

## Застосування МСЕ, МГЕ до числового моделювання системи “наземна споруда - фундамент – основа”

Вінницький національний технічний університет

**Анотація.** В роботі за МСЕ та МГЕ проведено моделювання поведінки наземної та підземної частин будівлі.

**Ключові слова.** Числові метод скінчених елементів, метод граничних елементів, напружено-деформований стан.

**Abstract.** In the work on MSE and MGE, the behavior of the above-ground and underground parts of the building was modeled.

**Key words.** Numerical finite element method, boundary element method, stress-strain state.

### Вступ. Постановка проблеми

Тези присвячено актуальному питанню сумісного проектування наземної та підземної частин будівлі. Зростаюча потреба великих міст України в новобудовах та проблеми з виділенням земельних ділянок під забудову, призводять до збільшення попиту на висотні будівлі. Як наслідок, збільшується популярність каркасних споруд та монолітних конструкцій як найбільш перспективної технології зведення будівель на сьогоднішній день.

Збільшення попиту на такі конструкції також обумовлене цілим рядом позитивних властивостей.

В першу чергу каркасно-монолітні конструкції на 15-20% легші ніж збірні, відповідно зменшується кількість матеріалу, необхідного для спорудження як надземної частини, так і фундаментів, що в свою чергу призводить до зменшення загальної вартості об'єкта.

Терміни будівництва каркасно-монолітних споруд значно менші в порівнянні з цегляними будинками. Також однією з головних переваг каркасно-монолітних будівель є перерозподіл внутрішніх зусиль між несучими елементами каркасу, що призводить до рівномірного осідання всієї будівлі і запобігає появі тріщин. Тому можливий термін експлуатації таких будівель – до 300 років.

Збільшення поверховості будівель призводить до пошуку шляхів вдосконалення розрахункових схем висотних будівель, з метою забезпечення надійної роботи конструкцій і разом з тим оптимального використання матеріалів.

До цього часу не існує достовірної універсальної методики розрахунку висотних будівель з одночасним врахуванням основи, а найчастіше наземна частина приймається в розрахунках як жорстко защемлена. Проте реальну картину напружено-деформованого стану можна отримати лише у випадку врахування сумісної роботи системи "наземна частина – фундамент – підвалини".

В тезах розглянуто прикладання розрахунково-теоретичного апарату методики розрахунку НДС системи "будівля–фундамент–основа" за МСЕ, МГЕ з урахуванням розробки нових методів і методик їх розрахунку і моделювання в системі «будівля–фундамент–основа».

Потужний сучасний метод досліджень – числовий експеримент об'єднує єдиний фізичний зміст задачі, її математичне формулювання і числовий спосіб розв'язку. Проблему прогнозування поведінки сучасної висотної споруди (системи "будівля–фундамент–основа") можна вирішити лише засобами числового моделювання з використанням швидкодіючих ЕОМ.

Сучасна картина розрахункового обґрунтування конструкцій будівель, що проектуються, їх фундаментів і основ передбачає проведення досліджень НДС повної системи "будівля – основа – фундамент" на обчислювальних комплексах, що реалізують метод скінчених елементів. В даний час існує більше сотні програмних комплексів, всіх їх об'єднує реалізація МСЕ в переміщеннях.

Складність розв'язання проблеми вдосконалення складання розрахункових схем висотних каркасних будівель, полягає не лише у використанні відповідного програмного комплексу, а

насамперед в прийнятті обґрунтованої фізичної моделі, яка забезпечує достовірність результатів розрахунку.

Конструкції наземної частини будівель моделюються стержневими і пластинчастими (оболончастими) елементами. Існує велика кількість як вітчизняних так і зарубіжних програм, що дозволяють розглядати конструкції, набрані із такого типу скінчених елементів із відповідної бібліотеки СЕ.

Сучасне діагностування будівельних об'єктів засновано на наукових платформах, які швидко розвиваються і дозволяють удосконалювати розрахункові схеми, піднімати рівень їх адекватності. Процедура моделювання поведінки будівлі в тезах реалізується на основі методу скінчених елементів (наземна частина) та методу граничних елементів (підземна частина). При діагностуванні наземної частини споруди краєва задача механіки замінюється задачею знаходження мінімуму функціоналу (виразу повної потенціальної енергії роботи системи, потенціалу Лагранжа). Координатні функції, що апроксимують шукані функції  $\sigma - \epsilon$  стану будівлі, підбирались з точки зору забезпечення збіжності, точності, обумовленості рішень. Це найвідповідальніший етап, оскільки саме він відповідає за збіжність методу.

Головна особливість монолітного каркасу сучасних висотних будівель (більш жорсткої конструктивної схеми будівлі в порівнянні із збірним каркасом) – забезпечення спільної роботи усіх конструктивних елементів: колон, пілонів, діафрагм, плит перекриття, фундаментних конструкцій, та перерозподіл зусиль між ними.

Вірне використання цих можливостей дозволяє значно поліпшити міцнісні властивості каркасу з одночасним зменшенням його матеріалоемності.

В роботі розраховано та проаналізовано НДС триповерхової каркасної будівлі з підвалом розміри якої в плані зображені на рис. 1.а,б. Скінченно-елементна модель будівлі складається із комбінованих систем (стержнів, пластин) зображено на рис. 1:

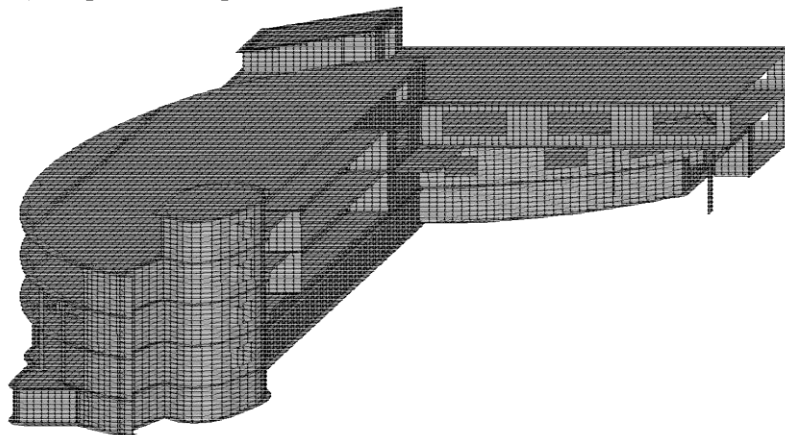


Рис. 1 а – Скінченно-елементна модель 3 - поверхової будівлі з підвалом в м. Вінниці по вул. Пирогова, 134 (вигляд збоку)

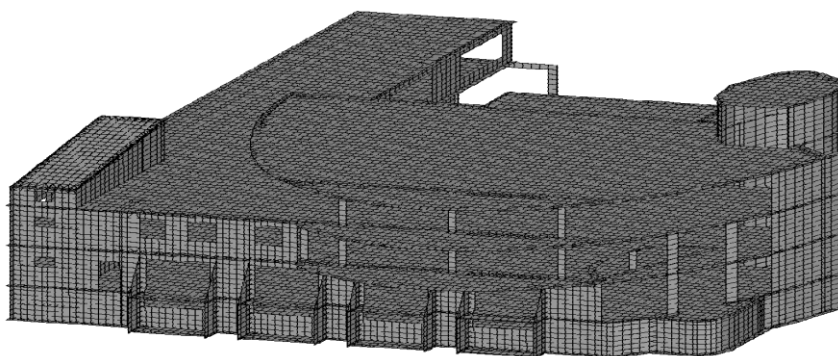


Рис. 1. б – Скінченно-елементна модель триповерхової будівлі з підвалом в м. Вінниці по вул. Пирогова, 134 (фронтальна сторона)

За результатами моделювання на ПК Ліра отримано ізополі внутрішніх зусиль скінченно-елементної моделі 3-поверхової будівлі, рис.2.

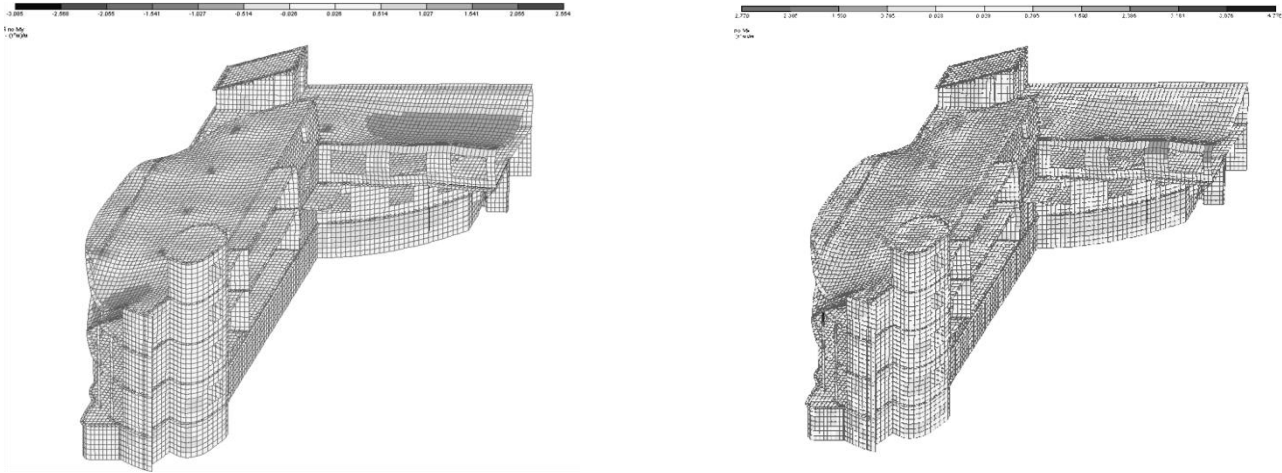


Рисунок 2 – Ізополя внутрішніх зусиль скінченно-елементної моделі 3-поверхової будівлі з підвалом а)  $M_x$ , б)  $M_y$

Координатні функції (шукані функції  $\sigma - \varepsilon$  стану будівлі) підбирались з точки зору забезпечення збіжності, точності, обумовленості рішень. Це найвідповідальніший етап, оскільки саме він відповідає за збіжність методу.

Прийнята дискретна розрахункова схема обумовлювала знаходження НДС об'єкту з рішень рівнянь системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) високого порядку. За результатами розрахунку було підібрано армування плит перекриттів для кожного поверху.

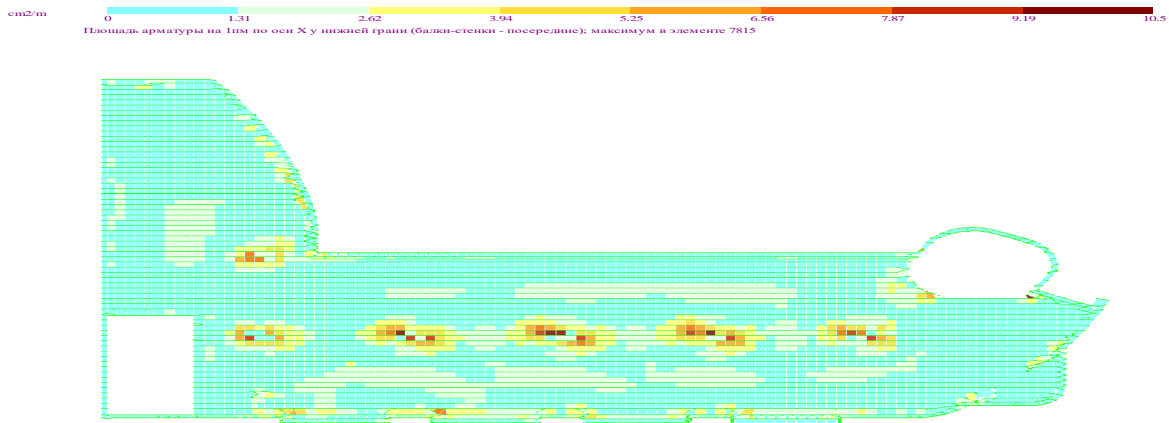


Рисунок 3. – Клейонка армування нижньої арматури вздовж осі X для плити перекриття 1-го поверху

В якості фундаменту будівлі запроєктовано плитний варіант підземної частини системи "будівля–основа" за МГЕ [1,2]. При проектуванні проведено дослідження роботи ґрунтових основ як в лінійний, так і в нелінійній стадіях з залученням дилатансійної моделі та теорії пластичної течії. Загальні механічні властивості ґрунтів, з яких складається наша планета Земля, з метою їх практичного використання сформульовано у вигляді визначальних законів (у вигляді рівнянь стану).

При розрахунку підземної частини будівлі за МГЕ основне розрахункове рівняння (рівняння стану) мало вигляд:

$$C(\xi)U(\xi) + \int_{\Gamma} U(x)q^*(\xi, x)d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} q(x)U^*(\xi, x)d\Gamma(x), \quad (1)$$

воно пов'язує значення переміщення  $U$  (потенціалу) і його нормальної похідної  $q = du/dx$  (потіку) в кожному граничному вузлі на границі дослідної фундаментної конструкції.

$U^*(\xi, x) \cdot q^*(\xi, x)$  - фундаментальні розв'язки Р. Міндліна для переміщень та напружень в пружній півплощині.

Рішення інтегрального рівняння (1) здійснено згідно моделі розв'язку нелінійної задачі механіки ґрунтів, що ґрунтується на дилатансійній теорії Ніколаєвського В. М., Бойка І. П та узагальненому критерію Мізера-Шлейхера-Боткіна [ 3,4]:

$$\begin{cases} f = T + \sigma_{окт} \cdot tg\psi - \tau_s = 0 & \text{при } \sigma_{окт} \leq P_0 \\ f = T + \rho_0 \cdot tg\psi - \tau_s = 0 & \text{при } \sigma_{окт} > P_0 \end{cases}, \quad (2)$$

де  $f$  – поверхня текучості.

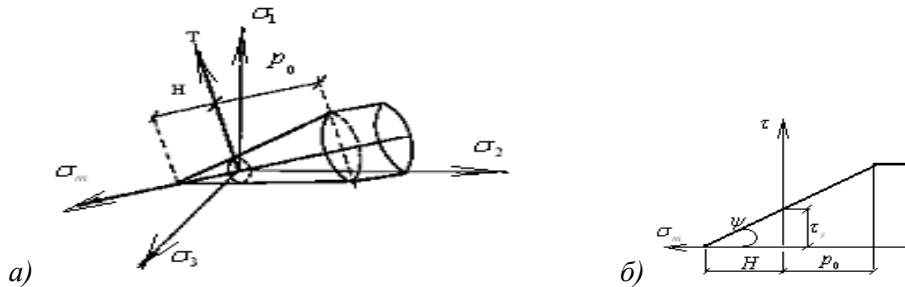


Рисунок 4. – Критерій текучості Мізера-Шлейхера-Боткіна в координатах головних напружень (а), меридіональний переріз в площині гідростатичного тиску (б)

При товщині фундаментної плити 50 см при наявності ґрунтів на будівельному майданчику згідно інженерних вишукувань:

$$E = 10145 \text{ кПа}; \quad \rho = 1,806 \text{ т/м}^3; \quad \rho^{\min} = 1,422 \text{ т/м}^3; \quad \rho^{\max} = 2,121 \text{ т/м}^3; \quad c = 17,23 \text{ кПа}.$$

розраховане за МГЕ (очікуване для таких характеристик ґрунтів) осідання будівлі при сумарній її вазі 1820,5 тс перевищує нормативно допустимі 8 см (рис. 5).

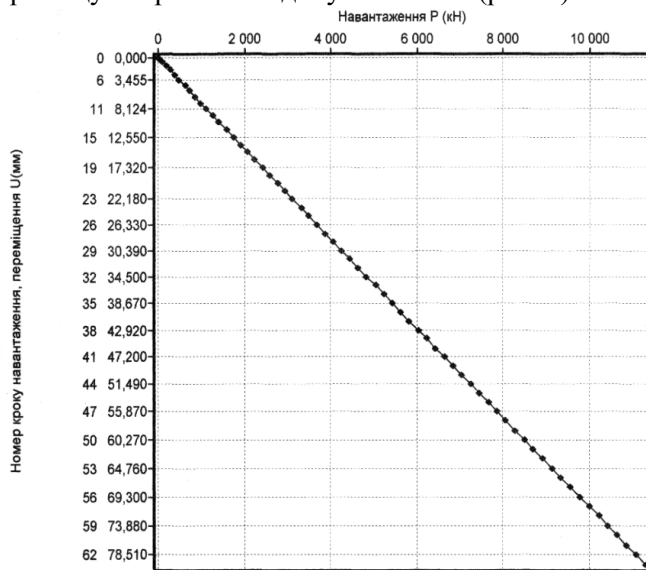


Рисунок 5 – Графік навантаження– осідання будівлі на фундаментній плиті h=50см на природних ґрунтах з середньозваженими характеристиками ґрунту:

$$E=10045 \text{ кПа}; \quad \nu = 0,3; \quad \rho = 1,806; \quad \varphi = 0,2846 \text{ радіан}; \quad C = 17,23 \text{ кПа}. \quad \text{Вага будівлі} - 18205 \text{ кПа}.$$

Заміна 1 м ґрунту безпосередньо під подошвою плити на мілкий пісок ( $c=2$  кПа,  $\varphi=32^\circ$ ,  $E=28$  кПа) дає змогу підняти середньозважений модуль деформації до 17520 кПа ( $E=17520$  кПа;  $\rho=1,806 \text{ т/м}^3$ ;  $c=12,06$  кПа;  $\varphi=0,3823$  рад). Осідання будівлі за розрахунком за МГЕ становить 8,2 см, тобто на межі нормативного (при висоті плити h=50см), (рис. 6).

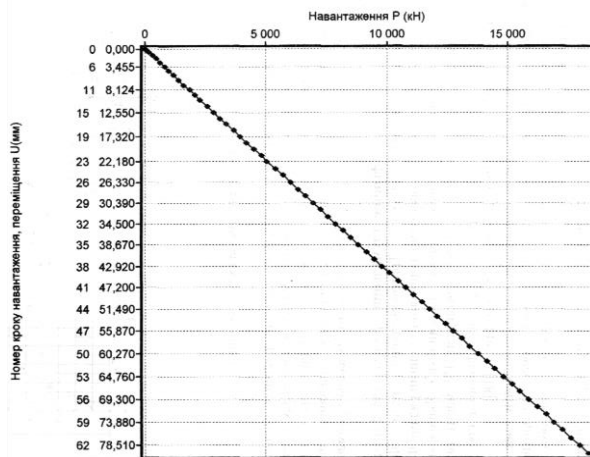


Рисунок 6 – Графік навантаження–осідання будівлі на фундаментній плиті  $h=50$  см при заміні 1м ґрунту м'яким піском, з середньозваженими характеристиками:  $E=17525$  кПа;  $\nu=0,3$ ;  $\rho=1,809$ ;  $\varphi=0,3873$  радіан;  $C=12,06$  кПа. Вага будівлі – 18205 кПа.

З метою забезпечення нормативного осідання будівлі розглянуто ще варіант заміни 1м ґрунту на відмітці низу фундаментної плити на гравелистий піщаний ґрунт з показниками  $E=40$  МПа;  $c=1$  кПа;  $\varphi=40^\circ$ ;  $e=0,55$ , фракції  $10>d>2$  мм. Середньозважені характеристики ґрунту в цьому випадку:  $E=21,95$  МПа;  $c=11,71$  кПа;  $\varphi=0,4389$  рад ( $25,15^\circ$ ). При висоті фундаментної плити 50 см очікується осідання будівлі 5,4 см. З точки зору прийняття більш економічного рішення при зменшенні висоти фундаментної плити до 30 см очікувана величина осідання за даними розрахунку складає 5,8 см, що менше нормативного – 8 см (рис. 7).

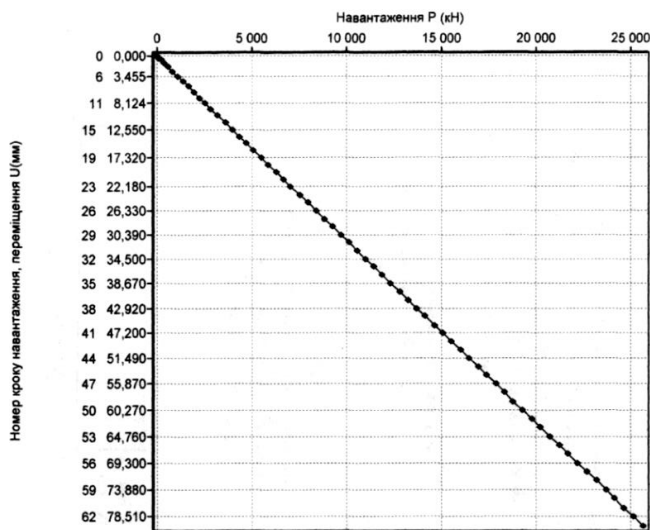


Рисунок 7 – Графік навантаження–осідання будівлі на фундаментній плиті  $h=30$ см при заміні 1м ґрунту гравієм фракції 2-10 мм, з середньозваженими характеристиками:  $E=21950$  кПа;  $\nu=0,3$ ;  $\rho=1,812$ ;  $\varphi=0,4389$  рад.  $C=11,71$  кПа. Вага будівлі – 18205 кПа.

### Висновки

- 1.Сучасні числові методи МСЕ, МГЕ дають можливість дослідити НДС будівельних конструкцій.
2. Розрахунок за МГЕ фундаментних конструкцій з урахуванням нелінійності поведінки ґрунтових основ під навантаженням відкривають можливість вибору економічного варіанту підсилення ґрунтової основи будівельного майданчика, яка забезпечує нормативне осідання будівлі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бреббія К, Теллес Ж, Вроубел Л. Методи граничних елементів. Мир, 1987. 524 с

2. Моргун А.С. Застосування МГЕ у розрахунках паль в пластичному середовищі ґрунту. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2001.- 64 с.
3. Ніколевський В.М. Механіка пористих і тріщиноватих середовищ, «Недра», 1984, 232 с.
4. Бойко І. П. Напружено – деформований стан ґрунтового масиву при побудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків // Основи і фундаменти. Міжвідомчий науково – технічний збірник. / І.П. Бойко, В.О. Сахаров. – К.: КНУБА, 2004 – С. 3 – 10.

***Моргун Алла Серафимівна***, дтн, проф, проф каф. ПЦБ ФБЦЕІ ВНТУ, м. Вінниця, [morgunallaS@gmail.com](mailto:morgunallaS@gmail.com)

***Меті Іван Миколайович***, ктн, ктн, декан ФБЦЕІ ВНТУ, м. Вінниця,

***Рижкова Татяна Володимирівна***, магістр каф. ПЦБ ФБЦЕІ ВНТУ, м. Вінниця

***Morgun Alla Serafimivna***, D.T., Prof., Prof. of the Department of the Psb of the Federal State Educational Service of the Republic of Ukraine, Vinnytsia, [morgunallaS@gmail.com](mailto:morgunallaS@gmail.com)

***Met Ivan Mykolayovych***, Ktn., Ktn., Dean of the Federal State Educational Service of the Republic of Ukraine, Vinnytsia,

***Ryzhkova Tatyana Volodymyrivna***, Master of the Department of the Psb of the Federal State Educational Service of the Republic of Ukraine, Vinnytsia