

Напружено-деформований стан фундаментів будинку з врахуванням можливого водонасичення лесових ґрунтів

Вероніка Жук¹, Олександр П'ятков², Сергій Тарамбула³

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,
¹zhuk.vv@knuba.edu.ua, orcid.org/ 0000-0002-1114-3192
²av.pyatkov@gmail.com, orcid.org/ 0000-0001-8797-151X
³tarambula@ukr.net

DOI: 10.32347/0475-1132.41.2020.22-31

Анотація. В Україні проблема будівництва на лесових ґрунтах є актуальною через широке поширення цих ґрунтів та їх негативну властивість - здатність давати додаткові деформації просідання при водонасиченні. Підтоплення територій ґрунтовими водами, аварійні витіки з водоносних мереж спричиняють значні проблеми під час експлуатації будівель та інженерних споруд на таких ґрунтах.

Комп'ютерна симуляція взаємодії будівлі з ґрунтовою основою дозволяє досліджувати вплив усіх негативних факторів на зміну напружено-деформованого стану як ґрунтової основи, так і несучих конструкцій будинку.

Дослідження взаємодії будівлі з основою було виконано з використанням програмного комплексу ЛРА-САПР. Досліджувалася взаємодія будинку з ґрунтовою основою, ґрунти якої здатні знижувати свої механічні властивості при збільшенні вологості та давати додаткові деформації просідання. Виконано варіантне проектування фундаментів з врахуванням виникнення нерівномірних деформацій при просіданні лесового ґрунту внаслідок його зволоження при можливих аварійних втратах із водоносних мереж. Проаналізовано зміну напружено-деформованого стану фундаментів будинку в залежності від просторової жорсткості фундаменту, місця розташування зони замочування в межах плями забудови, форми та розмірів зони зволоження лесового ґрунту.

Показано, що врахування можливого водонасичення лесових ґрунтів під час виконання розрахунків спільної роботи будівлі з ґрунтовою основою, дозволяє отримати напружено-деформований стан фундаментів та несучих конструкцій надземної частини будинку для



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



Олександр П'ятков
доцент кафедри
геотехніки
к.т.н., доц.



Сергій Тарамбула
магістр кафедри
геотехніки

найнесприятливіших умов, що можуть виникнути при аварійному витіканні із водоносних мереж. Виконано пошук оптимального варіанту фундаментних конструкцій будинку, який, залишаючись економічно ефективним, забезпечує надійну експлуатацію будинку в умовах можливого виникнення нерівномірних деформацій просідання ґрунтової основи при водонасиченні шару лесових ґрунтів.

За результатами досліджень запроєктовано раціональний варіант фундаментних конструкцій з врахуванням можливого виникнення нерівномірних деформацій.

Ключові слова. Числове моделювання, напружено-деформований стан, жорсткість фун-

даменту, внутрішні зусилля, осідання, лес, просідаючі ґрунти, замочування, пальовий фундамент.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Лесові породи вкривають значну частину території України. Це означає, що більшість будівель доводиться зводити на ґрунтах, здатних знижувати свої механічні властивості при збільшенні вологості та давати додаткові деформації просідання.

Прагнення до надійності та економічності проектних рішень об'єктів потребує обов'язкового врахування спільної роботи будівлі з ґрунтовою основою. Комп'ютерне моделювання взаємодії будівлі з ґрунтовим масивом дає можливість досліджувати вплив негативних факторів на напружено-деформований стан несучих конструкцій будинку. При цьому, можливість під час числового моделювання розглядати різні варіанти розташування зон водонасичення та їх розмірів, дозволяє виявити найнебезпечнішу комбінацію внутрішніх зусиль. Результати розрахунків взаємодії будівлі з ґрунтовою основою дають можливість обрати оптимальний варіант фундаментних конструкцій, що забезпечить надійну експлуатацію будинку в умовах нерівномірних деформацій внаслідок можливого водонасичення лесових ґрунтів техногенними водами і одночасно буде економічно ефективним.

Було виконано дослідження впливу нерівномірних деформацій внаслідок можливого водонасичення лесового ґрунту на напружено-деформований стан фундаментних конструкцій.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Напружено-деформований стан фундаментних конструкцій при можливому водонасиченні лесових ґрунтів буде залежати від жорсткості надземної частини, власної жорсткості фундаменту, властивостей ґрунтової основи, розташування зон водонасичення в межах плями забудови, форми та розмірів зон замочування лесового ґрунту.

Дослідження впливу всіх факторів є можливим при використанні числового моделювання спільної роботи всіх елементів системи «основа – фундамент – надземна частина будинку» з врахування можливого замочування лесових ґрунтів [1, 2].

Точність виконання розрахунків, відповідність результатів натурним показникам напряму залежить від можливостей розрахункового комплексу, моделі ґрунтового середовища, коректності скінчено-елементної моделі та постановок задач, параметрів різних середовищ, що є вихідними даними для розрахунку [1, 3]. Вдосконалення існуючих моделей та розробка нових, розширення можливостей розрахункових комплексів – все це є актуальними питаннями, що активно розробляються сьогодні для підвищення точності моделювання взаємодії ґрунтового середовища з фундаментними конструкціями при виконання геотехнічних розрахунків [4]. Врахування особливостей поведінки ґрунтової основи під час просідання лесового ґрунту при підвищенні вологості є важливим елементом проектування фундаментних конструкцій будівель, що зводяться в умовах можливого виникнення нерівномірних деформацій просідання ґрунтів [1].

МЕТА РОБОТИ

Метою виконаного дослідження є вибір раціонального варіанту фундаментних конструкцій будинку в умовах нерівномірних деформацій ґрунтової основи внаслідок можливого водонасичення лесових ґрунтів.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для пошуку оптимального варіанту фундаментних конструкцій, який, будучи економічно ефективним, забезпечує надійну експлуатацію будинку в умовах можливого виникнення нерівномірних деформацій ґрунтової основи при водонасиченні лесових ґрунтів, розглядалися наступні задачі:

- визначення схем можливого водонасичення лесового ґрунту основи, що будуть спричиняти найбільші нерів-

З метою пошуку оптимального варіанту фундаментних конструкцій було виконано варіантне проектування фундаментів (рис.3) з врахуванням водонасичення лесового ґрунту при можливому аварійному витіканні з водонесучих мереж. При цьому було виконано дослідження впливу просторової жорсткості фундаменту: розглядалися пальові фундаменти з окремими ростверками, у вигляді перехресних стрічок, з суцільним плитним ростверком.



Рис.3 Варіантне проектування фундаментних конструкцій
Fig.3 Variant design of the foundation structures

Для кожного варіанту було виконано розрахунок для ґрунтової основи у природному стані та для можливого техногенного водонасичення лесового ґрунту

Вибір схем можливого водонасичення лесових ґрунтів (рис.4) було виконано із умов виникнення найнесприятливішого

характеру деформування фундаментних конструкцій будинку, виникнення нерівномірних деформацій. Було розглянуто варіанти точкового, лінійного та площинного замочування лесового ґрунту.

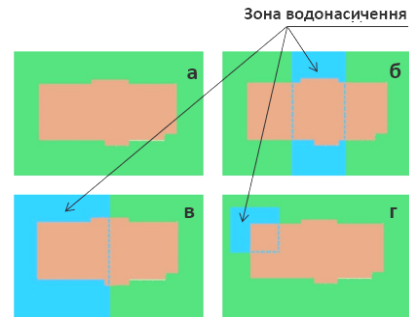


Рис.4 Схеми замочування лесового ґрунту
Fig.4 Schemes of loess soil water saturation

Варіанти схем водонасичення обиралися як найнесприятливіші за наслідками – під центром будинку, під його половиною та під одним із його кутів. Для дослідження впливу деформацій просідання на зміну напружено-деформованого стану фундаментних конструкцій було виділено характерні зони (рис.5), для яких виконувалося порівняння результатів розрахунків.

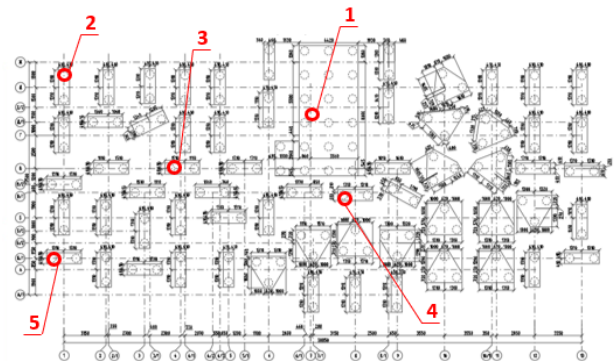


Рис.5 Характерні зони для аналізу результатів
Fig.5 Selected areas for results analysis

За результатами числового моделювання спільної роботи будинку з ґрунтовим масивом отримано:

- для варіанту пальових фундаментів з окремими ростверками осідання знаходиться в діапазоні 14...17 мм (рис.6). При цьому величина згинальних моментів у ростверках коливається від -13тм/м до 18 тм/м, а навантаження на оголовки паль знаходиться в діапазоні 34...67 т.

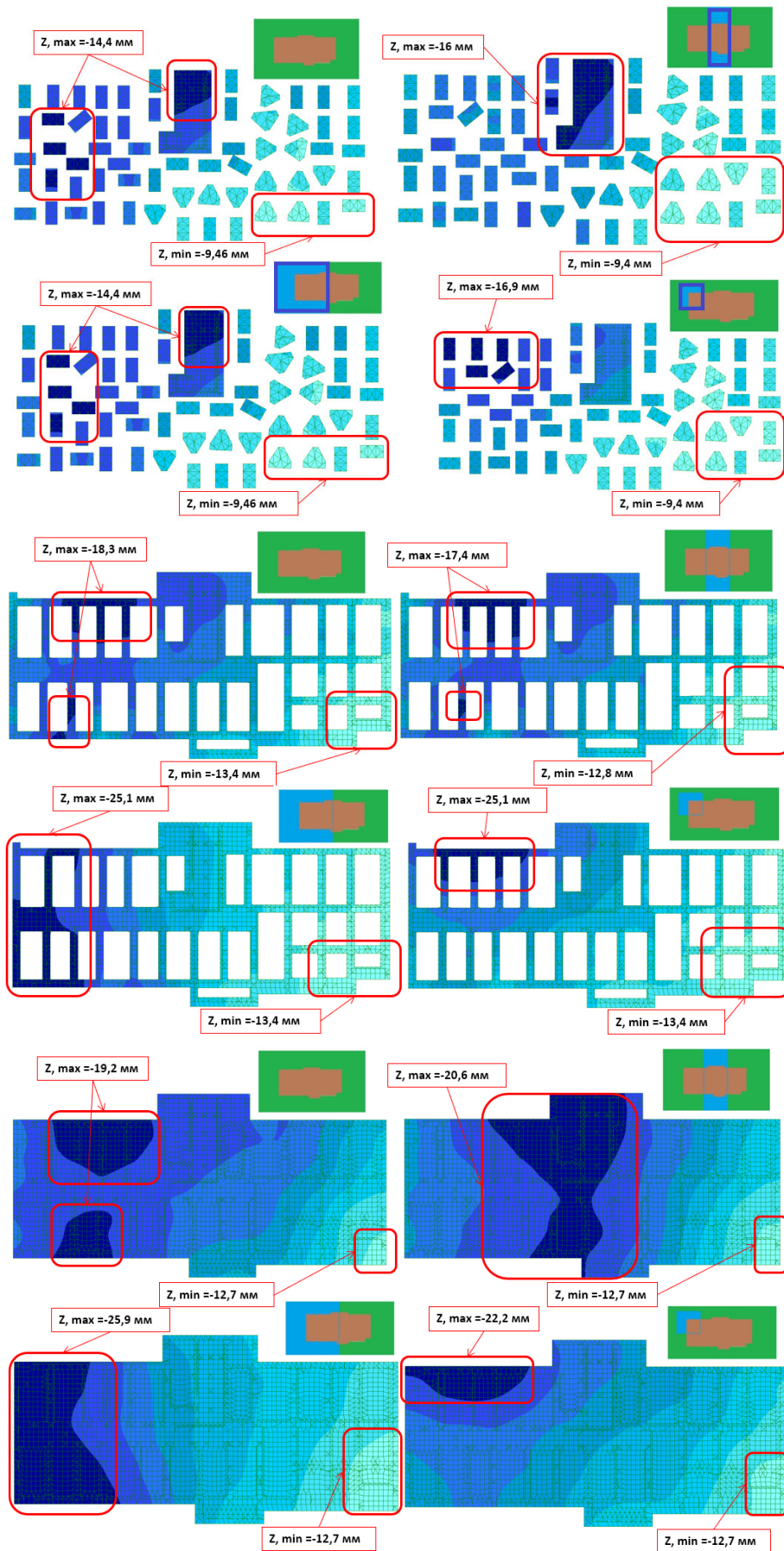


Рис.6. Осідання ростверків пальових фундаментів будинку.
Fig.6.Settlement of pile caps.

- для варіанту пальових фундаментів з стрічковими ростверками осідання фундаментів очікується в діапазоні 13...25 мм, згинальні моменти у ростверках за результатами розрахунків коливаються від -47тм/м до 52 тм/м, а навантаження на оголовки паль при цьому знаходяться в діапазоні 34...78 т.
- для варіанту пальових фундаментів з плитним ростверком осідання пальових фундаментів очікується в діапазоні 13...26 мм, згинальні моменти у плитному ростверку знаходяться в діапазоні від -39тм/м до 24 тм/м, а навантаження на оголовки паль при цьому знаходяться в діапазоні 58...87 т.

Дослідження впливу можливого замочування лесового шару ґрунту на величину деформацій осідання ростверку у порівнянні з варіантом ґрунтових умов у природному стані для контрольних зон у ростверках наведено на рис.7. Перерозподіл зусиль у ростверках пальових фундаментів будинку при можливому водонасиченні лесового ґрунту для контрольних зон приведено на рис 8,9.

Аналіз результатів впливу можливого замочування лесового ґрунту для варіанту фундаментів з окремими ростверками показав, що при лінійному замочуванні під центральною частиною будинку осідання в цій зоні зросло до 13% (рис.7), а згинальні моменти M_x у ростверках (рис. 8) в зоні центру сховодово-ліфтової шахти збільшилися на 50%.

Для варіанту стрічкових ростверків зафіксовано збільшення величини згинальних моментів M_x (рис. 9) під центром лівого крила у 2,5 рази при площинному водонасиченні. При цьому величина M_u збільшується у 3 рази під центральною частиною будинку.

Для варіанту плитних ростверків очікується збільшення величини згинальних моментів M_u (рис. 8) під центром лівого крила до 4 разів при можливому площинному зволоженні ,при цьому до 3 разів збільшу-

ється величина M_x (рис. 9) в зоні центру будинку.

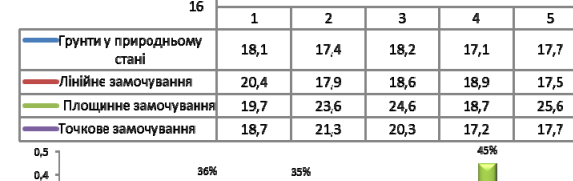
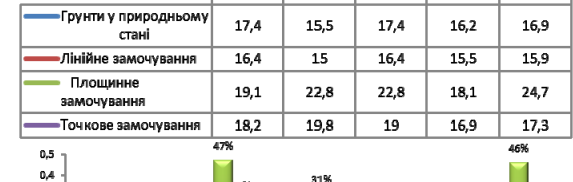
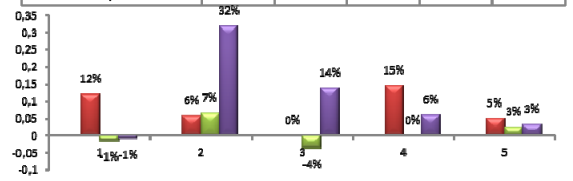


Рис.7 Осідання ростверків в контрольних зонах
Fig.7 Settlement of pile caps in control areas

Табл. 1. Фізичні характеристики ґрунтів
Table 1. Physical characteristics of soils

Номер ІГЕ	Найменування згідно ДСТУ Б В 2.1-2-96	Нормативні значення											Розрахункові значення					
		Природня вологість, ч.о.	Число пластичності, ч.о.	Межа розкошування, ч.о.	Показник консистенції, ч.о.	Коефіцієнт пористості, ч.о.	Коефіцієнт водонасичення, ч.о.	Модуль деформації, МПа	Щільність ґрунту, т/м³	Питоме зчеплення, кПа	Кут внутрішнього тертя, град.	Коефіцієнт фільтрації, м/добу	Щільність ґрунту при $\alpha = 0,85$, т/м³	Щільність ґрунту при $\alpha = 0,95$, т/м³	Питоме зчеплення при $\alpha = 0,85$, кПа	Питоме зчеплення при $\alpha = 0,95$, кПа	Кут внутрішнього тертя $\alpha = 0,85$, град.	Кут внутрішнього тертя $\alpha = 0,95$, град.
		ω	I_p	ω_L	I_c	e	S_v	E	ρ	C	ϕ	K_f	$\rho_{0,85}$	$\rho_{0,95}$	$C_{0,85}$	$C_{0,95}$	$\phi_{0,85}$	$\phi_{0,95}$
1	ґрунтово-рослинний шар - сугісок							1,75				1,74	1,70					
2	Сугісок лесовидний, пилуватий, просідний, твердий	0,124 0,309	0,05	0,16	<0	0,786 0,816	0,42	15 12	1,68 1,93	18 12	24 22	0,6	1,67 1,92	1,66 1,87	18 12	14 8	24 21	22 20
3	Пісок пилуватий середньої щільності, малого ступеню водонасичення	0,049	-	-	-	0,701	0,19	25	1,64	6	29	2-3	1,64	1,62	5	4	29	27
4	Сугісок піщанистий, твердий	0,102 0,265	0,04	0,15	<0	0,672 0,690	0,41	14 10	1,76 2,00	14 10	26 23	0,7	1,74 1,92	1,73 1,87	14 10	12 8	26 23	24 19
5	Сугісок піщанистий, комкуватий, пластичний	0,126 0,250	0,05	0,13	0,12	0,608 0,638	0,55	20 15	1,87 2,04	23 18	27 25	0,5	1,86 2,04	1,85 1,02	21 18	18 15	26 24	24 22
6	Пісок дрібний, щільний, малого ступеню водонасичення	0,051	-	-	-	0,556	-	38	1,80	5	32	3-4	1,80	1,77	5	4	32	30

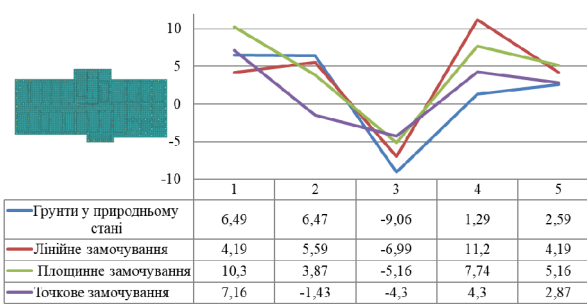
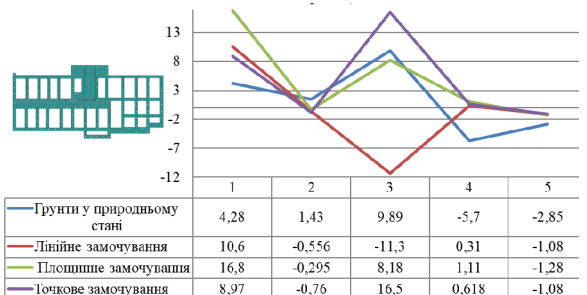
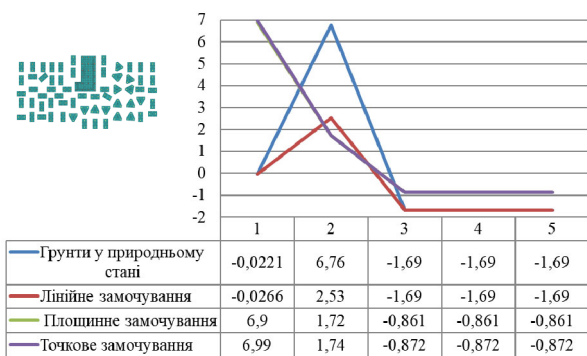


Рис.8 Mu у ростверках в контрольних зонах
Fig.8 Mu in pile caps in control areas

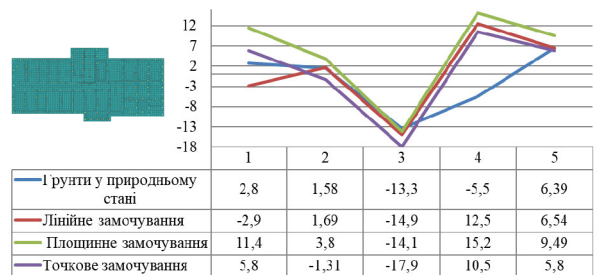
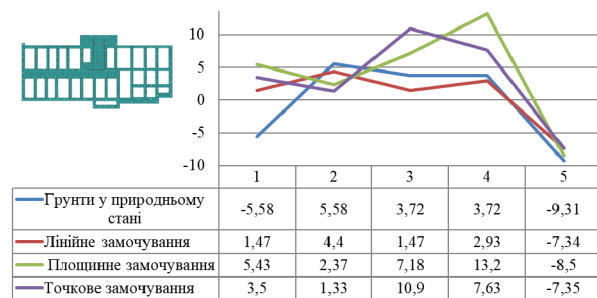
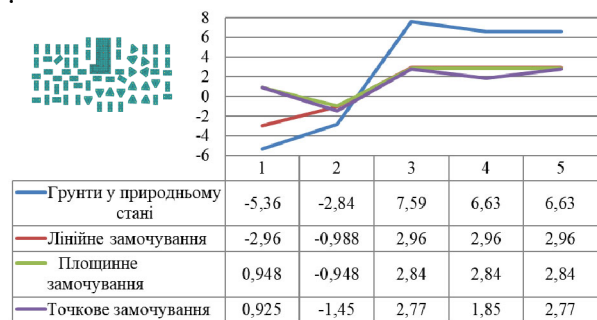


Рис.9 Mx у ростверках в контрольних зонах
Fig.9 Mx in pile caps in control areas

Перерозподіл навантажень на оголовки палі для контрольних зон при можливому водонасиченні лесового шару ґрунту наведено на рис.10. Очікується за результатами числового моделювання, що приріст навантаження на палі на границях зони водонасичення лесового ґрунту складає до 10%.

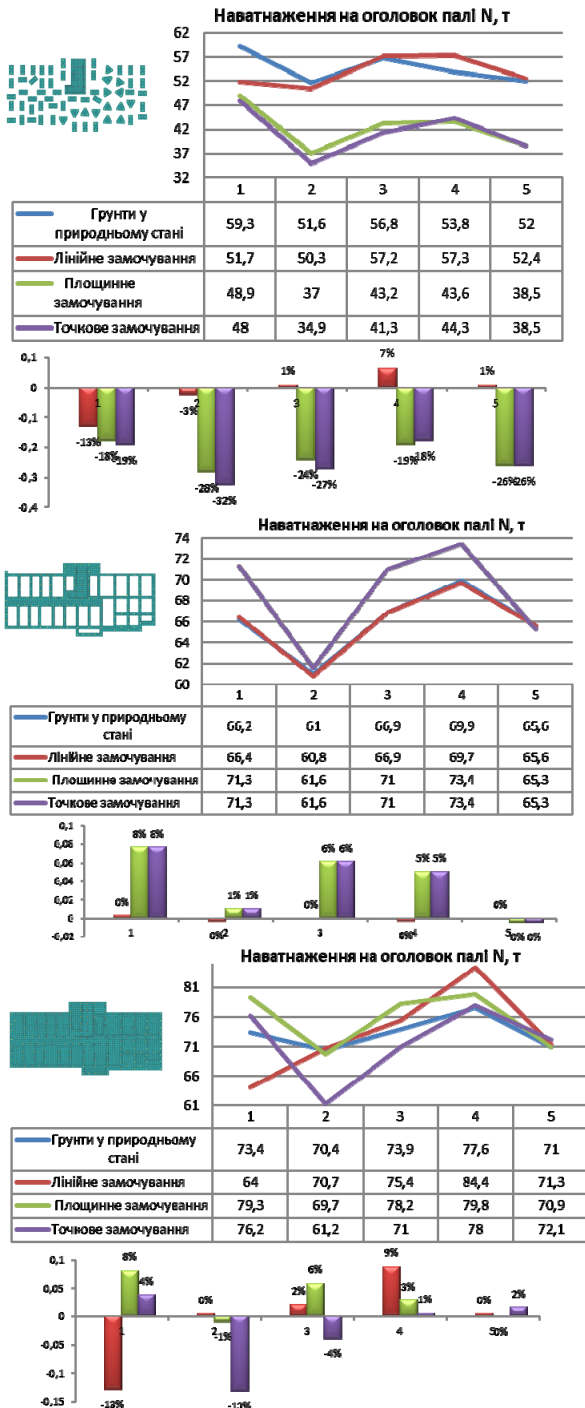


Рис.10 Навантаження на оголовки палі в контрольних зонах

Fig.10 Load on pile heads in control areas

Отже, врахування можливого водонаси-

чення лесових ґрунтів дозволяє отримати напружено-деформований стан фундаментів та несучих конструкцій надземної частини будинку для найнесприятливіших умов, що можуть виникнути внаслідок нерівномірних деформацій при аварійному витіканні із водонесучих мереж.

Комп'ютерне моделювання спільної роботи будинку з ґрунтовим масивом з врахуванням можливих схем замочування лесового ґрунту внаслідок аварійних втрат з водонесних мереж дозволяє виконати пошук оптимального варіанту фундаментних конструкцій будинку, який, залишаючись економічно ефективним, забезпечує надійну експлуатацію будинку в умовах можливого виникнення нерівномірних деформацій ґрунтової основи при водонасиченні.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

- Підтверджено за результатами числового моделювання, що напружено-деформований стан фундаментних конструкцій при можливому водонасиченні лесових ґрунтів залежить від жорсткості надземної частини, власної жорсткості фундаменту, властивостей ґрунтової основи, місця розташування зони водонасичення в межах плями забудови, форми та розмірів зони зволоження лесового ґрунту.
- Досліджено вплив місця розташування зон можливого замочування лесового ґрунту в межах плями забудови, при цьому їх розташування вибиралося як найнесприятливіше за наслідками: під центральною частиною будинку (викликає прогин), під крилом будинку (викликає вигин), під одним із кутів будинку (викликає скручування).
- Досліджено вплив розмірів і форми зон можливого водонасичення лесового ґрунту техногенними водами на прикладі наступних схем замочування: точкове (від локального замочування), лінійне (від аварійних втрат з лінійного джерела), площинне (від масштабних втрат з великим розповсюдженням волиги).

- Підтверджено, що зона максимальних деформацій фундаментів переміщується в бік до місця розташування зони водонасичення, що відповідно викликає перерозподіл згинальних моментів у ростверках та навантажень на палі. Очікуваний приріст деформацій складає 15...50% (при водонасиченні під центром будинку та під лівим крилом будинку відповідно).
- Встановлено, що перерозподіл згинальних моментів у ростверках в основному не перевищує 5%, але з'являються зони де відбувається зміна знаку на протилежний. При цьому для ділянок, що відповідають границям зони водонасичення лесового ґрунту, зафіксовано збільшення величини M_x та M_y до 2,5...4 разів.
- Отримано за результатами числового моделювання, що приріст навантаження на палі на границях зони водонасичення лесового ґрунту складає до 10%.
- Досліджено вплив просторової жорсткості фундаментів на напружено-деформований стан фундаментних конструкцій при можливому водонасиченні лесового ґрунту. При цьому, було розглянуто пальові фундаменти з окремими ростверками, у вигляді перехресних стрічок та з суцільним плитним ростверком.
- Встановлено, що зі збільшенням жорсткості фундаментів зростають внутрішні зусилля у ростверках на 10...15%. Очікується незначний приріст величини осідання фундаменту до 5 мм за рахунок збільшення ваги фундаментних конструкцій (при порівнянні окремих ростверків з плитним). За результатами аналізу отриманих даних за основний варіант було обрано пальові фундаменти з окремими ростверками.
- Показано, що врахування можливого водонасичення лесових ґрунтів дозволяє отримати напружено-деформований стан фундаментів та несучих конструкцій надземної частини будинку для найнесприятливіших умов, що можуть виникнути при ава-

рійному витіканні із водонесучих мереж.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zotsenko N.L. Long-term settlement of buildings erected on driven cast-in-situ piles in loess soil / N.L.Zotsenko, Y.L.Vinnikov // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016. - 3(53): 189 – 195.
2. Жук В.В. Методика моделювання спільної роботи каркасної будівлі з лесовою просідаючою основою / В.В.Жук, В.О.Сахаров, М.В.Корнієнко // Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.:КНУБА – 2006. – Вип. 30. – С. 39 – 46.
3. Жук В.В. Реалізація методики дослідження характеру взаємодії каркасних будівель з нерівномірно просідаючою лесовою основою / В.В.Жук, М.В.Корнієнко // Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник. –К.:КНУБА – 2013. – Вип. 33. - С. 23-30.
4. Жук В. В. Про покращення розрахункових схем каркасних будівель на просідаючих ґрунтах / В. В. Жук, М. В. Корнієнко // Світ геотехніки. - 2013. - № 2. - С. 4-7.

REFERENCES

1. Zotsenko N.L. Long-term settlement of buildings erected on driven cast-in-situ piles in loess soil / N.L.Zotsenko, Y.L.Vinnikov // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016. - 3(53): 189 – 195. (in English)
2. Zhuk V.V. Metodyka modelivannia spilnoi roboty karkasnoi budivli z lesovoiu prosidaiuchoiu osnovoiu / V.V.Zhuk, V.O.Sakharov, M.V.Korniienko // Osnovy i fundamenti: Mizhvidomchyi naukovotekhnichniy zbirnyk. –K.:KNUBA – 2006 (30): 39 – 46. (in Ukrainian)
3. Zhuk V.V. Realizatsiia metodyky doslidzhennia kharakteru vzaiemodii karkasnykh budivel z nerivnomirno prosidaiuchoiu lesovoiu osnovoiu / V.V.Zhuk, M.V.Korniienko // Osnovy i fundamenti: Mizhvidomchyi naukovotekhnichniy zbirnyk. –K.:KNUBA – 2013(33): 23-30. (in Ukrainian)
4. Zhuk V.V. Pro pokrashchennia rozrakhunkovykh skhem karkasnykh budivel na prosidaiuchykh hruntakh /V.V.Zhuk, M.V.Korniienko // Svit heotekhniky. – 2013(2): 4-7. (in Ukrainian)

**Stress-strain state of the building foundations
with taking into account the possible
water saturation of loess soils**

*Veronika Zhuk,
Oleksandr Piatkov,
Sergiy Tarambula*

Summary. In Ukraine, the problem of construction on loess soils is relevant due to the widespread use of these soils and their negative property - the ability to give additional deformations of subsidence during water saturation. Flooding of territories by groundwater, emergency leaks from aquifers cause significant problems during the exploitation of buildings and engineering structures on such soils.

Computer simulation of the interaction of the building with the soil base allows to investigate the influence of all negative factors on the change of the stress-strain state of both the soil base and the load-bearing structures of the building.

The study of the interaction of the building with the foundation was performed using the software package LIRA-CAD. The interaction of the building with the soil base, the soils of which are able to reduce their mechanical properties with increasing humidity and give additional subsidence deformations, was studied. A variant design of the foun-

dations was performed taking into account the occurrence of uneven deformations during subsidence of the loess soil due to its moistening in case of possible emergency losses from aquifers. The change of stress-strain state of the foundations of the building depending on the spatial rigidity of the foundation, the location of the soaking zone within the building spot, the shape and size of the zone of soil moisture is analyzed.

It is shown that taking into account the possible water saturation of loess soils when calculating the collaborate of the building with the soil base, allows to obtain stress-strain state of foundations and load-bearing structures of the aboveground part of the building for the most unfavorable conditions that may occur. The search for the optimal variant of the foundation structures of the building, which, while remaining cost-effective, provides reliable operation of the building in conditions of possible occurrence of uneven deformations of subsidence of the soil base during water saturation of the layer of loess soils.

According to the research results, a rational variant of the foundation structures has been designed taking into account the possible occurrence of non-uniform deformations.

Key words. Numerical simulation, stress-strain state, foundation rigidity, efforts, settlement, loess, collapsible soils, saturation, pile foundation.