

УДК 624.042.6

**ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ СПІЛЬНОЇ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ
«ГРУНТОВА ОСНОВА – ФУНДАМЕНТ – БУДІВЛЯ» В УМОВАХ БУДІВНИЦТВА
НА ПІДРОБЛЮВАНИХ ТЕРИТОРІЯХ**

*В. В. Жук, к. т. н., доц., М. В. Корнієнко, к. т. н., проф.
Київський національний університет будівництва і архітектури*

Ключові слова: *нерівномірні деформації, каркас, числове моделювання, підземні техногенні пустоти, підроблювана територія*

Постановка проблеми. Підроблювані території – найбільш поширений вид складних умов будівництва в Україні. Такими умовами будівництва характеризується територія Донбасу і Дніпропетровської області, а також Львівсько-Волинського вугільного басейну. Окрім цього вплив на існуючу забудову може створювати проходка тунелів, влаштування інших підземних комунікацій. Особливою формою підробки є і наявність катакомб – виробок що створені за рахунок видобутку будівельних матеріалів. Будівництво на підроблюваних територіях допускається за умови застосування спеціальних конструктивних заходів, що забезпечують нормальну експлуатацію будівель і споруд як під час підробки так і після неї. Для цього передбачається раціональне розташування будинків і споруд відносно мульди осідання; штучне зменшення деформацій земної поверхні шляхом повної або часткової закладки виробленого простору; застосування відповідних систем розробки, залишення запобіжних ціликів; застосування в будівлях і спорудах спеціальних конструктивних і будівельних заходів з метою зниження зусиль, що виникають в несучих конструкціях при впливі на них різних видів деформацій земної поверхні, а також для підвищення міцності несучих конструкцій. Нехтування конструктивними захисними заходами завдає збитки, які обчислюються мільйонами.

Аналіз публікацій. За останні роки, з розвитком висотного будівництва, одеські науковці, проектувальники та виробники стали серйозно вивчати будівельні властивості вапняків та їх несучу здатність. За результатами наукових досліджень підготована монографія [7], що узагальнює досвід будівництва на вапняках в м. Одесі. Прогнозування осідань і кренів фундаментів споруд можливе ще на стадії їх проектування з використанням числового моделювання. Причому його ефективність залежить від наступних факторів: адекватне визначення властивостей ґрунтів основи; створення моделі системи «ґрунтова основа – фундамент – будівля», яка найбільш повно описує реальну картину взаємодії її елементів; аналіз отриманих результатів з розробкою проектних рішень, що підвищують надійність подальшої експлуатації будівель і споруд [1]. Питання розробки моделі системи «ґрунтова основа – фундамент – будівля», яка максимально враховує наявність та вплив всіх негативних та позитивних факторів, що впливають на напружено-деформований стан елементів цієї системи, залишається актуальним.

Виділення не розв’язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Умови будівництва в Україні часто є несприятливими, бо ґрунти, що складають основу фундаментів, в більшості випадків відносяться до слабких, шаруватих, структурно нестійких або просідаючих [8]. Такі ґрунти можуть спричинити виникнення кренів або значного осідання будівель і споруд. Це підтверджує актуальність питання прогнозування проявлення ускладнюючих факторів, причому вирішення цієї задачі дає можливість покращити умови експлуатації споруд при будівництві в складних інженерно-геологічних умовах.

Однією з таких проблем є задача про врахування підземних порожнин, які можуть впливати на поведінку основи. Дана стаття не охоплює загальні проблеми підробки поверхні при видобутку вугілля та інших корисних копалин підземним способом, оскільки вони пов’язані з конкретними технологічними процесами. Головним питанням є необхідність урахування взаємного впливу будівель і споруд на забудованих територіях з порожнинами техногенного або природного походження. Це відноситься до ліній метро, підземних транспортних тунелів, технологічних приміщень, тунелів комунікацій, а також порожнин, історично сформованих на цих територіях (катакомби, підземні ходи та споруди). Карстові порожнини мають свої особливості формування підземних порожнин.

Сучасні умови вимагають підвищення надійності та безпеки експлуатації будівель і споруд.

Це може бути досягнуто при комплексному аналізі всіх можливих впливів на конструкції будівель з використанням числового моделювання.

Мета роботи. У даній роботі розглядається проблема впливу підземних порожнин техногенного походження на напружено-деформований стан будівлі і основи. Метою дослідження була якісна та кількісна оцінка взаємовпливу каркасу споруди та наявних в ґрунтовій основі підземних виробок, враховуючи випадок їх можливого руйнування.

Виклад основного матеріалу. Існуючі інженерні методи розрахунку сильно обмежують можливості врахування наявності та впливу підземних виробок на будівлю чи споруду, що проектується або вже експлуатуються. Складність таких задач пов'язана з необхідністю уточнення теоретичних положень, отриманням детальних вихідних даних, що стосуються матеріалів та навантажень, а також з проведенням трудомістких розрахунків. Такі дослідження сьогодні можна проводити тільки шляхом числового моделювання. При цьому з'являється можливість досліджувати взаємовплив будівель чи споруд з ґрунтовою основою, що послаблена порожнинами техногенного або природного походження: вплив від зведення новобудови на напружено-деформований стан основи з підземними виробками та, навпаки, зміна напружено-деформованого стану несучих конструкцій будівлі чи споруди від можливого аварійного руйнування підземних виробок.

Одеські підземні виробки (катакомби) унікальні, не схожі на жодні катакомби світу. Це рукотворні виробки, з яких добували будівельне каміння вапняк-черепашник, або «ракушняк», тому за великим рахунком їх слід було б назвати каменоломнями.

Одеса – місто, побудоване на крутих морських берегах, складених біля підніжжя 12...16-метровою товщею понтичних вапняків, перекритих червоно-бурими глинами і лесовими суглинками. Верхня частина розрізу – плитчасті, перекристалізовані вапняки, нижня – рівномірно зцементовані, більш пухкі. Саме в них і вироблені катакомби.

Одеський вапняк-ракушняк почав використовуватися людиною, як будівельний матеріал, дуже давно. В безлісній місцевості причорноморського степу України він був єдиним міцним, доступним і дешевим будівельним матеріалом. Ще стародавні поселення використовували цей будівельний матеріал для своїх споруд, видобуваючи його з природних оголень вапняків-черепашників на поверхні (в балках і по берегу моря). Підземний видобуток вапняку почався із закладкою в 1794 році Одеси, коли широко розгорнулося будівництво – спочатку порту, а потім і самого міста. Потреба в будівельному камінні зростає, розробка каміння почала різко збільшуватися, охоплюючи все нові ділянки – все далі від схилів в глибину масиву. По мірі все інтенсивнішого зростання міста підземний видобуток каміння почав набувати все більш значного розмаху: зростало число каменоломень і разом з ним і число робочих, зайнятих у цій галузі, з'явилися різні механізми, що полегшили працю каменярів. З часом повна відсутність контролю над розробкою вапняку сприяло хижацько-стихійному видобутку каміння. В результаті безконтрольності під містом та його околицями виникли підземні заплутані лабіринти. Багато ділянок на території міста виявилися настільки сильно підробленими, що стали непридатними для будівництва, на окремих ділянках почалися провали поверхні землі. В даний час довжина Одеських катакомб оцінюється приблизно в 2 500 км. Видобуток вапняку в шахтах продовжується, тому довжина одеських катакомб зростає і сьогодні [2].

Дослідження взаємовпливу елементів системи «ґрунтова основа – фундамент – будівля» проводилось на прикладі реального об'єкту – житлового комплексу (рис. 1), зведення якого планувалося на потенційно підроблюваній території в м. Одесі.

Багатоповерховий житловий комплекс з приміщеннями громадського призначення та підземним паркінгом являє собою комплекс з трьох висотних будівель, при цьому дві останні є трисекційними спорудами, що мають деформаційні шви між секціями. Кожна секція житлових будинків є багатоповерховою спорудою: два підвальні поверхи паркінгу, 23 надземних поверхів і технічне горище. Комплекс з трьох будівель об'єднує суцільний 2-поверховий підземний паркінг під всією площею комплексу (рис. 1).

Каркас будівель запроєктовано у монолітному варіанті. Фундаменти житлового комплексу стовпчасті пальові із вдавлюваних паль довжиною 13 м і перерізом 350 × 350 мм. Висота ростверків під висотною частиною складає 1,5 м, під паркінгом – 1,0 м.

Геологічна будова майданчика (рис. 2) представлена четвертинними відкладами, які підстилаються неогеновими утвореннями. Вся товща з денної поверхні перекривається техногенними насипними ґрунтами. Основні характеристики ґрунтів приведено в таблиці 1.

В безпосередній близькості від котловану однієї з будівель в шарі вапняків-ракушняків

(ІГЕ-10) зафіксовано наявність незакріплених підземних виробок (рис. 3), у яких за досвідом з часом можливе обвалення стельового склепіння. При значних масштабах руйнування це може спричинити виникнення деформацій просідання ґрунтів та провалів денної поверхні. Серед чинників можливого обвалення склепіння виробок можна назвати тиск від новобудови та динамічне навантаження (сейсмічна інтенсивність території 7 балів).

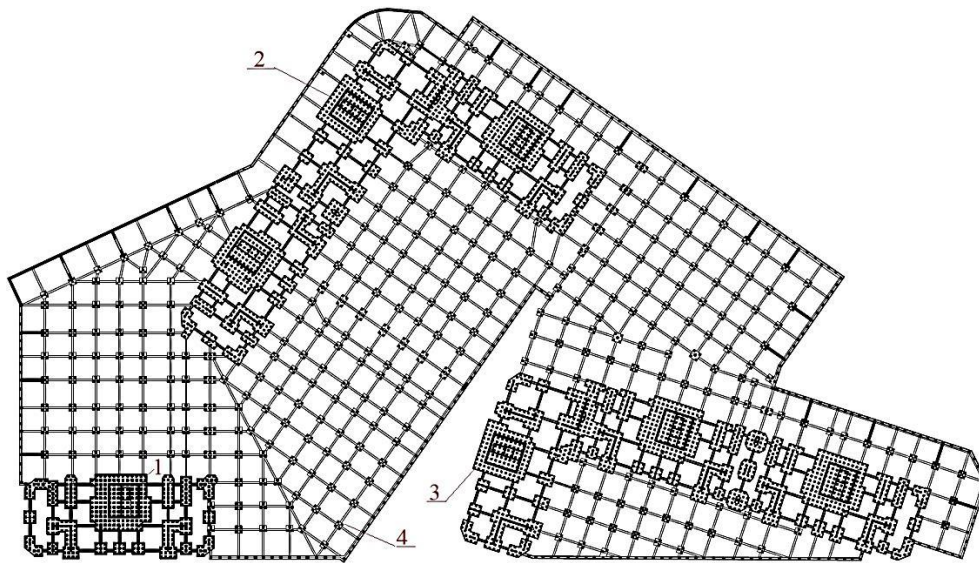


Рис. 1. План фундаментів житлового комплексу: 1, 2, 3 – фундаменти висотної частини 1-ої, 2-ої та 3-ої секції відповідно; 4 – фундаменти підземного паркінгу

В той же час надійність прогнозу обвалення виробок є низькою. Це пов'язано з недостатністю наших знань про швидкість вивітрювання вапняків (ІГЕ-10), їх неоднорідності в масиві та стану перекриваючого шару вапняків (ІГЕ-8 і ІГЕ-9) з одного боку та слабке уявлення про досвід проведення камерних розробок вапняків, як будівельного матеріалу. З точки зору розподілу гірського тиску в виробках обмежених геометричних розмірів, наявності «ціликів» як підтримуючих конструкцій, можна стверджувати, що за рахунок аркового ефекту склепіння переважаючої більшості виробок, вони є стійкими. Але наші уявлення про таку стійкість без прямих обстежень не можливі. Проте числове моделювання може дозволити виявити слабкі сторони в розвитку процесу руйнування. В зв'язку з цим, були проведені дослідження взаємовпливу будівлі і ґрунтової основи з підземними виробками з врахуванням аварійних ситуацій.

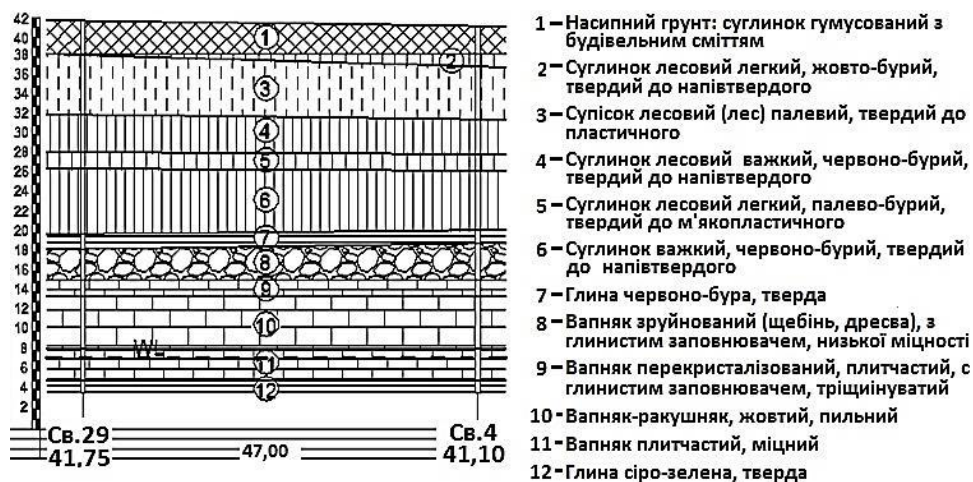


Рис. 2. Геологічні умови будівельного майданчика

Дослідження взаємовпливу підземних виробок та житлового комплексу проводилось

шляхом числового моделювання спільної роботи елементів системи «грунтова основа – фундамент – будівля» методом скінчених елементів на базі автоматизованої системи наукових досліджень «VESNA». Розрахунки по оцінці напружено-деформованого стану системи виконувались в рамках співвідношень тривимірної задачі теорії пружності. Достатність пружної моделі в розрахунках обґрунтовується прийнятою конструкцією пальових фундаментів, коли руйнування основи фундаментів явно не допустиме, а отже і розвиток пластичних деформацій є обмеженим.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості ґрунтів майданчика

Індекс генезису і вік ґрунту	№ ПГЕ	Вологість			Число пластичності	Показник текучості	Щільність		Модуль деформації	Кут внутр. тертя	Питоме зчеплення		
		w	w_L	w_P			I_p	I_L				ρ	ρ_s
		долі одиниці					т/м ³					МПа	градус
<i>t-IV</i>	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
<i>eIII_{df}-eIII_{pc}</i>	2	$\frac{0,16}{0,25}$	0,26	0,19	0,07	$\frac{<0}{0,86}$	$\frac{1,61}{1,85}$	2,7	10,0/3,0	18	8		
<i>vdIII_{bg}</i>	3	$\frac{0,22}{0,24}$	0,33	0,21	0,12	$\frac{0,08}{0,25}$	$\frac{1,78}{1,87}$	2,7	9,0/5,0	19	16		
<i>eIII_{kd}-e,edIII_{vt}</i>	4	$\frac{0,23}{0,26}$	0,28	0,2	0,08	$\frac{0,38}{0,75}$	$\frac{1,76}{1,88}$	2,7	5,0/3,5	13	10		
<i>vdIII_{dn}</i>	5	0,24	0,35	0,22	0,13	0,15	1,9	2,7	10	18	19,5		
<i>eII_{zv}</i>	6	0,21	0,36	0,22	0,14	<0	1,9	2,7	15	20	25		
<i>e,edN²</i>	7	0,24	0,46	0,26	0,2	<0	1,9	2,7	15	18	35		
<i>N¹p</i>	8	-	-	-	-	-	-	-	$R_c \approx 0,3 - 0,4$ МПа				
<i>N¹p</i>	9	-	-	-	-	-	-	-	$R_c \approx 0,8 - 1,0$ МПа				
<i>N¹p</i>	10	-	-	-	-	-	-	-	$R_c \approx 0,6$ МПа				
<i>N¹p</i>	11	-	-	-	-	-	-	-	$R_c \approx 0,8 - 1,0$ МПа				
<i>N¹m</i>	12	0,33	0,66	0,35	0,31	<0	1,9	2,8	19/16	19/16	53/29		

Ґрунтова основа розглядалась як пружне багат шарове тіло у відповідності із геологічним розрізом (рис. 2). Параметрами ґрунту є модуль деформації E , питома вага γ , коефіцієнт Пуассона ν , питоме зчеплення c , та кут внутрішнього тертя ϕ . Для забезпечення надійності розрахунків було прийнято мінімальне значення модуля деформації шарів вапняку $E = 50$ МПа, що відповідає малостисливим ґрунтам (за даними вишукувань міцність на одновісний стиск $R_c \approx 0,6$ МПа).

Для врахування взаємовпливу від зведення житлового комплексу з паркінгом в умовах потенційно підроблюваної території з врахуванням аварійних ситуацій було передбачено розв'язання наступних задач на дію статичних навантажень:

- взаємодія будівлі з ґрунтовою основою без врахування наявності підземних виробок;
- взаємодія будівлі з ґрунтовою основою з врахуванням наявності підземних виробок;
- взаємодія будівлі з ґрунтовою основою при примусовому руйнуванні катакомб.

Такий підхід дає можливість виконати співставлення та врахувати можливість впливу на будівлю наявних підземних порожнин та аварійних ситуацій.

Для оцінки спільної роботи каркасу та ґрунтового масиву, що має підземні пустоти, розглядалася частина комплексу (рис. 4), яка найближче розташована до підземних виробок та відокремлена деформаційними швами від іншої частини комплексу. Розроблена тривимірна скінчено-елементна модель, яка враховує всі елементи системи «ґрунтова основа – фундамент – будівля» приведена на рисунку 5, а.

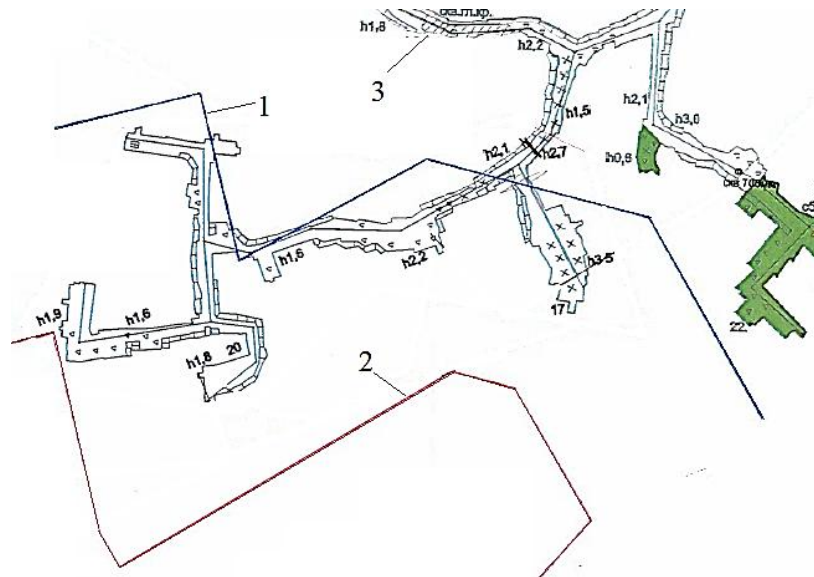


Рис. 3. Планувально-висотна характеристика підземних виробок: 1 – границя захисного цілика; 2 – границя паркінгу житлового комплексу; 3 – катакомби

Розміри «вирізаної» частини основи та граничні умови на обмежуючих площинах призначались таким чином, щоб найбільш точно врахувати особливості взаємодії основи під фундаментом з оточуючим ґрунтовим масивом та його спільної роботи з суміжними секціями комплексу, при цьому щоб можна було горизонтальні переміщення і осідання вважати досить малими, щоб закріпити точки ґрунтової основи на цих площинах вздовж осей X і Y. Розміри вирізаної розрахункової «фрагменту» каркасу комплексу та граничні умови на обмежуючих площинах підбиралися таким чином, щоб максимально врахувати особливості його спільної роботи з суміжними секціями комплексу. Розташування, потужність та механічні властивості ґрунтових шарів основи прийнято згідно даних інженерно-геологічних вишукувань.

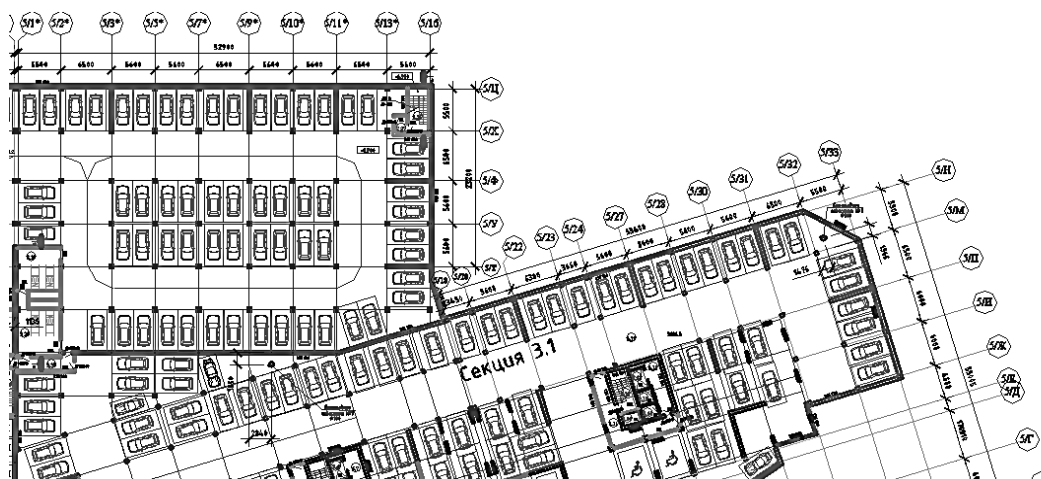


Рис. 4. Частина житлового комплексу, що розглядалася при дослідженні взаємовпливу каркасу будівлі та ґрунтової основи з підземними виробками поблизу котловану комплексу

На першому етапі було виконано розрахунок для визначення напружено-деформованого стану системи «ґрунтова основа – фундамент – будівля» для ґрунтового масиву без підземних виробок. Така постановка дає можливість, перш за все, оцінити поведінку основи, прийнявши цей стан як вихідний, що гарантує відсутність впливу підземних пустот. Прогнозоване осідання під центром ваги будинку очікується до 6,3 см, при цьому деформації ґрунтової основи під паркінгом не перевищуватимуть 9,5 мм. Осідання ділянки ґрунтового масиву в зоні, де мають бути катакомби, прогнозується не більше 6 мм (рис. 5, б), при цьому додаткові вертикальні напруження в цій зоні очікуються в межах 40...60 кПа.

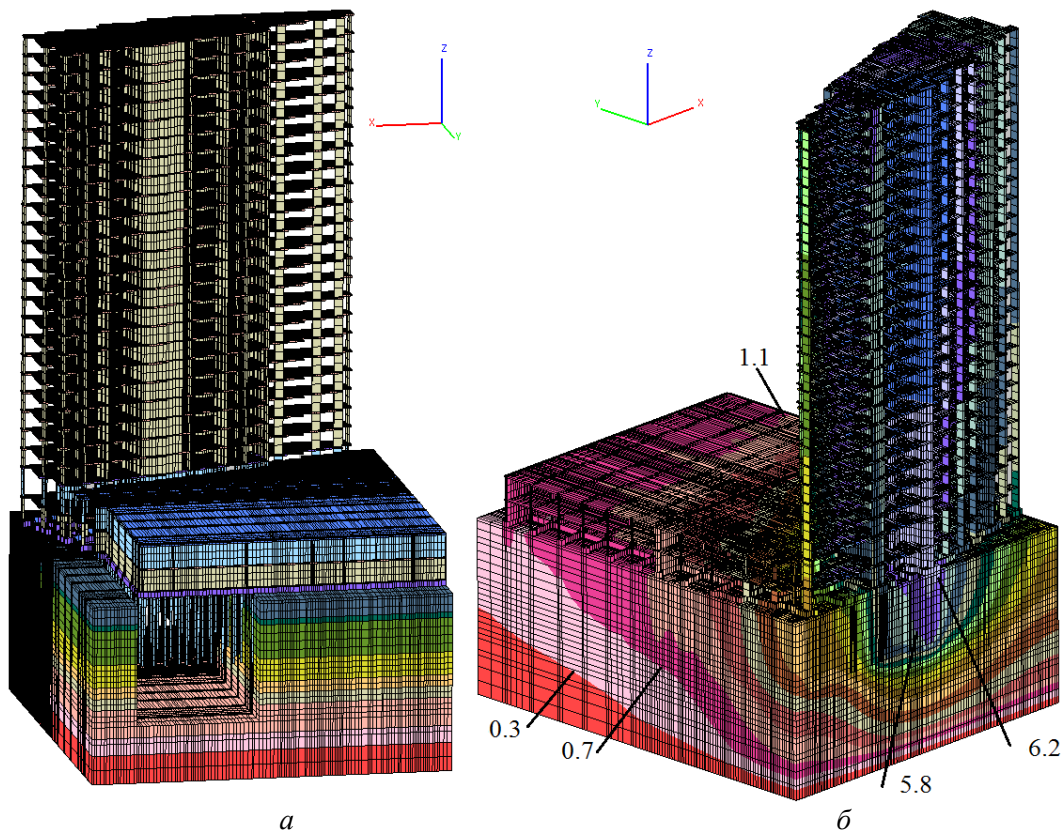


Рис. 5. Скінчено-елементна модель (а) та осідання [см] за результатами розв'язання задачі спільної роботи будівлі з ґрунтовою основою без врахування наявності катакомб (б)

На другому етапі було виконано числове моделювання для визначення напружено-деформованого стану системи «ґрунтова основа – фундамент – будівля» з врахуванням реальних підземних виробок з метою оцінки впливу на роботу каркасу будівлі та основи від наявності катакомб поблизу котловану. Порівняння деформацій несучих конструкцій будівлі та елементів ґрунтового масиву для розрахунків без катакомб та з врахуванням їх наявності показало, що наявність підземних виробок поблизу котловану комплексу фактично не викликає суттєвих змін (ізополя осідань та напружень практично накладаються для обох варіантів). Вертикальні напруження в елементах стельового склепіння підземних виробок (ділянка навколо кута паркінгу) очікуються за результатами розрахунків не більше 40 кПа, що не перевищує побутового тиску та легко сприймається шаром вапняків, у якому пройдені катакомби.

Для оцінки відносного осідання житлового комплексу при можливому обваленні стельового склепіння підземних виробок за початковий стан був прийнятий напружено-деформований стан ґрунтового масиву від ваги будівлі з врахуванням наявності катакомб у безпосередній близькості від котловану будівлі. При цьому враховувались як напруження від попереднього етапу, так і деформації. Аварійне обвалення стельового склепіння катакомб розглядалось як втрата сприйняття навантаження в межах ширини виробок. Числове моделювання аварійного обвалення стельового склепіння катакомб показало, що приріст деформацій фрагментів ґрунтового масиву очікуються в зоні, яка не охоплює фундаменти висотної частини житлового комплексу (рис. 6, а). При цьому прогнозовані додаткові переміщення фундаментів паркінгу, спричинені аварійним руйнуванням виробок, не є суттєвими (рис. 6, б): кутова зона паркінгу за результатами числового моделювання отримала додаткові деформації осідання 0,1...0,5 мм (в рівні ростверків).

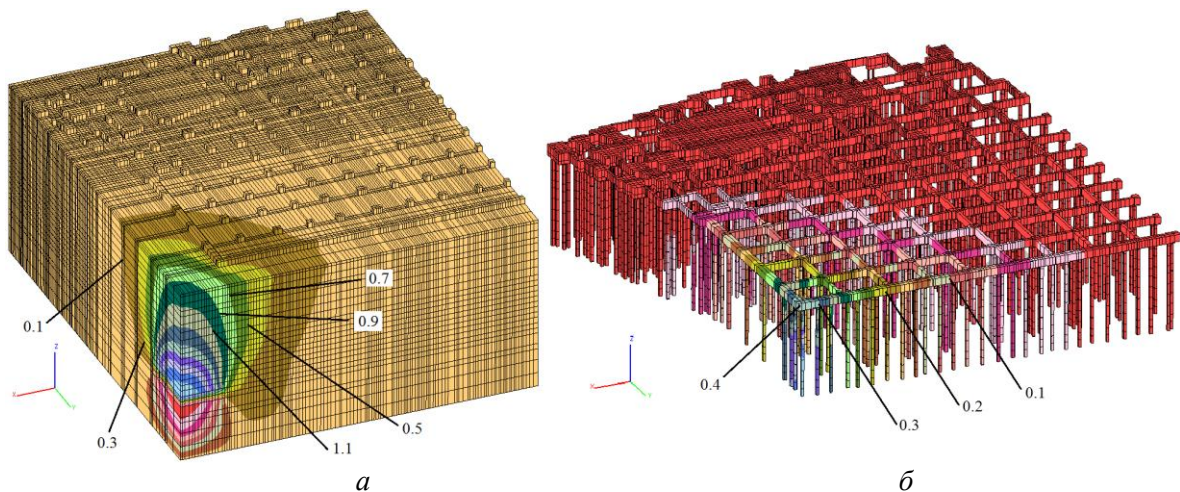


Рис. 6. Приріст деформацій (мм) від примусового руйнування підземних виробок :
 а – для ґрунтового масиву з ростверками; б – для пальового фундаменту

Отже, при порівнянні напружено-деформованого стану елементів системи «ґрунтова основа – фундамент – будівля» без врахування катакомб та при наявності підземних виробок в ґрунтовій основі поблизу комплексу було виявлено, що наявність катакомб практично не викликає зміни напружено-деформованого стану несучих елементів будівлі та ґрунтової основи (ізобари зон напружень практично співпадають). При цьому прогнозоване загальне осідання стельового склепіння виробок («катакомб») не перевищує 6 мм, що в умовах рівномірного осідання ґрунтового масиву не є критичним, а загальні вертикальні напруження – не перевищують 100 кПа, що легко сприймається шаром вапняку, в якому розташовані підземні виробки.

При порівнянні напружено-деформованого стану елементів системи «ґрунтова основа – фундамент – будівля» при наявності підземних виробок в ґрунтовій основі та при примусовому руйнуванні катакомб поблизу комплексу було виявлено, що прогнозований приріст осідання паль з боку катакомб (для крайнього ряду паль) може максимально складати 0,5 мм. Відносна різниця осідань будівлі паркінгу, що виникає, очікується величиною $\Delta S/L = 0,00001$, що є набагато меншим за допустиме нормами значення $(\Delta S/L)_u = 0,002$.

Висновки. Аналіз результатів числового моделювання взаємовпливу каркасної будівлі з ґрунтовою основою, послабленою підземними виробками, показав, що прогнозоване осідання стельового склепіння виробок від дії статичних навантажень не перевищує 6 мм, що в умовах рівномірного осідання ґрунтового масиву не є критичним. При цьому вертикальні напруження в ґрунті (стельове склепіння та стіни катакомб) не перевищують 100 кПа, що легко сприймається шаром вапняку, в якому пройдені підземні виробки. При можливому аварійному руйнуванні катакомб прогнозований приріст осідань крайнього ряду паль житлового комплексу не перевищує 1 мм. На основі виконаного числового моделювання можна констатувати, що існуючі катакомби поблизу котловану комплексу мають задовільний стан і на роботу пальових фундаментів комплексу, як і його висотної частини, практично впливати не будуть.

Застосований підхід дає можливість оцінити характер взаємодії будівлі з ґрунтовим основою, що має порожнечу: оцінити вплив навантаження від будівлі на підземні споруди, вплив наявності порожнеч на НДС несучих елементів споруди.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Андреев В. С. Математическое моделирование внецентренно нагруженных фундаментов на слоистых основаниях методом конечных элементов / В. С. Андреев, А. Л. Тюткин, Т. А. Селихова // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2004. Вип. 4. – С. 183 – 187.

2. Гірництво й підземні споруди в Україні та Польщі (нариси з історії) // Г. Гайко, В. Білецький, Т. Мікось, Я. Хмура. – Донецьк: УКЦентр, Донецьке відділення НТШ, «Редакція

гірничої енциклопедії», 2009. – 296 с.

3. ДБН В.1.1-12:2014 Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво у сейсмічних районах України / Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – К., 2014. – 117 с.

4. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування / Міністерство будівництва України. – К., 2006. – 75 с.

5. ДБН В.2.1-10:2009 Об'єкти будівництва та промислова продукція будівельного призначення. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування / Мінрегіонбуд України. – К., 2009. – 104 с.

6. **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. 67 – 76.

7. **Новський А. В.** Известняк-ракушечник. Исследование и использование в качестве основания фундаментов: [монографія] / А. В. Новский, В. А. Новский, Ю. Ф.Тугаенко. – Одесса: Астропринт, 2014. – 92 с.

8. **Черный Г. И.** Геотехнические процессы в сложных грунтовых условиях Украины / Г. И. Черный, В. Г. Черный // Світ геотехніки: (додаток до збірника «Будівельні конструкції», НДІБК). – 2000. – Вип. 53. – С. 4 – 9.

9. Eurocode 7: Geotechnical design – Part 2: Design assisted by laboratory testing. EN 1997-2:2000. European Committee for Standardization. – Brussels, 2000. – 196 p.

SUMMARY

Problem definition. Under worked areas is the most common type of difficult conditions of construction in Ukraine. Construction on under worked areas is allowed if special structural measure sare applied to ensure the normal exploitation of buildings. Ignoring constructive protect ive measures cause damages that are estimated in the millions.

Purpose. The problem of influence of artificial cavities on the stress-strain state of building and its soil base is considered in this work. The purpose of the researching was the qualitative and quantitative estimation of the influence on the strain-stress state of the frame structures from the artificial cavities in the soil base, including the case of their possible destruction

Analysis of recent research. For last years, with the development of multistoried construction, the scientist sand designers of Odessa began to study seriously the building properties of limestone sand their bearing ability. Prediction of deformations and the tilts of the building's foundations is possible at the stage of their design by numerical simulation. The problem of base-foundation-structure model development, which takes into account the influence of negative and positive factors on the stress-strain state of the system elements, remains actual.

Results. The numerical modeling results confirm the fact that the stress-strain state of the soil base and the frame of the building significantly react to the impact of each element of the system: it sown stiffness of the building, the components and the foundation stiffness, the characteristics of the soil base, the presence of the underground natural or artificial cavities, etc.

Conclusion. This approach makes it possible to appreciate the character of the building in teracti on with the having cavities soilbase: to assess the impact of the building load on the underground structures; to assess the impact from cavities on the stress-strain state of the load-bearing elements of structure. Analysis of numerical simulation results showed that projected deformation of ceiling arch of cavities on the static loads does not exceed 6 mm, which in the conditions of uniform soil settlements is not critical. According to the results of the research by using the numerical simulation we can state that the existing catacombs near the pit of the apartment complex are at satisfactory condition and almost will not impact on its pile foundations work.

REFERENCES

1. Andreev V. S. Matematicheskoe modelirovanie vncentrenno nagruzhenykh fundamentov na sloistykh osnovaniyah metodom konechnykh jelementov / V. S. Andreev, A. L. Tjut'kin, T. A. Selihova // Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V. Lazarjana. – 2004. Vip. 4. – S. 183 – 187.

2. Hirnyctvo y pidzemni sporudy v Ukrayini ta Pol'shchi (narysy z istoriyi) // H. Hayko, V. Bilets'kyu, T. Mikos', Ya. Khmura. – Donetsk: UKTsentr, Donetsk viddilennya NTSh, «Redaktsiya hirnychoyi entsyklopediyi», 2009. – 296 s.
3. DBN B.1.1-12:2014 Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiynykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivnytstvo u seysmichnykh rayonakh Ukrayiny / Ministerstvo rehional'noho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunal'noho hospodarstva Ukrayiny. – K., 2014. – 117 s.
4. DBN B.1.2-2:2006 Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya / Ministerstvo budivnytstva Ukrayiny. – K., 2006. – 75 s.
5. DBN B.2.1-10:2009 Ob'yekty budivnytstva ta promyslova produktsiya budivel'noho pryznachennya. Osnovy ta fundamenty sporud. Osnovni polozhennya proektuvannya / Minrehionbud Ukrayiny. – K., 2009. – 104 s.
6. Zhuk V. V. Realizatsiya metodyky doslidzhennya kharakteru vzayemodiyi karkasnykh budivel' z nerivnomirno prosidayuchoyu lesovoyu osnovoyu / V. V. Zhuk, M. V. Korniyenko // Osnovy i fundamenty: Mizhvidomchyy naukovy-tekhnichnyy zbirnyk – K. :KNUBA, 2013. – Vyp. 33 – S. 67 – 76.
7. Novs'kij A. V. Izvestnyak-rakushechnik. Issledovanie i ispol'zovanie v kachestve osnovaniya fundamentov: [monografija] / A. V. Novskij, V. A. Novskij, Ju. F.Tugaenko. – Odessa: Astroprint, 2014. – 92 s.
8. Chernyj G. I. Geotekhnicheskie processy v slozhnykh gruntovykh uslovijah Ukrainy / G. I. Chernyj, V. G. Chernyj // Svit geotekhniki: (dodatok do zbirnika «Budivel'ni konstrukcii», NDIBK). – 2000. – Vip. 53. – S. 4 – 9.
9. Eurocode 7: Geotechnical design – Part 2: Design assisted by laboratory testing. EN 1997-2:2000. European Committee for Standardization. – Brussels, 2000. – 196 p.

Відомості про авторів:

Жук Вероніка Володимирівна, к. т. н., доцент кафедри основ та фундаментів Київського національного університету будівництва і архітектури, e-mail: veronika@knu.org.ua.

Корнієнко Микола Васильович, к. т. н., професор доцент кафедри основ та фундаментів Київського національного університету будівництва і архітектури.

УДК 621.822.6

ПОРІВНЯННЯ ВЕЛИЧИН ОПОРІВ КОЧЕННЮ КУЛІ ТА ЦИЛІНДРА ПРИ РІЗНИХ СХЕМАХ ДОТИКУ

Р. М. Кроль, к. т. н., доц., Л. М. Бондаренко, к. т. н., доц.

Ключові слова: опір кочення, куля, циліндр, коефіцієнт тертя, обойма, підшипник, опір руху, схема дотику

Постановка проблеми. На подолання опору коченню і ремонту вузлів кочення витрачаються значні кошти країни. Оскільки однією із значних складових витрат є подолання опорів коченню в шарикових та роликових підшипниках, то необхідно більш точно визначити його величину і зокрема коефіцієнт тертя кочення приведенного до вала. Його величина наводиться в довідковій літературі і рекомендується при шарикових підшипниках $\mu = 0,010..0,015$, при роликових підшипниках $\mu = 0,015..0,020$ [1]. Такі розбіжності слід віднести на рахунок матеріалів обойм і шариків та роликів, а також на рахунок в'язкості мастил.

Ціль статті. Запропонувати аналітичні залежності для визначення опорів коченню кулі і роликів для різних схем дотиків і дати більш точні значення величин коефіцієнта тертя кочення приведенного до вала або внутрішньої обойми підшипника.

Основний матеріал досліджень. Розглянемо задачі при значній величині радіусів тіл кочення для оцінки впливу гістерезисних витрат на опір коченню.

Опори коченню кулі та циліндра. Для більш об'єктивної оцінки опору руху при різних схемах дотику приймаємо діаметри кулі і циліндра однаковими. При цій умові довжина циліндра $H = \frac{4 \cdot R_1}{3}$. Якщо радіус $R_1 = 100$ мм, то $H = 133$ мм. Величини допустимих