

Взаємодія несучих конструкцій будинку з палевою основою.

Ігор Бойко¹, Володимир Сахаров², Олександр Литвин³

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,

¹boyko40@ukr.net, orcid.org/0000-0002-6841-0271,

²vladland@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9381-3283,

³sasha32582@gmail.com, orcid.org/0000-0002-2818-3457

DOI: 10.32347/0475-1132.40.2020.21-27

Анотація. У даній роботі представлені результати дослідження проектних рішень конструкцій багатоповерхової будівлі з обпиранням крайніх вертикальних несучих елементів каркасу на палі підпірної стіни. Дослідження виконані на базі чисельного моделювання у тривимірній постановці для елементів системи «грунтова основа – фундамент – надземні конструкції» при статичних навантаженнях. Проведено аналіз напружено-деформованого стану (НДС) в елементах каркасу при таких конструктивних рішеннях. Виявлені зони концентрації напружень, в яких можуть виникати незворотні деформації при розрахункових навантаженнях.

Встановлено, що незважаючи на те що за рахунок зміни конструктивної схеми фундаменту вдалося досягти відносної різниці осідань близької до нормативного значення та суттєвого зниження згинальних моментів в ростверку, залишилися зони в плитах перекриття кількох нижніх поверхів, де від значної різниці осідань фундаментів прогнозувалися прояви незворотних деформацій. Надані рекомендації та запропоновані зміни до конструктивної схеми будинку, які дають змогу забезпечити надійні проектні рішення на весь термін експлуатації будинку.

Ще одна особливість досліджуваної будівлі – це те, що запропоноване конструктивне рішення фундаментів з палями невеликої довжини (6,0 м). При такому рішенні відбувається змикання зон деформацій під ростверком та підшвою паль і деформації визначаються розміром споруди [1], а палі лише покращують властивості ґрунтів у верхній частині основи внаслідок її ущільнення. Таке рішення дозволяє досягти економічного ефекту за рахунок змен-



Ігор Бойко
завідувач кафедри
геотехніки
д.т.н., проф.



Володимир Сахаров
завідувач кафедри
будівельної механіки
д.т.н., проф.



Олександр Литвин
асистент кафедри
геотехніки

шення довжини паль, при цьому забезпечивши осідання будинку в межах допустимих значень.

Ключові слова. Підпірна стіна, пальовий фундамент, пальова основа, різниця осідань, перерозподіл зусиль, жорсткість будинку, деформації основи, задавлювані палі, система «грунтова основа – фундамент – надземні конструкції».

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В умовах великих міст зі значною вартістю земельних ділянок забудовники прагнуть максимально використати площі ділянки відведеної під забудову, наблизившись до існуючої забудови та зменшити витрати на влаштування фундаментів при будівництві. Особливо це актуально при наявності підпірних стін для утриманні стінок котловану. Ці фактори приводять до появи проектних рішень з розміщенням крайніх вертикальних несучих елементів каркасу новобудови на палях підпірної стіни, які об'єднуються з плитним ростверком фундаменту будівлі. В результаті утворюється складний (гібридний) фундамент з рядом паль, які відрізняються розмірами і мають вищу несучу здатність по відношенню до паль фундаменту будівлі, на які спирається решта несучого каркасу.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Якість геотехнічних проектів залежить від повноти інформації про територію, де розташований будівельний майданчик. В першу чергу це дані про нашарування ґрунтів, їх вид та стан. Важливо коректно визначити параметри ґрунтів за заданою програмою з урахуванням технології влаштування фундаментів.

Відомо [1-4], що на НДС елементів системи «основа – фундамент – надземні конструкції» суттєво впливає характер навантажень і зміна їх комбінації в період зведення та експлуатації. Ці навантаження зумовлюють зміну параметрів жорсткості несучих надземних конструкцій, які в свою чергу, формують реактивну епюру в основі під подошвою фундаментів. Такий підхід більш глибоко розкриває НДС елементів системи «основа – фундамент – надземні конструкції» і забезпечує надійність геотехнічного проекту.

МЕТА РОБОТИ

За допомогою числового імітаційного моделювання системи «основа – фундамент

– надземні конструкції» дослідити НДС каркасу будинку при розміщенні крайніх вертикальних несучих елементів каркасу новобудови на палях підпірної стіни довжиною 18,0 м, а інших конструкцій на палях, які мають інші розміри і меншу несучу здатність (жорстокість) по відношенню до паль підпірної стіни. Виявити зони концентрації напружень, в яких можуть виникати незворотні деформації та надати рекомендації щодо створення конструктивної схеми будинку, яка забезпечує надійність проектних рішень.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Досліджуваний будинок представляє собою секцію реального багатоповерхового будинку (17 поверхів) у формі прямокутника розмірами в плані 36,0 x 15,4 м з підземним поверхом на відм.-3,0 м. Конструктивна схема будівлі – монолітний залізобетонний каркас з ядрами жорсткості (стіни сходово-ліфтового вузла). Крок вертикальних елементів каркасу – нерегулярний. Пілони – перерізом 250 x 2100 мм. Ліфтові та сходові шахти – монолітні залізобетонні стіни, товщиною 250 мм. Плити перекриття товщиною 200 мм. Фундамент будівлі плитнопальовий, який складається з квадратних задавлюваних паль перерізом 350x350 мм з влаштуванням монолітного залізобетонного ростверку висотою 1,2 м. Кількість паль, яка була передбачена в першому варіанті проектних рішень, складає: задавлювані палі перерізом 350x350 мм довжиною 6,0 м - 220 шт. та буронабивні палі підпірної стіни діаметром 620мм, що включені в роботу фундаменту-15шт.

Даний будинок торцевим фасадом приймає до існуючого чотирьох поверхового цегляного будинку на стрічкових фундаментах неглибокого закладання.

Ґрунтові умови будівельного майданчика представлені у таблиці 1 та на Рис. 3.

Розташування підвального поверху новобудови нижче рівня подошви фундаментів неглибокого залягання існуючої будівлі викликало необхідність передбачити підпірну стінку з буронабивних паль діаметром

620 мм, довжиною 18,0 м. В початковому варіанті проектних рішень передбачалось що, підпірна стіна мала виконувати дві функції: утримувати ґрунт в основі під подошвою фундаментів існуючої будівлі на період розробки котловану та зведення підземної частини і слугувати опорою для вертикальних несучих елементів каркасу у торцевій частині новобудови (Рис. 1).

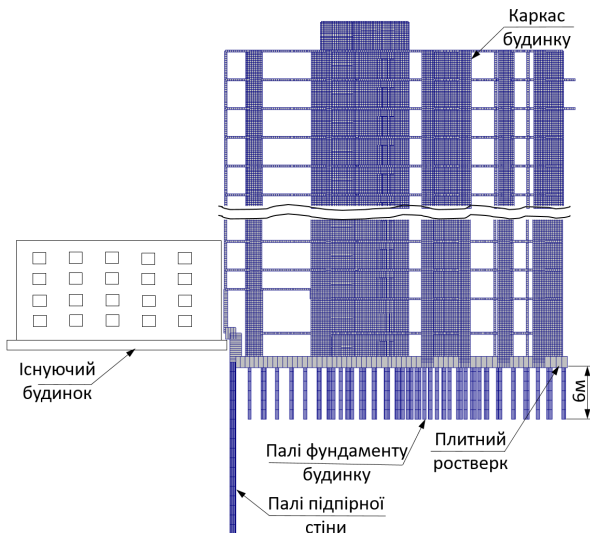


Рис.1. Схема несучого каркасу будинку з підпірною стіною.
Fig.1. Scheme of the load-bearing frame of the house with a retaining wall.

Несучим шаром підосви задавлюваних палей використаний пісок щільний дрібний (ПЕ-5). Бічна поверхня цих палей знаходиться в суглинках тугопластичних.

Дослідження НДС елементів системи «основа – фундамент – надземні конструкції» були виконані на базі чисельного моделювання у тривимірній постановці на дію статичних навантажень.

Реалізована СЕМ конструкцій будинку з елементами підпірної стіни приведена на Рис. 2. Вертикальні та горизонтальні елементи каркасу – пілони, стіни, ядра жорсткості, плити перекриття, ростверк моделювались універсальними чотирьох кутковими скінченними елементами оболонки. Палі моделювались універсальним просторовим стрижневим скінченним елементом. Для моделювання багатшарової ґрунтової основи використовувались універсальні прос-

торові шести та восьми вузлові ізопараметричні скінченні елементи. Максимально наближений до регулярного крок сітки для несучих елементів каркасу становить 0,2 м. Для зменшення кількості невідомих крок сітки для ростверку використаний 0,5 м, а для ґрунтової основи використовувався змінний від 0,5 м до 2,5 м з поступовим збільшенням по мірі віддалення від каркасу будівлі. Розміри «вирізаної» частини основи та граничні умови на обмежуючих площинах у відповідних перерізах призначались таким чином, щоб найбільш точно врахувати особливості взаємодії основи під фундаментом з оточуючим ґрунтовим масивом. Основа розглядалась як пружне багатшарове тіло у відповідності з геологічними розрізами. Створена модель налічувала 561 939 елементів, 499 415 вузлів, а загальна кількість невідомих складала 2 615 299.

Палі фундаментів будинку об'єднані ростверком з палями підпірної стіни, які відрізняються розмірами і мають вищу несучу здатність по відношенню до інших палей будинку. Несучим шаром для палей підпірної стіни є глина тверда (ПЕ-9).

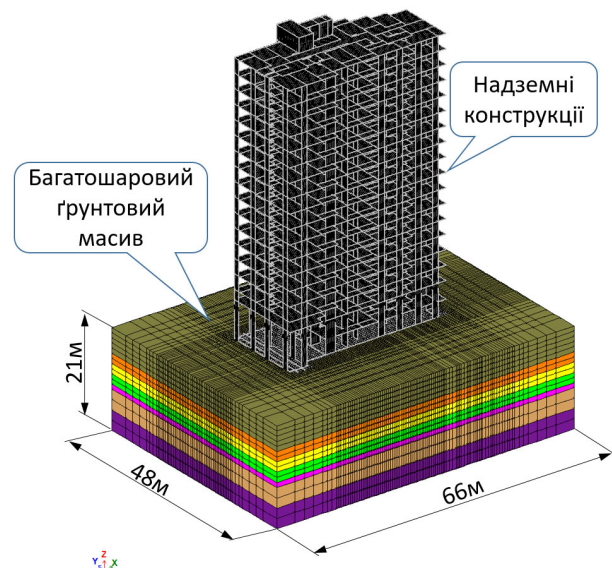


Рис.2. Скінчено-елементна модель.
Fig.2. Finite element model

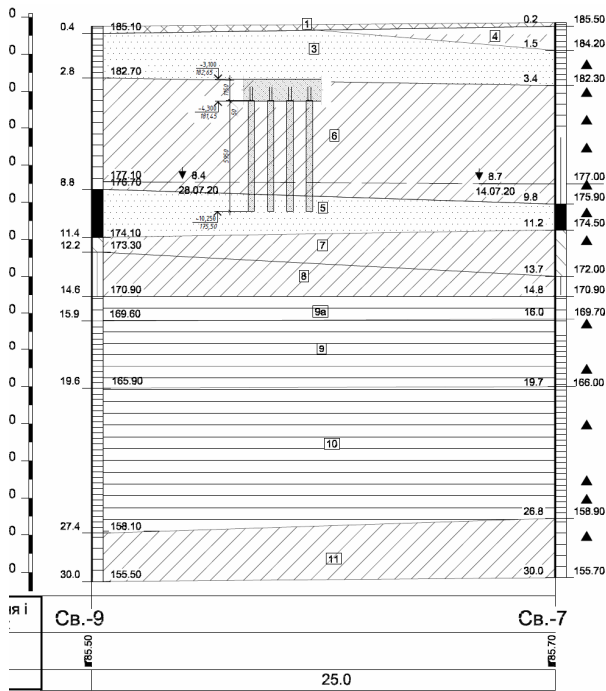


Рис.3. Ґрунтові умови.
Fig.3. Soil conditions.

Табл.1. Фізико-механічні показники ґрунтів
Table 1. Physical and mechanical properties of the soils

Номер ПГЕ	Найменування ґрунту згідно ДСТУ Б В 2.1 – 2 – 96	Нормативні значення			
		Модуль деформації, МПа	Щільність ґрунту, т/м ³	Питоме зчеплення, МПа	Кут внутр. тертя, град.
		E	ρ	c	φ
1	Насипний ґрунт		1,57		
2	Рослинний ґрунт		1,49		
3	Пісок щільний дрібний	29	1,66	0,001	30
4	Супісок твердий	14	1,74	0,022	24
6	Суглинок тугопластичний	17	2,03	0,048	13
7	Суглинок мякопластичний	11	1,96	0,021	17
8	Суглинок тугопластичний	16	1,85	0,036	19
9a	Глина напівтверда	23	1,90	0,073	12
9	Глина напівтверда	28	2,01	0,120	9
10	Глина тверда	30	2,03	0,119	12
11	Суглинок напівтвердий	25	1,97	0,050	19
12	Супісок твердий	22	1,77	0,020	25

За результатами досліджень встановлено, що максимальне осідання прогнозується в центральній частині ростверку, в зоні розташування ядра жорсткості і склало 59 мм. Далі в радіальному напрямку значення осідання зменшується до краю плити і досягає значення 13 мм. Відносна різниця осідань (Рис. 4) між рядом пілонів розташованому на підпірній стіні і наступним рядом пілонів на палевій основі склала $i=0.0044$, що більше в два рази ніж допустиме значення $i_{nor}=0.002$ (табл. А1 додаток А [4]).

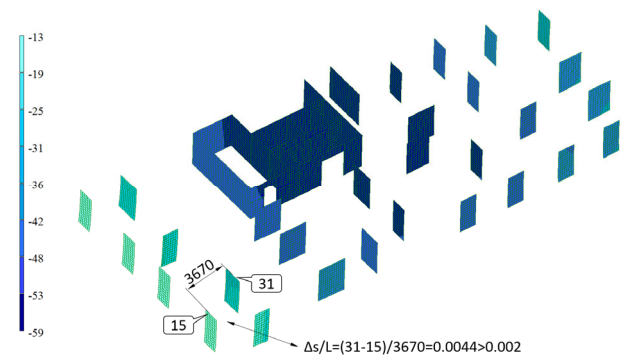


Рис.4.Ізополя осідання вертикальних елементів підвалу, (мм).
Fig.4. Isofields of displacements of vertical elements of the basement, (mm).

Отже, по умовам деформативності розглянутий початковий варіант фундаменту з опиранням частини вертикальних несучих елементів на підпірну стіну призводить до перевищення допустимих значень відносної різниці осідань конструкцій.

З метою підвищення деформативності каркасу будинку були запропоновані зміни до конструктивній схемі фундаменту, шляхом додавання залізобетонних стін в підвальній частині (Рис. 5). Таке рішення дозволяє підвищити жорсткість фундаментної частини будинку шляхом об'єднання ростверку та перекриття підвалу і утворити фундамент коробчастого типу з робочою висотою близько 3,0 м.

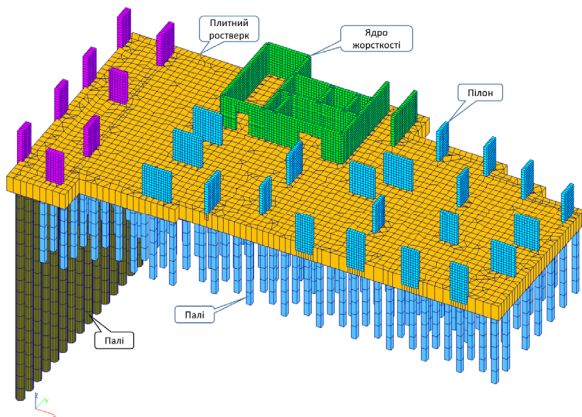


Рис.5. Фрагмент розрахункової схеми із змінами в конструктивній схемі підвалу.
Fig.5. A fragment of the calculation scheme with changes in the structural scheme of the basement.

Наступним кроком була оцінка НДС каркасу будівлі зі змінами в конструктивній схемі підвалу.

В результаті проведених досліджень з додатковими стінами в підвалі було отримано, що відносна різниця осідань фундаментної плити зменшилась майже вдвічі і склала 0.0022 . Ці конструктивні заходи також дали змогу знизити згинальні моменти в ростверку в зоні ядра жорсткості.

Також встановлено, що незважаючи на те що за рахунок зміни конструктивної схеми фундаменту вдалося досягти відносної різниці осідань близької до нормативного значення та суттєвого зниження згинальних моментів в ростверку, в надземній частині несучого каркасу залишились зони в плитах перекриття кількох нижніх поверхів, де від значної різниці осідань фундаментів прогнозувалися прояви незворотних деформацій у вигляді тріщин, тощо (Рис. 6).

Виходячи з цього, було рекомендовано будинок відділити від підпірної стіни деформаційним швом та розташувати несучий каркас на окремому фундаменті.

В ході виконання досліджень також було запропоновано зміну розташування палей та вертикальних елементів каркасу. Схема пальнової основи поля для розробленого варіанту фундаментів наведено на Рис. 7.

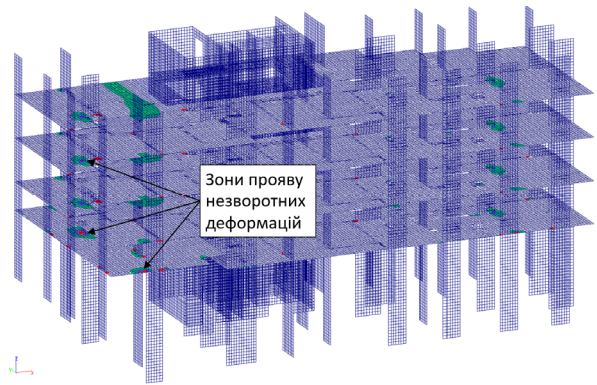


Рис.6. Зони незворотних деформацій в плитах перекриття кількох нижніх поверхів.
Fig.6. A fragment of the calculation scheme with changes in the structural scheme of the basement.

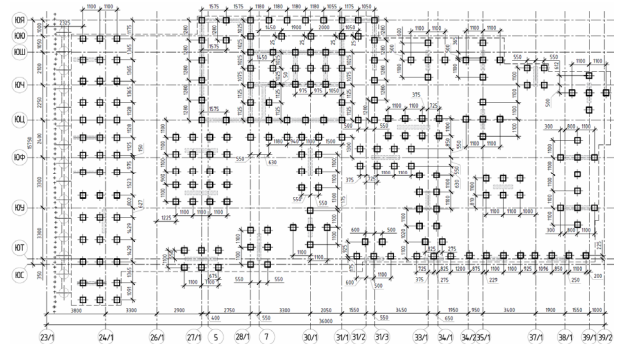


Рис.7. Схема пального поля для розробленого варіанту фундаментів.
Fig.7. Pile field scheme for the developed variant of foundations.

Також слід звернути увагу на ще один аспект передачі навантаження на основу від багатопверхового будинку через фундамент з палями невеликої довжини. Як видно з Рис. 8 вже при 15% навантаження відбувається змикання зон деформацій під ростверком та підшовою палей. В цьому випадку деформації визначаються розміром споруди [1], а палі лише покращують властивості ґрунтів у верхній частині основи внаслідок її ущільнення. Таке рішення дозволяє досягти економічного ефекту за рахунок зменшення довжини палей, при цьому забезпечивши осідання будинку в межах допустимих значень. Проведені дослідження показали, що без покращення верхніх шарів ґрунтів основи за рахунок ущільнення забивними паллями осідання перевищують допустимі значення.

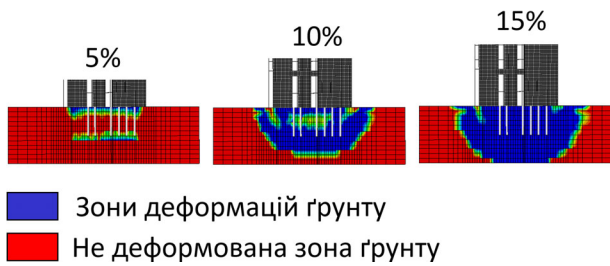


Рис.8.Схема зон деформацій ґрунту в основі.
Fig.8. Scheme of soil deformation zones at the base.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Формування НДС в елементах системи «основа – фундамент – надземні конструкції» зумовлюється послідовністю (технологією) зведення поверхів будинку, в наслідок чого зростає жорсткість конструктивних елементів та змінюється еволюція формування реактивної епюри в основі під подошвою фундаментів. На цей факт наголошувалося в публікаціях [2], [3]. Особливо при цьому слід враховувати зведення підземної частини будівлі, конструкції огороження котловану та типу фундаментів існуючих сусідніх будівель і споруд.

При варіанті розширення корисних площ над огорожуваними конструкціями котловану з'являються нові задачі розміщення пілонів в зоні підпірних стін. Для випадку обпирання пілонів на палі підпірної стіни та при наявності в цій зоні простору з габаритами проїзду пожежної техніки на два поверхи, в окремих конструктивних елементах (пілони, ростверки, перекриття) суттєво зростають згинальні моменти, які зумовлюють зони з площею арматури за $120 \text{ см}^2/\text{м}$.

В умовах прибудови при заглибленні підвального поверху нижче подошви існуючих фундаментів рекомендується передбачити захисний екран із задавлюваних паль малого діаметру для блокування напружень в стисливій зоні основи під існуючим будинком.

Для огороження котловану часто вибирають бурові палі з збіркою між ними. В деяких випадках у забудовників виникають бажання використати утримуючі конструкції підпірних стін для обпирання вертика-

льних несучих елементів каркасу. Аналіз НДС основи та надземних конструкцій при такому варіанті показав, що різна жорсткість конструкцій підпірної стіни та паль фундаменту будівлі зумовлює появу зон концентрації напружень в ростверку та плитах перекриття нижніх поверхів і відповідно в них збільшується процент армування, який перевищує традиційне значення.

З метою забезпечення надійності проектних рішень виконано розрахунки з різними розташуванням несучих елементів каркасу. Це дозволило зменшити необхідні площі арматури в півтора рази в порівнянні з варіантом обпирання пілонів на підпірну стіну та покращити роботу плит перекриттів нижніх поверхів, запобігши прояву незворотних деформацій під час експлуатації будинку.

Виявлено позитивні і негативні впливи технології вдавлювання за допомогою вантажної платформи за китайським патентом, а саме можливий динамічний удар на основу що недопустимо при прибудові. Цей факт слід досліджувати, як ударні хвилі впливають на основу існуючого будинку якщо він побудований на фундаментах неглибокого закладання.

Технологію здавлювання паль з денної поверхні, яка вища за позначку подошви ростверку, не варто рекомендувати, оскільки шарнірне з'єднання подовжувача для паль не забезпечує вертикальності її вдавлювання. До того ж потім виникає задача вибору технології розробки ґрунту, оскільки для захисту задавлених паль необхідно окремо готувати умови роботи механізмів, щоб не пошкодити ці палі. В таких умовах необхідно організовувати контроль за збереженням проектного положення її цілісності стовбура (тіла палі).

Рекомендується влаштовувати пожежний проїзд з протилежної сторони від існуючого будинку. Це дозволить покращити взаємодію каркасу нового будинку з основою і зменшити вплив на фундаменти неглибокого закладання існуючого будинку.

Виявлено той факт, що зростання навантаження на палю зумовлюється не збільшенням опору ґрунтів основи, а зміною

взаємодії палі з основою по її бічній поверхні, тобто виникає нахилений штамп замість вертикальних дотичних напружень на бічній поверхні палі.

Числове моделювання взаємодії елементів конструкції як системи «основа – фундамент – надземні конструкції» дозволяє обґрунтувати раціональне розташування палей і їх геометричні розміри (довжину, переріз), а також забезпечує контроль за розподілом зусиль в палях під пілонами і стінами ядр жорсткості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко И.П. Свайные фундаменты на нелинейно-деформируемом основании: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.02 / Бойко Игорь Петрович. – М.: НИИОСП, 1988. – 372с.
2. Сахаров А.С. Реферат программы «РОСИНКА» / А.С. Сахаров, И.П.Бойко, А.Л. Козак // *Основания, фундаменты и механика грунтов. №5.* – 1983. – с.7.
3. Сахаров А.С. Решение задач геомеханики по МКЭ с учетом развития зон предельного состояния грунта / А.С. Сахаров, И.П. Бойко, А.Л. Козак, И.А. Семенец, А.Е. Дельник // *Wizz Z.Hochsch. Archit Bauwes., Weimar,* - 1985. – С.100-102.
4. Основи та фундаменти споруд. Основні положення: ДБН В.2.1–10:2018. – [Чинний від 2019–01–01]. – К.: Мінрегіон України, 2018. – 36с.

REFERENCES

1. Boyko I.P. (1988). *Svajnye fundamenty na nelinejno-deformiruemom osnovanii* [Pile foundations on a non-linearly deformable base]. *Dys. doktora tekhn. nauk: 05.23.02.* Moscow: NIIOSP, 372 (in Russian).
2. Sakharov A.S., Boyko I.P., Kozak A.L.(1983). *Referat programmy «ROSINKA»* [Abstract of the program «ROSINKA»]. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov. №5,* p.7. (in Russian).
3. Sakharov A.S., Boyko I.P., Kozak A.L., Semenets I.A., Delnik A.E. (1985). *Resheniye zadach geomekhaniki po MKE s uchedom razvitiya zon predel'nogo sostoyaniya grunta.* [Solving geomechanics problems by FEM, taking into account the development of zones of

the limiting state of the soil]. *Wizz Z. Hochsch. Archit Bauwes, Weimar.* p.100-102.

4. *Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennya: DBN V.2.1–10:2018.* (2019) Kyiv:Minregionbud Ukrainy,36 (in Ukrainian)

Interaction of load-bearing structures of the house with a pile basis

*Igor Boyko,
Vladimir Sakharov,
Alexander Litvin*

Summary. This paper presents the results of research of design solutions of multi-story building structures with the support of the extreme vertical load-bearing elements of the frame on the piles of the retaining wall. The research is performed on the basis of numerical modeling in three-dimensional formulation for the elements of the system «soil base - foundation - above-ground structures» at static loads. The analysis of the stress-strain state (SST) in the elements of the frame with such constructive solutions is carried out. Stresses of stress concentration in which irreversible deformations may occur at design loads have been identified.

It is established that despite the fact that due to the change of the structural scheme of the foundation it was possible to achieve a relative difference of subsidence close to the normative value and a significant reduction of bending moments in the grille, there remained zones in the floor slabs manifestations of irreversible deformations were predicted. Recommendations are given and changes to the constructive scheme of the house are offered which allow to provide safe design decisions for all term of operation of the house.

Another feature of the studied building is that the proposed design of foundations with piles of short length (6 m). With this solution, the zones of deformation under the height of the pile and the sole of the piles are closed and the deformations are determined by the size of the structure [1], and the piles only improve the soil properties in the upper part of the base due to its compaction. This solution allows you to achieve an economic effect by reducing the length of the piles, while ensuring the subsidence of the house within acceptable values.

Key words. Retaining wall, pile foundation, pile base, subsidence difference, redistribution of forces, rigidity of the house, deformations of the base, crushed piles, system «soil base - foundation - above-ground structures».