґрунтового середовища, деталізації скінчено-елементної моделі та постановки задач, а також параметрів моделі, що описує закономірності поведінки ґрунту, які є вихідними даними для розрахунків. Врахування особливостей поведінки ґрунтової основи під час просідання лесового ґрунту внаслідок підвищення вологості є важливим етапом проектування фундаментних конструкцій споруд, які зводяться в умовах можливого нерівномірного деформування ґрунтів.

Численні опубліковані праці, зокрема ті, які виконали Бойко І.П., Винников Ю.Л., Дранніков А.М., Зоценко Н.Л., Краєв В.Ф., Соколова М. та інші, досліджують властивості лесових ґрунтів та закономірності їх поведінки під навантаженням.

Представлена робота є продовженням попередніх досліджень, які були виконані науковцями-геотехніками із використанням числового моделювання [1-5] і присвячена варіантному проектуванню фундаментів споруди з урахуванням можливого локального водонасичення лесових ґрунтів основи внаслідок дії кліматичних чинників підвищення вологості ґрунтів.

## МЕТА РОБОТИ

Дослідження присвячено аналізу зміни напружено-деформованого стану ґрунтової основи і фундаментних конструкцій вежі, що сприймають позacentрове навантаження з урахуванням можливого локального водонасичення лесового ґрунту в основі фундаментів.

## ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

В рамках дослідження було заплановано виконати числове моделювання впливу можливого водонасичення основи, складеної лесовими ґрунтами, для варіантного проектування фундаментів під вежу. Варіантне проектування (розрахунок) фундаментів було виконано з врахуванням наступних особливостей моделювання ґрунтової основи: 1) лесова основа у природному стані; 2) часткова заміна лесового ґрунту - влаштування ґрунтової подушки потужністю 1,6 м; 3) лесова основа з урахуванням локального її водонасичення; 4) влаштована ґрунтова подушка з урахуванням локального водонасичення ґрунту в основі фундаментів.

Дослідження було виконано на прикладі спрощених ґрунтових умов майданчика будівництва - однорідного ґрунтового масиву розмірами 80×80×20 м (рис. 1).

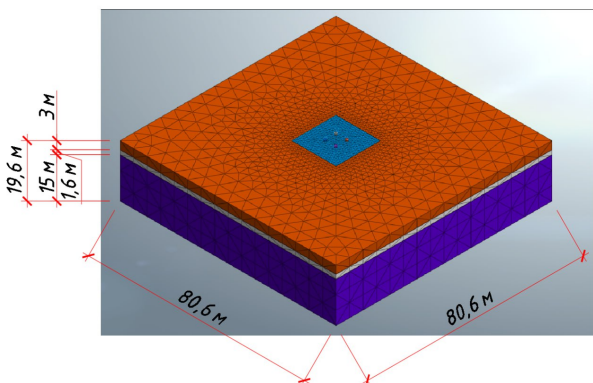


Рис.1. SE-модель основи у ПК «Midas GTS NX»  
Fig.1. FE-model of the soil base in «Midas GTS NX» software.

Фізико-механічні характеристики ґрунтового масиву були прийняті для

дослідження на прикладі показників для су-піску пилюватого, лесовидного, твердої консистенції, просідаючого. Закономірності поведінки при числовому моделюванні було описано наступними параметрами: модуль деформації  $E = 11$  МПа; питома вага  $\gamma = 15,53 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$ ; питоме зчеплення  $c = 13$  кПа; кут внутрішнього тертя  $\varphi = 24^\circ$ .

Етапність розрахунків враховувала розробку котловану. Виймка для влаштування фундаментів має глибину 3 м, а її габарити наведені на рис. 2.

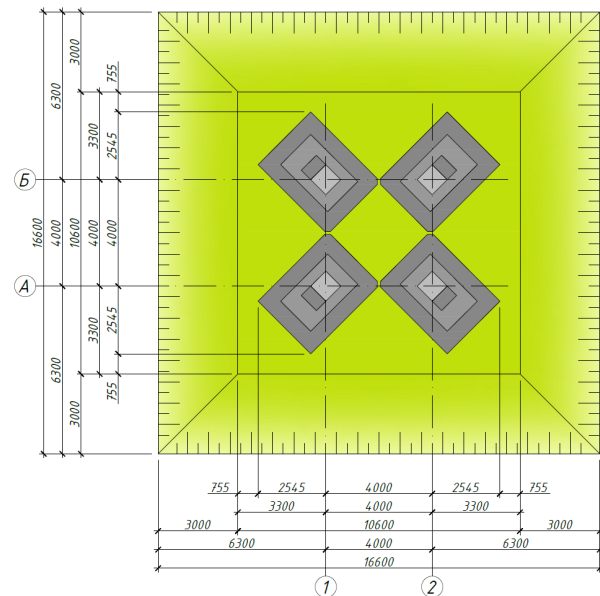


Рис.2. Схема виїмки із розташуванням фундаментів.

Fig.2. Pit Scheme with the location of the foundations.

На рис. 3 наведено габарити фундаментів та переріз виїмки по діагоналі. Фундаменти мають підшву габаритами 3,7×2,8 м, висота фундаменту складає 3,5 м.

На рис. 4 наведено прикладання навантаження до верхнього обрізу фундаменту в залежності від напрямку дії вітрового навантаження на вежу. Розглядалися дві комбінації навантажень, адже фундамент і вежа є симетричними, тому прикладання навантаження до кожного ребра і грані вежі є ірраціональним підходом для аналізу напружено-деформованого стану основи.

В рамках варіантного проектування фундаментних конструкцій було розглянуто варіант влаштування ґрунтової подушки

товщиною 1,6 м з габаритами в плані 10,6х10,6 м. Було прийнято, що ґрунтова подушка влаштовується із місцевих ґрунтів (супісок пилюватий, твердий) шляхом пошарового ущільнення до значення щільності ґрунту у сухому стані  $\rho_d = 1,68 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ .

Фізико-механічні характеристики ґрунтового середовища в цьому випадку для числового моделювання було прийнято наступними:  $E = 24 \text{ МПа}$ ;  $\gamma = 18,93 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$ ;  $c = 15 \text{ кПа}$ ;  $\varphi = 28^\circ$ .

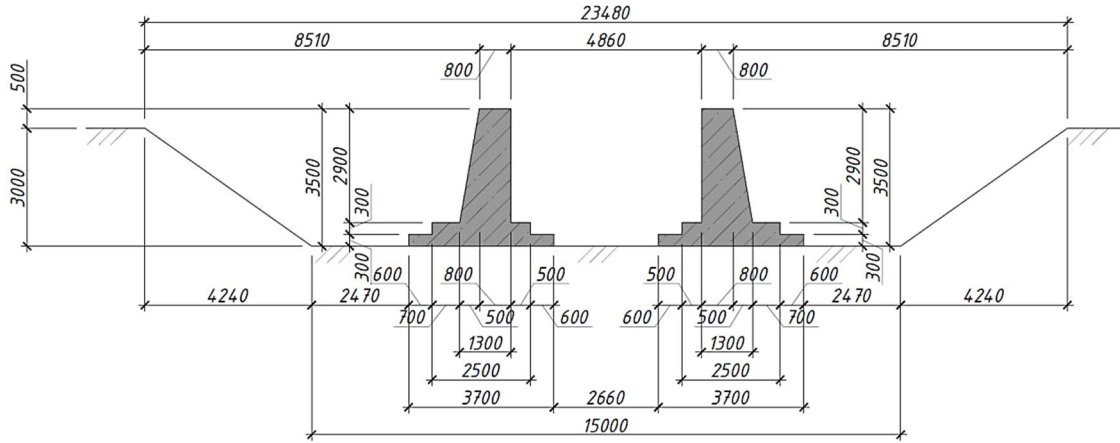


Рис.3. Переріз виїмки по діагоналі.  
Fig.3. Diagonal cross-section of the pit.

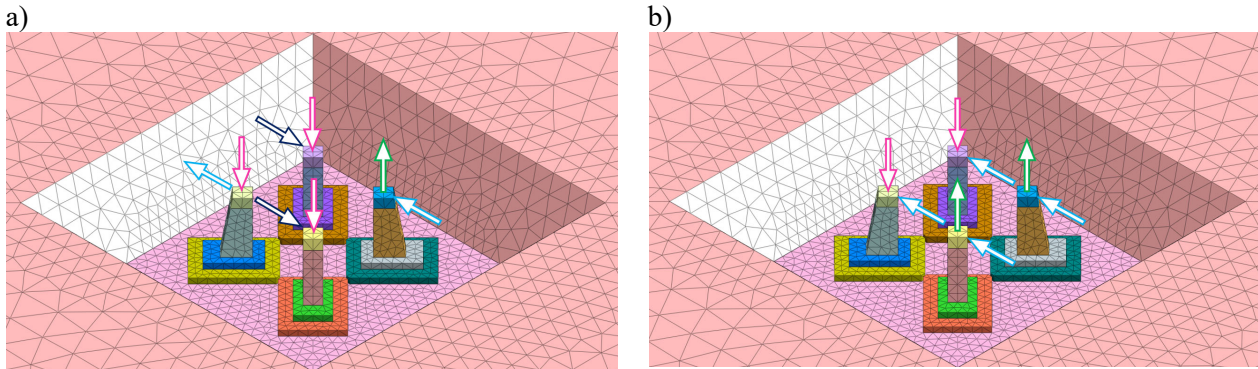


Рис.4. Схема прикладання навантаження до фундаментів: а) – вітрове навантаження прикладено на ребро вежі; б) – вітрове навантаження прикладено до грані вежі.  
Fig.4. Scheme of load application to the foundations: a) – wind load is applied to the edge of the tower; b) – wind load is applied to the face of the tower

Також, додатково, в рамках дослідження, було розглянуто можливість локального водонасичення лесового ґрунту в основі фундаментів. Враховуючи тип споруди (вежа) не розглядається варіант аварійного витoku з водонесних мереж. В рамках дослідження геологічна будова майданчика розглядається з відсутністю ґрунтових вод на розвідану глибину буріння (20 м). Виходячи з цього, випадок підняття рівня підземних вод теж не розглядається.

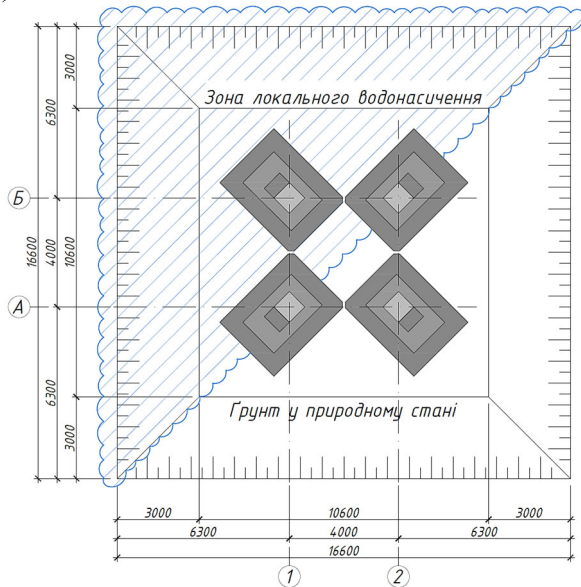
В дослідженні розглядається можливість сезонного водонасичення ґрунту атмосферними (дощовими і талими) водами

внаслідок надходження води по граням виїмки. Розміри і розташування зони локального водонасичення було обрано з врахуванням діючих навантажень таким чином, щоб спричинити збільшення нерівномірних деформацій та різниці осідань фундаментів, як найбільш не вигідний сценарій розвитку подій (рис. 5). Фізико-механічні характеристики ґрунту (супісок у водонасиченому стані) в рамках дослідження було прийняті наступними:  $E = 4 \text{ МПа}$ ;  $\gamma = 18,77 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$ ;  $c = 3,25 \text{ кПа}$ ;  $\varphi = 18^\circ$ .

Аналогічна схема водонасичення ґрунту

була розглянута для варіанту із влаштування ґрунтової подушки. Для даного варіанту числового моделювання фізико-механічні характеристики ґрунту (ґрунтової подушки у водонасиченому стані) в рамках дослідження було прийнято наступними:  $E = 8 \text{ МПа}$ ;  $\gamma = 20,12 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$ ;  $c = 6,5 \text{ кПа}$ ;  $\varphi = 24,4^\circ$ .

а)



б)

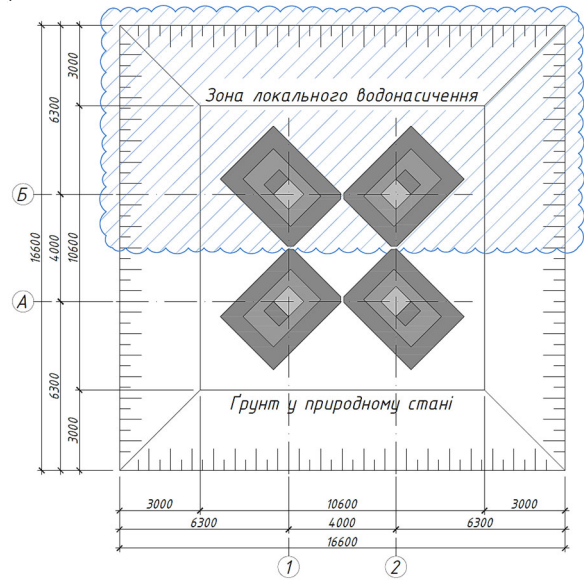


Рис.5. Схеми локального водонасичення основи за умови варіації дії вітрового навантаження: а) – вітрове навантаження прикладено на ребро вежі; б) – вітрове навантаження прикладено до грані вежі.

Fig.5. Localization of water saturation zone depending on wind load application scheme: a) – wind load is applied to the edge of the tower; b) – wind load is applied to the face of the tower

Вирішення поставленої задачі потребувало виконати вісім окремих розрахунки моделі, що являє собою систему «ґрунтова основа – фундаментні конструкції», що було реалізовано із використанням ПК «Midas GTS NX». Використання даного програмного комплексу обумовлено тим, що його застосування дозволяє виконати ефективний аналіз напружено-деформованого стану системи «основа-фундамент».

Числове моделювання взаємодії елементів системи «ґрунтова основа – фундаментні конструкції» у ПК «Midas GTS NX» виконано із використанням об'ємних скінченних елементів (СЕ). Об'ємні СЕ, що моделюють залізобетонні конструкції фундаменту володіють пружними властивостями та параметрами, що відповідають даному матеріалу.

Триангуляція скінченних елементів виконана із кроком 40 см, а самі СЕ мають форму піраміди.

Об'ємні СЕ які моделюють ґрунтове середовище володіють пружно-пластичним законом деформування із критерієм міцності Кулона-Мора. Триангуляція має змінний крок (рис. 6) та змінюється від 0,4 м до 5 м. Ґрунтова подушка має триангуляцію 0,5 м, виїмка у місці примикання до ґрунтової подушки має крок триангуляції 0,5 м, а у місця примикання до ґрунтового масиву крок триангуляції становить 1 м.

Підхід із варіантним проектуванням передбачає розрахунок фундаменту вежі на природній основі та з влаштуванням ґрунтової подушки. Тобто в одній задачі скінченні елементи, що позначені на рис. 6 мають

характеристики ґрунтової подушки, а в іншій – природної основи.

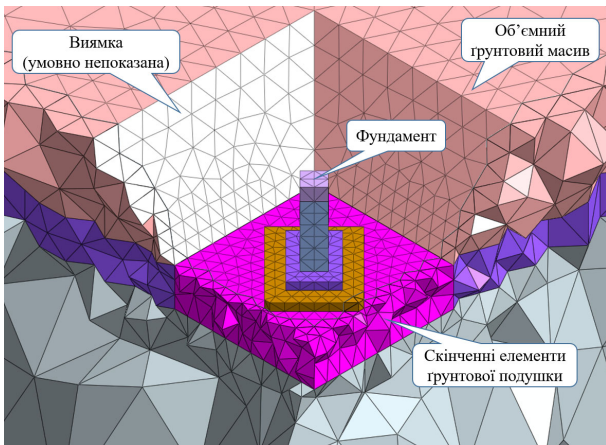


Рис.6. Фрагмент розрахункової моделі у ПК «Midas GTS NX»

Fig.6. A fragment of the calculation model in the SP "Midas GTS NX".

Дослідження виконувалось для фундаментів споруди вежі у чотирьох постановках:

- 1) фундаментні конструкції на природній основі;
- 2) фундаментні конструкції на ґрунтовій подушці потужністю 1,6 м;
- 3) фундаментні конструкції на лесовій основі з локальним замочуванням ґрунту;
- 4) фундаментні конструкції на ґрунтовій подушці з локальним водонасиченням ґрунту.

Всі постановки розрахунків в рамках дослідження використовувалась із використанням стадійності. Тобто для кожного технологічного етапу передбачалась окрема стадія розрахунку, що дозволило більш-детально дослідити напружено-деформований стан системи «ґрунтова основа – фундаментні конструкції». Розрахунки виконувались у наступній послідовності:

- 1) створення моделі ґрунтового середовища із прикладанням власної ваги ґрунту, для отримання напружень в ґрунтовому масиві;
- 2) занулення переміщень ґрунтового масиву, що викликані його власною вагою;
- 3) влаштування виймки;
- 4) влаштування залізобетонних фундаментів під опори вежі;
- 5) засипка виймки;

б) прикладання комбінації навантажень до верхнього обрізу фундаменту.

У випадку влаштування ґрунтової подушки, на стадії №3 виймка виконувалась на більшу глибину з врахуванням потужності ґрунтової подушки, а на наступній стадії моделювався процес влаштування ґрунтової подушки (назвемо її 4.1). Процес локального водонасичення основи, тобто погіршення характеристик ґрунту, моделювався в даному дослідженні перед стадією прикладання навантаження (назвемо її 5.1).

Для аналізу напруженого стану елементів системи «ґрунтова основа – фундаментні конструкції» було обрано характерні точки на рівні підшви фундаментів (рис. 7). Загальна кількість точок складає 16 шт, що є достатнім для порівняння напружень та деформацій для розглянутих варіантів фундаментів під вежу.

Напруження у ґрунтовій основі на рівні підшви фундаментів наведені на рис. 8, а ізополі вертикальних переміщень основи під підшоною фундаментів наведені на рис. 9.

Прикладання навантаження на ребро вежі та розгляд варіанту фундаментних конструкцій на природній основі створюють напруження під підшоною фундаментів, що змінюються в діапазоні від +28,03 кПа до -293,16 кПа (рис. 8-а). При цьому деформації основи під підшоною фундаменту змінюються в діапазоні від +63 мм до -45 мм (рис. 9-а).

Навантаження, що прикладено до грані вежі та розрахунок для варіанту фундаментів вежі на природній основі створюють напруження під підшоною фундаментів, що змінюються в діапазоні від +21,93 кПа до -213,93 кПа (рис. 8-б). В цьому випадку очікувані деформації основи під підшоною фундаменту за даними числового моделювання знаходяться в межах від +27 мм до -34 мм (рис. 9-б).

Проектування фундаментних конструкцій на просідаючих ґрунтах має відбуватись із урахуванням величини початкового тиску просідання  $p_{sl}$  лесового ґрунту. На глибині, що відповідає рівню підшви фундаменту (3 м)  $p_{sl}$  для дослідження було прийнято

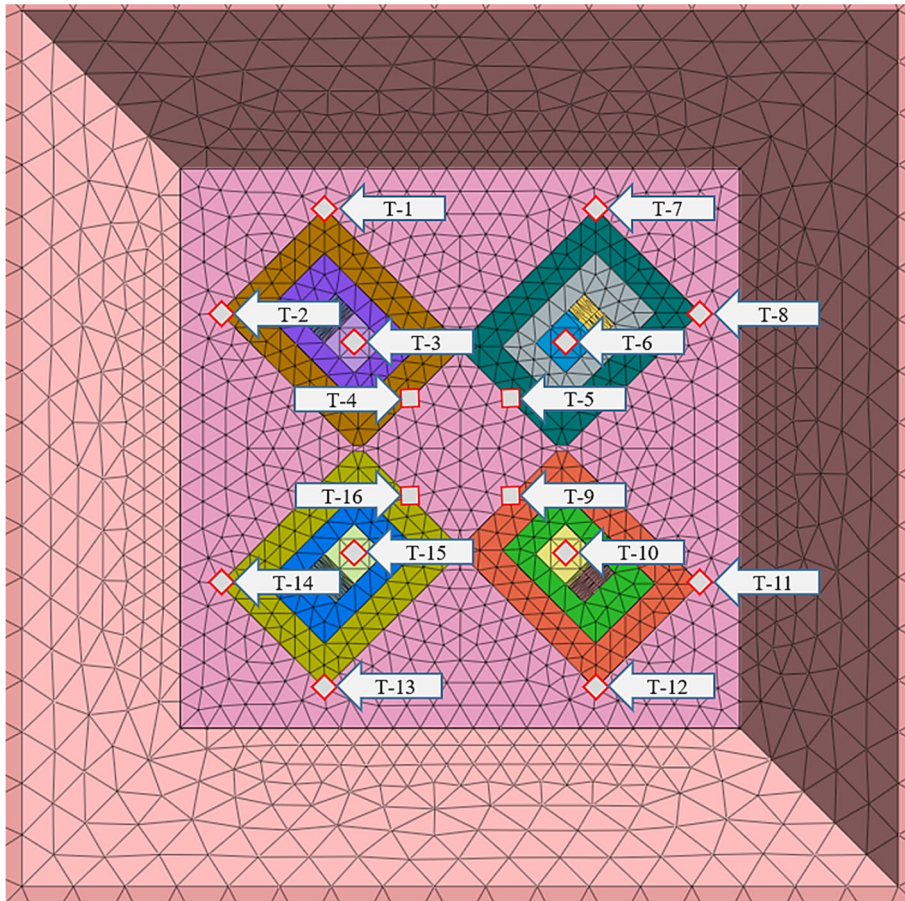
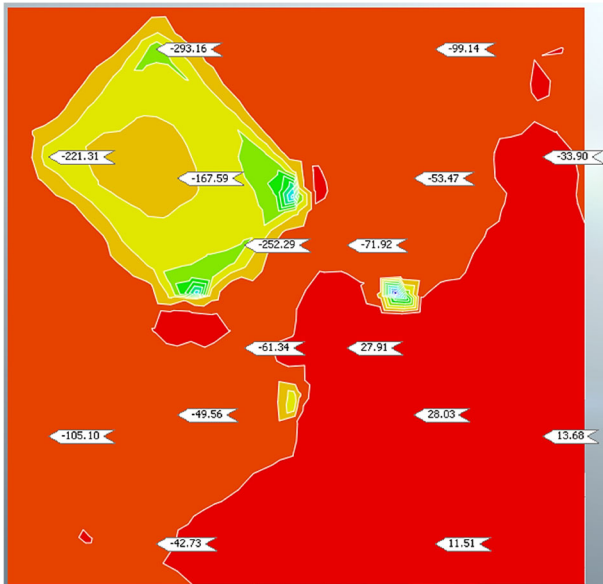


Рис.7 Характерні точки у розрахунковій моделі для аналізу НДС системи  
 Fig.7. Characteristic points in the calculation model for analyze the system stress-strain state.

a)



b)

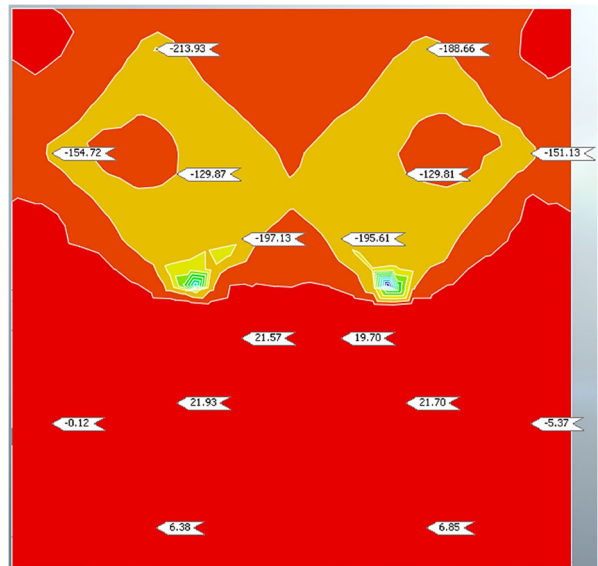


Рис.8. Напруження під подошвою фундаментів (кПа) із основою у природному стані в характерних точках : а) – вітрове навантаження прикладено на ребро вежі; б) – вітрове навантаження прикладено до грані вежі.

Fig.8. Stress under the sole of the foundations (kPa) with the foundation in its natural state at characteristic points: a) – wind load applied to the edge of the tower; b) – wind load applied to the face of the tower.

165 кПа, а на рівні низу ґрунтової подушки (4,5 м) – 175 кПа.

За результатами числового моделювання сумарні напруження на рівні підшви фундаменту склали:

а) у випадку прикладання навантаження до ребра вежі:

- в центральній зоні *найбільш навантаженого* фундаменту – 140 кПа;
- у центральній зоні підшви фундаменту, що працює *на висмикування* – 30 кПа;
- *максимальне* значення контактних напружень в цьому випадку склало 215 кПа.

б) у випадку прикладання навантаження до грані вежі:

- в центральній зоні *найбільш навантаженого* фундаменту – 110 кПа;
- у центральній зоні підшви фундаменту, що працює *на висмикування* – 5 кПа;
- *максимальне* значення контактних напружень в цьому випадку склало 205 кПа.

При врахуванні можливого локального водонасичення лесової основи під підшвою фундаменту, виникають наступні значення контактних напружень:

- в центральній зоні *найбільш навантаженого* фундаменту – 185 кПа (навантаження на ребро) та 140 кПа (навантаження на грань);
- у центральній зоні підшви фундаменту, що працює *на висмикування* – 28 кПа (навантаження на ребро) та 11 кПа (навантаження на грань);
- *максимальне* значення контактних напружень в цьому випадку склало 240 кПа та 220 кПа (навантаження на ребро та на грань відповідно).

Розглядаючи варіант проектування фундаментів вежі на *ґрунтовій подушці* очікуються наступні значення сумарних напружень на рівні низу подушки:

- а) постановка розрахунку для ґрунту в природному стані:
  - в центральній зоні *найбільш навантаженого* фундаменту – 150 кПа і 120 кПа (для навантаження на ребро вежі і на

грань відповідно);

- у центральній зоні підшви фундаменту, що працює *на висмикування* – 10 кПа і 30 кПа (навантаження на ребро та на грань) ;

- *максимальне* значення контактних напружень в цьому випадку склало 150 кПа і 130 кПа (відповідно для схем навантаження на ребро і на грань).

б) постановка розрахунку з урахуванням можливого локального замочування ґрунту:

- в центральній зоні *найбільш навантаженого* фундаменту – 170 кПа і 130 кПа (для навантаження на ребро вежі і на грань відповідно);

- у центральній зоні підшви фундаменту, що працює *на висмикування* – 10 кПа і 30 кПа (навантаження на ребро та на грань) ;

- *максимальне* значення контактних напружень в цьому випадку склало 170 кПа і 140 кПа (відповідно для схем навантаження на ребро і на грань).

Отже, з врахуванням значення початкового тиску просідання лесового ґрунту на відповідній глибині, можна зробити наступні висновки:

- варіант фундаментів вежі на природній основі не задовольняє перевірки по напруженням для розглянутих геометричних параметрів фундаментів вежі:  $\sigma = 215 \text{ кПа} > p_{sl} = 165 \text{ кПа}$  для схеми прикладання навантаження на ребро і  $\sigma = 200 \text{ кПа} > p_{sl} = 165 \text{ кПа}$  для схеми прикладання навантаження до грані вежі;
- розглянуті схеми локального водонасичення лесової основи фундаментів погіршує ситуацію:  $\sigma = 240 \text{ кПа} > p_{sl} = 165 \text{ кПа}$  для схеми прикладання навантаження на ребро і  $\sigma = 220 \text{ кПа} > p_{sl} = 165 \text{ кПа}$  для схеми прикладання навантаження до грані вежі;
- варіантне проектування фундаментів вежі на ґрунтовій подушці забезпечило виконання умов перевірки по напруженням на рівні низу ґрунтової подушки для незмінних геометричних параметрів фундаментів вежі:  $\sigma = 150 \text{ кПа} < p_{sl} =$



175 кПа для схеми прикладання навантаження на ребро і  $\sigma = 130 \text{ кПа} < p_{sl} = 175 \text{ кПа}$  для схеми прикладання навантаження до грані вежі;

- розглянуті схеми локального водонасичення ґрунтів в основі фундаментів для незмінних геометричних параметрів фундаментів вежі на ґрунтовій подушці також забезпечують виконання умов перевірки по напруженням на рівні низу ґрунтової подушки:  $\sigma = 170 \text{ кПа} < p_{sl} = 175 \text{ кПа}$  для схеми прикладання навантаження на ребро і  $\sigma = 140 \text{ кПа} < p_{sl} = 175 \text{ кПа}$  для схеми прикладання навантаження до грані вежі.

Отже, влаштування ґрунтової подушки (під подошвою фундаментів) вежі забезпечує надійну експлуатацію споруди навіть у випадку реалізації ймовірного локального водонасичення ґрунтів за найбільш невідгідною комбінацією сполучень діючих силових факторів. В цьому випадку забезпечується виконання перевірки контактних напружень

#### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХНКІВ

Щоб не перевантажувати дану роботу

однотипними картинками було прийнято рішення виконати порівняння отриманих результатів числового моделювання у аналітично-графічній формі. Виконувалось порівняння напружень та деформацій основи під подошвою фундаментів в залежності від варіанту розрахунку.

Виконувалось порівняння наступних комбінацій виконаних розрахунків:

«Комбінація А» Фундаменти на природній основі (варіант №1) із фундаментами на ґрунтовій подушці (варіант №2);

«Комбінація Б» Фундаменти на природній основі (варіант №1) із фундаментами на природній основі з врахуванням локального замочування лесової основи (варіант №3);

«Комбінація В» Фундаменти на ґрунтовій подушці (варіант №2) із фундаментами на ґрунтовій подушці для випадку локального замочування лесової основи (варіант №4);

«Комбінація Г» Фундаменти на природній основі з врахуванням локального замочування лесової основи (варіант №3) із фундаментами на ґрунтовій подушці із локальним замочуванням лесової основи (варіант №4).

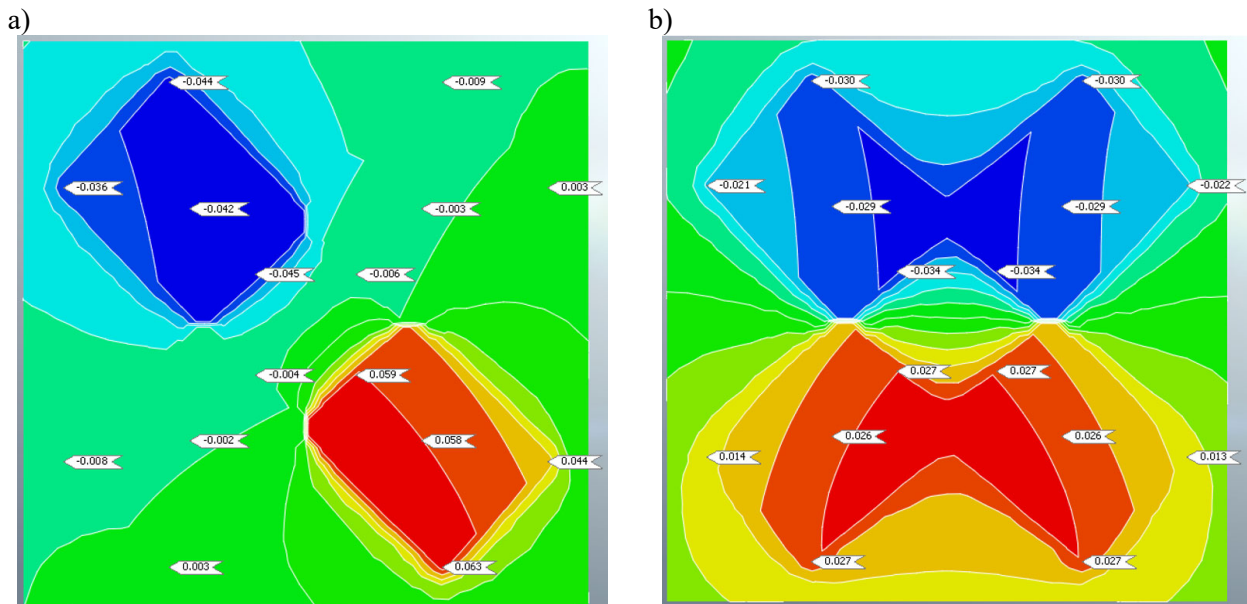


Рис.9 Деформації основи (м) під подошвою фундаментів на природній основі в характерних точках: а) – вітрове навантаження прикладено на ребро вежі; б) – вітрове навантаження прикладено до грані вежі.

Fig.9. Soil deformations at the level of the foundation base at characteristic points: a) – wind load is applied to the edge of the tower; b) – wind load is applied to the face of the tower.

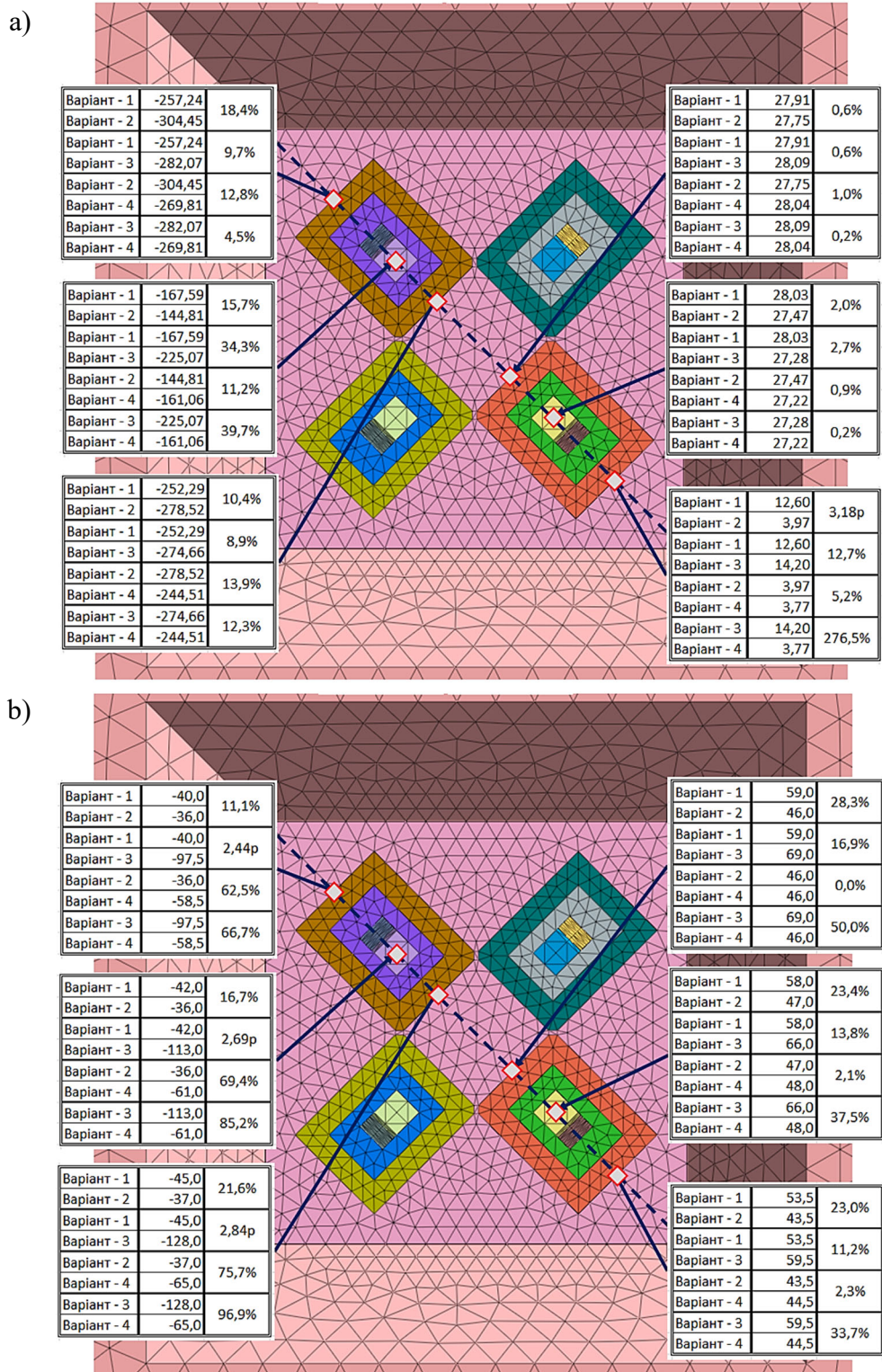


Рис.10 Напруження,  $kPa$  (a) і деформації,  $mm$  (b) на рівні підшви фундаменту при прикладанні навантаження до ребра вежі з урахуванням варіанту моделювання основи: **Варіант – 1** – фундаменти на природній основі; **Варіант – 2** – фундаменти на ґрунтовій подушці; **Варіант – 3** – локальне замочування лесової основи фундаментів на природній основі; **Варіант – 4** – локальне замочування основи фундаментів на ґрунтовій подушці.

Fig. 10 Stresses,  $kPa$  (a) i strains,  $mm$  (b) at the level of the foundation base when loads are applied to the tower edge, taking into account the base modeling option: **Option – 1** – foundations on a natural basis; **Option – 2** – foundations on a compacted sub-base; **Option – 3** – local soaking of the loess base of foundations; **Option - 4** - local soaking of the base of the foundations on a compacted sub-base.

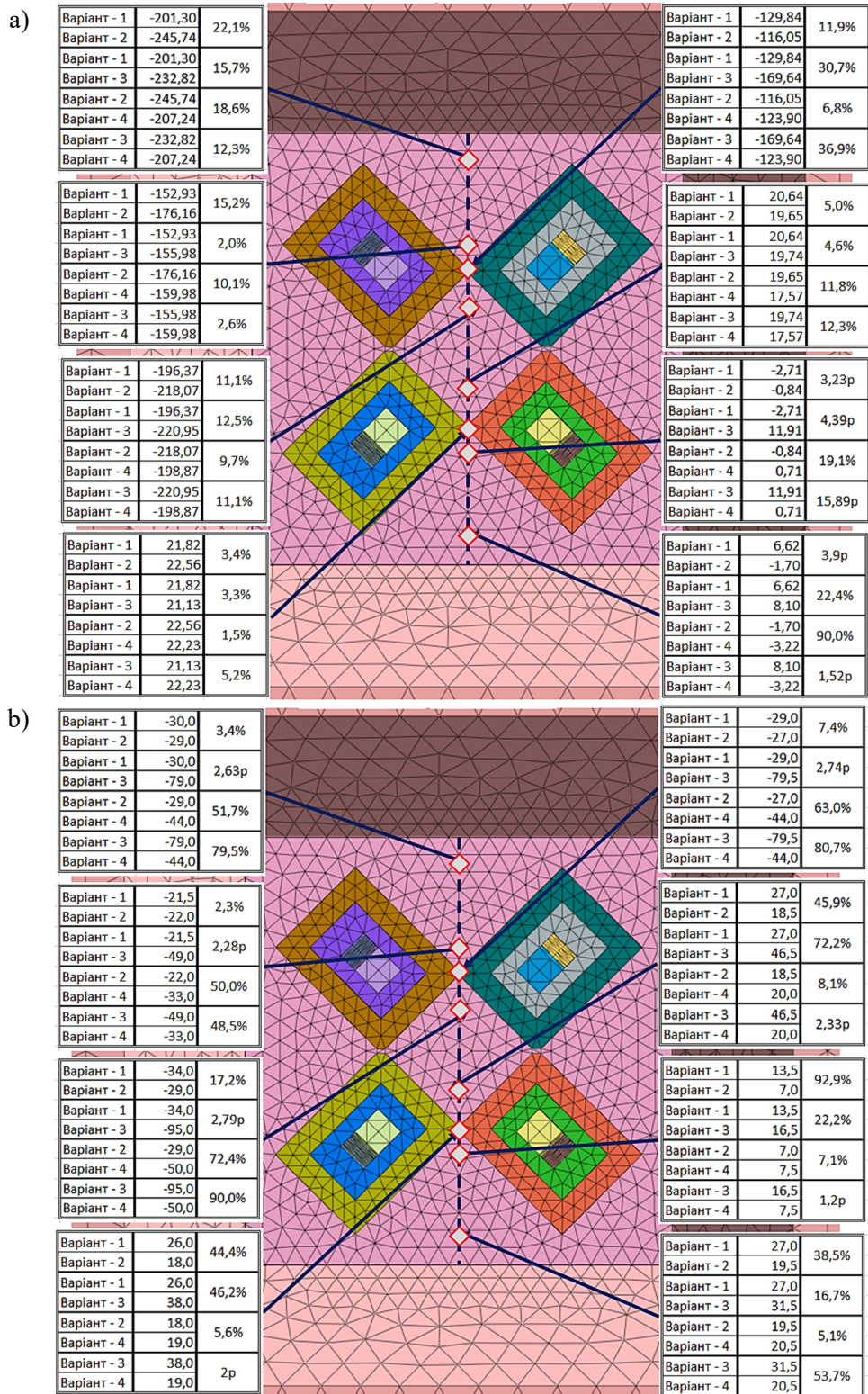


Рис. 11 Напруження,  $kPa$  (a) і деформації,  $mm$  (b) на рівні підшви фундаменту при прикладанні навантаження до грані вежі з урахуванням варіанту моделювання основи: **Варіант - 1** – фундаменти на природній основі; **Варіант - 2** – фундаменти на ґрунтовій подушці; **Варіант - 3** – локальне замочування лесової основи фундаментів на природній основі; **Варіант - 4** – локальне замочування основи фундаментів на ґрунтовій подушці.

Fig. 11 Stresses,  $kPa$  (a) і strains,  $mm$  (b) at the level of the foundation base when loads are applied to the face of the tower, taking into account the base modeling option: **Option - 1** – foundations on a natural basis; **Option - 2** – foundations on a compacted sub-base; **Option - 3** – local soaking of the loess base of foundations; **Option - 4** - local soaking of the base of the foundations on a compacted sub-base.

Порівняння напружено-деформованого стану основи на рівні подошви фундаменту, при прикладанні навантаження **на ребро вежі**, для обраних характерних точок показано на рис. 10.

а) Аналіз НДС під подошвою фундаменту, що працює в умовах «вдавлюючих» навантажень показав:

- у комбінації *A*, зафіксовано різницю в межах 15 % для напружень і 17 % для значень вертикальних переміщень;
- комбінація *B* – 18 % для напружень і 166 % для деформацій;
- комбінація *B* – 13 % (напруження) та 69 % (осідання);
- комбінація *Г* – 19 % і 83 % склали різниця напружень і деформацій відповідно.

б) В той же час, дослідження НДС під подошвою фундаменту, що працює на «відрив» від основи, показав:

- для комбінації *A* отримано, що різниця напружень знаходиться межах 73 %, а деформацій близько 25 %;
- комбінація *B* – 5 % (напруження) і 14 % (деформації);
- комбінація *B* – 2 % (різниця для напружень) і 2 % (для вертикальних переміщень);
- комбінація *Г* – 92 % і 40 % очікувана різниця для напружень і осідань відповідно.

Аналогічно, було виконано аналіз НДС основи на рівні подошви фундаменту, при прикладанні навантаження **на грань вежі** (рис. 11). Порівнюючи значення напружень і деформацій за аналогічним принципом, можна сказати, що очікувана різниця за даними числового моделювання наступна:

а) для фундаменту, що працює на вдавлювання в основу:

- для комбінації *A*, призводить до різниці напружень в межах 15 % і деформацій 8 %;
- комбінація *B* – 15 % (напруження) і 161 % (осідання);
- комбінація *B* – 11 % і 59 % для напружень і осідання відповідно;
- комбінація *Г* – 16 % для напружень і

75 % для вертикальних переміщень.

б) для фундаменту вежі, що працює на відрив:

- у комбінації *A* за даними числового моделювання різниця знаходиться межах 130 % для значень напружень і 55 % для значень осідання;
- комбінація *B* – 92 % для напружень і 39 % для деформацій;
- комбінація *B* – 31 % (напруження) і 7 % (переміщення);
- комбінація *Г* – різниця 440 % (4 рази) і 102 % для напружень і деформацій відповідно.

Дослідження різниці осідань фундаментів показало, що максимальні значення виникають у варіанті №3 (фундаменти вежі на природній основі з врахуванням локального замочування лесового ґрунту) для обох варіантів прикладання навантажень (рис. 4).

Також було виявлено, що при будь-якому варіанті моделювання основи, завжди більші величини різниці осідань виникають при прикладанні вітрового навантаження до ребра вежі, тому подальше порівняння виконаємо саме з врахуванням даного навантаження.

За даними аналізу величини різниці осідань за таким же методом, що було використано для напружень (рис. 10-а; 11-а) та деформацій (рис. 10-б; 11-б) основи на рівні подошви фундаменту можна спостерігати, що у комбінації *A* різниця буде сягати близько 23 % (більше значення у «Варіанті-1» - фундаменти на природній основі); комбінація *B* – 96 % (більше значення у «Варіанті-3» – локальне замочування лесової основи фундаментів на природній основі); комбінація *B* – 38 % (більше значення у «Варіанті-4» – локальне замочування основи фундаментів на ґрунтовій подушці); комбінація *Г* – 74 % (більше значення у «Варіанті-3» – локальне замочування лесової основи фундаментів на природній основі).

## ВИСНОВКИ

Досліджено, що застосування заходів для поліпшення показників міцності основи, що складена лесовими ґрунтами, а саме,

влаштування ґрунтової подушки дозволяє зменшити деформації основи на рівні підшви фундаменту в межах 15 % (під найбільш навантаженим фундаментом в умовах позацентрово-навантажених конструкцій вежі) в порівнянні із варіантом фундаментів на природній основі.

Показано, що деформації основи на рівні підшви фундаменту при локальному замочуванні ґрунту в зоні найбільш-завантаженого фундаменту, збільшуються у 2,5 р в порівнянні із варіантом, що враховує основу у природному стані.

Виявлено, що деформації основи на рівні підшви фундаменту із влаштованою ґрунтовою подушкою збільшуються на 60 %, при локальному замочуванні основи під найбільш навантаженим фундаментом.

Слід відмітити, що при ймовірному водонасиченні основи деформації із влаштованою ґрунтовою подушкою будуть на 75 % меншими ніж осідання фундаментів на природній основі в умовах можливого локального водонасичення ґрунту.

Варіант влаштування ґрунтової подушки під підшвою фундаментів (для незмінних геометричних параметрів фундаментів вежі), за даними числового моделювання забезпечує надійну експлуатацію споруди навіть у випадку реалізації ймовірного локального водонасичення ґрунтів за найбільш невигідною комбінацією сполучень діючих силових факторів.

В даному дослідженні не розглядався вплив жорсткості надземних конструкцій, що, безумовно, впливає на перерозподіл напружень і деформацій системи «ґрунтова основа – фундаментні конструкції». Отже, спільна робота фундаментів подібного типу споруд, з рахуванням жорсткості надземних конструкцій має досліджуватись додатково.

В даному дослідженні було змодельовано жорсткий зв'язок між вузлами основи і фундаментів, що призводило до виникнення розтягуючих зусиль на рівні підшви фундаменту в площині контактних напружень. На наступному етапі планується оволодіти функціоналом прогресивних програмних комплексів сімейства «Midas» та змодельовати взаємодію розглянутої споруди та

ґрунтового масиву з реалізацією можливості відриву підшви фундаментів від основи.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Моргун А.С. Вплив техногенного фактору 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.
2. Жук В.В. Вплив можливого водонасичення лесового ґрунту на напружено-деформований стан фундаментів багатопверхового будинку / Вероніка Жук, Ірина Павленко // *Основи і фундаменти*. – К.: КНУБА. – 2022. – Вип.44. – С. 27-43. DOI: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.44.2022.27-43>
3. Носенко В.С. Дослідження впливу жорсткості надземних конструкцій панельного будинку на напружено-деформований стан пальового фундаменту / В.С. Носенко, О.В. П'ятков, О.О. Кашоїда // *Основи і фундаменти*. – Київ: КНУБА. – 2023. – № 46. – С. 98–112. DOI: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.46.2023.98-112>
4. Корнієнко М.В. Розрахунок стовпчастих монолітних фундаментів за Європейськими нормами / М.В. Корнієнко, Т.В. Диптан, А.М. Ращенко // *Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів*. – К.: КНУБА, 2013. – 63 с.
5. Корнієнко М.В. Про розрахункові схеми визначення осідання основи в умовах лесових ґрунтів, що просідають під дією власної ваги / М.В. Корнієнко, Д.А. Карпенко // *Одеса*, 2011. – 13 с.

#### REFERENCES

1. Morhun A., Andrukhov V., Met I., (2009). Vplyv tekhnogenoho faktoruzamokannia gruntovoi osnovy na napruzhenodeformovanyi stan vysotnoi budivli [The influence of the technogenic factor of water saturation of the soil foundation on the stress-strain state of a high-rise building]. *Dorohy i mosty*. K.: Kyiv, (11), 233-238 (in Ukrainian).
2. Zhuk V., Pavlenko I., (2022). Vplyv

mozhyvoho vodonasychnennia lesovoho gruntu na napruzhenno-deformovanyi stan fundamentiv bahatopoverkhovoho budynku [The impact of possible water saturation of loess soil on the stress-strain state of the foundations of a multi-story building]. *Osnovy ta fundamenty*. K.: KNUBA, (44), 27-43 (in Ukrainian).

3. Nosenko V., Piatkov A., Kashoida O. (2023). Doslidzhennia vplyvu zhorstkosti nadzemnykh konstruktiv panelnoho budynku na napruzhenno-deformovanyi stan palovoho fundamentu [Study of the influence of the rigidity of above-ground structures of a panel house on the stress-strain state of a pile foundation]. *Osnovy ta fundamenty*. K.: KNUBA, (46), 98-112 (in Ukrainian).
4. Korniienko M., Dyptan T., Rashchenko A. (2013). Rozrakhunok stovpchastykh monolitnykh fundamentiv za Yevropeiskymy normamy [Calculation of columnar monolithic foundations according to European standards]. *Navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchyykh navchalnykh zakladiv*. K.: KNUBA, 63 (in Ukrainian).
5. Korniienko M., Karpenko D. (2011). Pro rozrakhunkovi skhemy vyznachennia osi-dannia osnovy v umovakh lesovykh gruntiv, shcho prosidaiut pid diieiu vlasnoi vahy [About calculation schemes for determining foundation settlement in conditions of loess soils that collapse under the influence of their own weight]. Odesa, 13 (in Ukrainian).

**Study of the stress-strain state of the loess soil base of an eccentrically loaded tower foundations, with taking into account the possible water saturation of the soil**

*Ostap KASHOIDA,  
Veronika ZHUK*

**Summary.** This article provides the design of the tower shallow foundations using numerical simulation in the "Midas GTS NX" software. The foundations are four separate structures that perceive the bearing reactions from the tower supports. Depending on the wind load direction, the support reactions change both quantitatively and qualitatively. So, one foundation can accept a compressive force, the other one can accept a pull-out force. In this study, two variants of wind loading

are considered: the wind load acts on the tower face or on the tower edge.

The geological conditions of the research site are taken as simplified. The soil base consists of one engineering-geological element, which is a loess soil. Numerical simulation of the soil massif was implemented by using volumetric finite elements. An elastic-plastic deformation law and a Mohr–Coulomb failure criterion were applied for these finite elements.

The design provided for the calculation of the tower foundation on a natural basis and with the arrangement of a compacted sub-base.

Research was carried out for the foundations of the tower construction in four stages: 1) soil base in its natural state; 2) arranged compacted sub-base; 3) natural basis with local water saturation of the soil; 4) compacted sub-base with local water saturation of the soil massif.

Simulation of the arrangement of the compacted sub-base occurs by replacing the stiffness of the finite element at a certain stage of the calculation. The soil water saturation simulation algorithm is performed in a similar way - there is a change in the physical and mechanical characteristics of certain finite elements. The localization of saturation zones was chosen from the conditions of the most unfavorable combinations of loads and vertical movements of the foundations.

An analysis of the stress-strain state of the soil base of foundations under the tower on a natural base and with the arrangement of a compacted sub-base was performed. The scheme of the applied load on the foundation and the possible local water saturation of the loess soil at the base of the foundations were taken into account.

**Key words.** Numerical simulation, stress-strain state, loess soil, pad foundations, compacted subbase, uneven deformations.