

УДК 004.4 (07) [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-10\(20\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-10(20)-12)

УРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ПОСЛІДОВНОСТІ ЗВЕДЕННЯ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОНСТРУКЦІЙ ПРИ АВТОМАТИЗОВАНОМУ ПРОЄКТУВАННІ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE ERECTION SEQUENCE ON THE STRESS-STRAIN STATE OF STRUCTURES IN THE AUTOMATED DESIGN OF BUILDINGS AND STRUCTURES

**Ротко С.В., к.т.н., доц., Ужегова О.А., к.т.н., доц., Талах Л.О.,
к.т.н., доц., Булда К.О., Артемук Т.С., магістри (Луцький
національний технічний університет, Луцьк)**

**Rotko S., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Uzhehova O.,
Ph.D. in Engineering, Talakh L.O., Ph.D. in Engineering, Bulda K.,
Artemuk T., masters (Lutsk National Technical University, Lutsk)**

У роботі представлено результати дослідження напружено-деформованого стану конструктивних елементів багатопверхової монолітної будівлі без урахування та з урахуванням послідовності зведення

Until now, the practice of conducting static calculations with the simultaneous loading of elements of the calculation scheme prevails in the case of automated design of buildings, that is, calculation justifications of constructive decisions are made according to the one-step calculation procedure. At the same time, the stiffness characteristics are assumed to be constant, and the magnitudes and nature of the loads assigned to the calculation model are unchanged during the entire calculation.

However,, the building construction process consists of many stages and depends significantly on the sequence of work performed on the construction site. For monolithic buildings, the fact that concrete gains its design strength over a certain period is important. That is, during numerical modeling, it is necessary to take into account the change in stiffness and strength characteristics of materials.

And monolithic structures are made using formwork with the installation of temporary supports, which will be installed and removed in a certain order. Thus, at different stages of construction, the structural and calculation scheme of the building may change. Ultimately, these parameters will affect the stress-strain state of structures.

Automated design of a monolithic multi-story frame building in two modes - traditional and taking into account the sequence of construction - revealed some differences in the results of the stress-strain state of the structural elements of the design scheme.

In general, the comparison of the results showed that the difference in both calculation options is insignificant on the lower floors, but increases on the upper floors, with an increase in the height of the building.

We can make a general conclusion that the calculation taking into account the sequence of erection is important for high-rise buildings, it must be performed for buildings of a high class of responsibility. It will allow you to get a real picture of the operation of all structural elements, give the correct assessment of the VAT of the latter, and correctly design them. As a result, it can affect the cost of construction by reducing the cost of reinforcement and concrete. This approach will minimize the risks of both local destruction and emergency situations during the life cycle of structural elements of buildings and structures.

Ключові слова: монолітна будівля, розрахункова схема, скінченно-елементна модель, послідовність зведення, напружено-деформований стан.

Keywords: monolithic building, calculation scheme, finite element model, construction sequence, stress-strain state.

Постановка проблеми. Розмаїття і складність сучасних об'єктів будівництва вимагають розробки досконалих числових моделей, здатних охопити всі нюанси, пов'язані з розрахунком і проектуванням конструкцій. Робиться наголос на важливості врахування при проектуванні будівлі чи споруди потенційних змін у напружено-деформованому стані (НДС) відповідальних конструктивних елементів протягом усіх етапів будівництва, завантаження та подальшої експлуатації. Чинні нормативні документи та традиційна будівельна практика часто не враховують усіх факторів, які можуть призвести до руйнування. Таким чином, актуальною є задача впровадження сучасних технологій проектування, здатних враховувати зміни напружено-деформованого стану конструкцій протягом усього життєвого циклу будівлі, від проектування, будівництва, експлуатації – і аж до знесення.

Мета роботи – виконати порівняння напружено-деформованих станів конструктивних елементів монолітної багатоповерхової житлової будівлі при двох видах автоматизованого розрахунку – традиційному та з урахуванням процесу зведення.

Вступ. На даний час більшість розрахунків конструкцій проводиться без урахування послідовності зведення будівель і споруд. Це можна пояснити відсутністю у чинних нормативних документах [1,2] чітких вимог щодо таких розрахунків, але це потенційно може призвести до суттєвих похибок у результатах.

Переважає практика автоматизованого проектування будівель передбачає статичні розрахунки з одночасним завантаженням елементів розрахункової схеми. Це означає, що конструктивні рішення приймають через одноетапну процедуру розрахунку. Під час цього процесу характеристики жорсткості вважаються постійними, а величини та

характер навантажень, призначених на розрахункову модель, залишаються незмінними протягом усього розрахунку.

Автоматизоване проєктування монолітних каркасних будівель необхідно виконувати з урахуванням процесу їх зведення. На сьогодні це актуальне завдання, особливо – при проєктуванні багатопверхових монолітних будівель.

Огляд літератури за темою роботи. Процес зведення будівлі є складним і тривалим у часі, складається з низки етапів, суттєво залежить від послідовності робіт, що виконуються на будівельному майданчику. У випадку монолітного будівництва вирішальним фактором є час, за який бетон досягає проектної міцності. Тому цей аспект необхідно враховувати під час чисельного моделювання, контролюючи «зміну характеристик жорсткості в процесі навантаження (повзучість, тріщини). В процесі монтажу при будівництві перехід до нової монтажною стадії часто здійснюється, коли зведена на попередніх стадіях конструкція ще не набрала проектної 28-добової міцності. Це також зумовлює необхідність врахування нелінійних ефектів, так як від стадії до стадії змінюється жорсткість зведених елементів, відповідно до часу їх зведення» [3].

Варто враховувати і той факт, що монолітні конструкції зводяться за допомогою опалубки, яка передбачає установку та подальший демонтаж тимчасових опор у певній послідовності. Отже, на різних етапах будівництва конструктивна і розрахункова схеми будівлі можуть зазнавати змін. Зрештою, ці модифікації вплинуть на напружено-деформований стан конструкцій [4].

У світли вищезазначених міркувань професор М. Барабаш у своїй роботі [5] надає обґрунтування важливості врахування процесу зведення будівлі чи споруди уже на стадії проєктування будівельного об'єкта. Це важливо для врахування варіацій у параметрах НДС конструкцій на кожній стадії їх життєвого циклу під час розрахунку моделі.

У своєму дослідженні [6] автори прослідковують закономірності впливу історії навантажень на НДС елементів конструкцій під час зведення будівлі.

Виклад основного матеріалу. В сучасних умовах визначення напружено-деформаційного стану будівельних конструкцій здійснюється із використанням такого програмного забезпечення, яке може враховувати послідовність процесу зведення будівлі, вносячи зміни в розрахункову схему на кожному етапі будівництва. Таку можливість надають користувачам вітчизняні програмні комплекси ЛІРА-САПР, МОНОМАХ-САПР, SCAD, що містять спеціалізовані розрахункові модулі «Монтаж» [7, 8, 9]. Ці модулі мають деяку особливість, що дозволяє моделювати важливі сценарії, такі як установка або видалення тимчасових опор під час встановлення монолітних конструкцій, застосування або зняття монтажних навантажень, зниження міцності та жорсткості бетону, якщо бетонна

суміш не досягла своєї проєктної міцності, здійснювати контроль за поетапним перетворенням моделі [3].

Ці модулі також дозволяють моделювати процес демонтажу елементів, навантажень або перекриттів (під час реконструкції або знесення будівлі).

Отже, розрахунок ведеться на кожному етапі будівництва на основі відповідної конструктивної схеми будівлі, що включає в себе вже змонтовані або демонтовані на даний момент елементи. Одночасно можна враховувати поточну міцність бетону та його модуль пружності. У випадках, коли проєктна кількість арматури або прийнятий переріз залізобетонного елемента виявляються недостатніми, проєктні рішення коригуються.

Проєктований у роботі багатоповерховий каркасно-монолітний житловий будинок (рис. 1) має односекційну конструкцію з розмірами в плані 27х21 м. При загальній висоті 32 м будівля включає паркінговий рівень висотою 4,0 м, перший і вісім типових поверхів, висотою 3,0 м кожен. Просторова жорсткість конструкції забезпечується спільною роботою монолітних залізобетонних колон, центрального монолітного ядра жорсткості та дисків перекриттів і покриття, які зберігають незмінність конструкції у горизонтальному напрямку.

Каркас прийнято з кроком колон 6 і 3 м перерізом 400х400 мм і 500х500 мм. Несучі монолітні залізобетонні конструкції проєктуються із таких класів бетону: С16/20 – фундаментна плита товщиною 800 мм, С16/20 – колони та діафрагми жорсткості, С20/25 – плити перекриттів і покриття, товщиною 200 мм.

Розрахункова схема будівлі (рис. 2) була створена за допомогою програми КОМПОНОВКА у програмному комплексі «МОНОМАХ-САПР», згодом трансформована у скінченно-елементну модель.

Програмний комплекс «МОНОМАХ-САПР» дає можливість враховувати поступове, поетапне зведення будівлі, з вирівнюванням рівнів перекриттів. Для визначення програмою відповідних етапів, необхідно в діалоговому вікні «МСЕ розрахунок» (рис. 3) вказати номери поверхів, що входять до складу кожного етапу будівництва.

При цьому власна вага послідовно присвоюється елементам під час їх монтажу, а для інших навантажень, закладених у постійне, розробники рекомендують вказувати момент їх прикладання. Експлуатаційні навантаження діятимуть після завершення будівництва всієї будівлі, тому й задавати їх потрібно на етапі повністю сформованої розрахункової схеми. Розрахунок виконується на кожному етапі монтажу (тієї конструктивної системи будівлі, що включає в себе елементи і навантаження, які відповідають цьому етапу).

За допомогою МСЕ-розрахунку програма обчислює зусилля і напруження, які накопичуються в елементах розрахункової схеми у

процесі зведення будівлі. При цьому модуль «Монтаж» зводить до нуля переміщення вузлів, доданих перед розрахунком кожного наступного етапу.



Рис. 1. Проектована житлова будівля

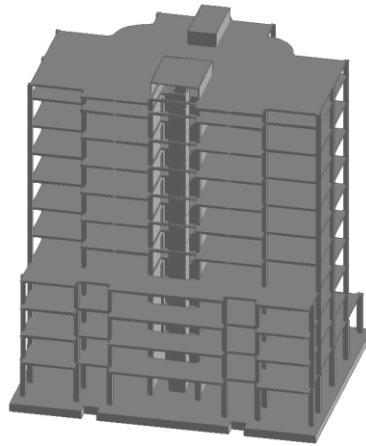


Рис. 2. Розрахункова схема будівлі

МСЕ розрахунок

Крок триангуляції

плит	3	м	☒ 4-х вузлові СЕ	метод	1
стіл	3	м	☒ 4-х вузлові СЕ	метод	1
☒ генерувати елти фунда плит	1.5	м	☒ 4-х вузлові СЕ	метод	1

Задати унікальні поверхні... (Задати)

Виділити в суперелементи

☐ елементи перекриття поверху

☐ стіни

Динаміка

Кількість форм

☐ Генерувати АЖТ колон і стіл, що мають таку властивість

☒ Жорсткість основи на зовн

☒ Жорсткість палів на зовн (в долях від їх жорсткості на стіну)

☐ Задати жорсткість

☒ Враховувати поетапність спорудження з вирівнюванням рівнів перекриттів

В кожному етапі 3 поверхи

Об'єм/масо замінувати етапи поверхня (n1, n2, n3...)

3,6,9,12

Збільшувати жорсткість ґрунту в окремих завантаженнях (подвійний розрахунок)

☐ Сейсміка ☐ Вітер ☐ Кількість поштов (с) в 1

☐ Ж-сті палів (ЕП) в 1

☒ Враховувати нелінійну роботу бетону і арматурні діли

☒ плит і балок

по всій будівлі

☒ стіл і колон

по всій будівлі

☐ фунда, плит і фунда, балок

Допустимі похибки

Виділення СЕ стіни від площини стіни

0.001

м

Виділення СЕ колон від вертикальної осі колон

0.001

м

Використовувати результати МСЕ розрахунок:

результати сейсміч розрахунок

CDC

☒ Колони (розрахунок арматурноекспорт)

☒ Стіни (розрахунок арматурноекспорт)

☒ Балки (розрахунок арматурноекспорт)

☒ Розриви (експорт)

☒ Фунда, плити (експорт)

☒ Плити (експорт)

☒ Фундаменти (включно з розрахунок арматурноекспорт)

Розрахунок арматурні буде виконано одразу після МСЕ розрахунок

Експорт буде виконано по команді Експорт в прог. констр. ПК МОНОМАХ САПР

OK Відміна Довіда

Рис. 3. Діалогове вікно **МКЕ розрахунок** із опцією «Враховувати поетапність спорудження з вирівнюванням рівнів перекриттів»

Тобто, при цьому переміщення вузлів накопичуються із деяким вирівнюванням протягом процесу монтажу. Такий підхід відображає дійсний напружено-деформований стан будівлі [3].

У процесі автоматизованого проектування процес зведення будівлі був розділений на чотири етапи. На кожному етапі моделювання відбувалося шляхом зведення відповідної частини будівлі за допомогою надбудови верхніх поверхів. Результатом цього процесу стало створення остаточної розрахункової моделі будівлі.

На кожному етапі (рис. 4) програма робить фіксацію певного попереднього напружено-деформованого стану, який потенційно може вплинути на остаточний результат розрахунку.

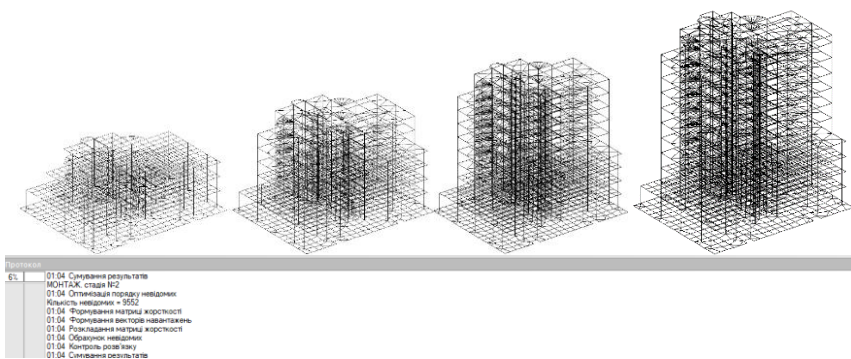


Рис. 4. Етапи зведення будівлі у вікні розрахункового процесора

На рис. 5 наведені деформовані схеми та ізополя переміщень розрахункової моделі по осі Z на всіх етапах зведення будівлі. У таблицях 1-3 – результати розрахунку конструктивних елементів будівлі при традиційному розрахунку та з урахуванням послідовності зведення.

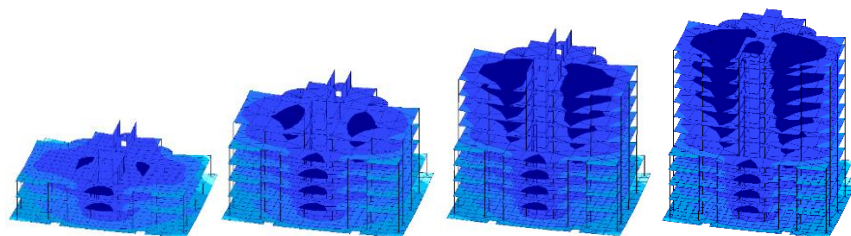


Рис. 5. Деформовані схеми та ізополя переміщень по Z на всіх етапах зведення

Таблиця 1

Поздовжні зусилля в колонах підвалу

Номер колони	Зусилля в колонах, кН			
	Традиційний розрахунок		Урахування послідовності зведення	
	min	max	min	max
1_8 сер	-1673,6	-1696,1	-1675,3 (+1%)	-1699,8 (+0,2%)
1_13 кр	-1332,8	-1357,3	-1317,9 (-11,1%)	-1342,4 (-1,1%)
1_15 сер	-2520,8	-2545,3	-2617,6 (+3,7%)	-2652,2 (+4%)
1_24 кр	-487,3	-511,9	-514,25 (+5,2%)	-538,8 (+5%)

Таблиця 2

Переміщення та зусилля у фундаментній плиті

Параметр	Екстремальні значення			
	Традиційний розрахунок		Урахування послідовності зведення	
	min	max	min	max
Переміщення по Z, мм	-37,9	-64,0	-37,5 (-1,06%)	-64,7 (+1,1%)
Mx, кНм/м	250,6	930,6	267,7 (+6,1%)	938,3 (+0,8%)
My, кН/мм	81,5	949,7	76,2 (-6,5%)	954,5 (+0,5%)
Qx, кН/м	-1450,3	1099,2	-1541,5 (+5,9%)	1107,2 (+0,7%)
Qy, кН/м	-523,7	1516,6	-524,9 (+0,2%)	1572,5 (+3,6%)

Таблиця 3

Переміщення та зусилля у плитах перекриттів 1, 10 поверхів

Параметр	Сполучення зусиль (екстремуми)			
	Традиційний розрахунок		Урахування послідовності зведення	
	min	max	min	max
1-й поверх				
Переміщення по Z, мм	-18,0	1,07	-16,9 (-6,1%)	1,07 (0%)
Mx, кН/м	-83,6	-5,57	-78,6 (-6%)	-5,25 (-0,4%)
My, кН/м	-118,7	1,03	-111,8 (-5,8)	0,97 (-5,8%)
Qx, кН/м	-7025,7	7025,8	-6617,8 (-5,8%)	6617,8 (-6,2%)
Qy, кН/м	-33,6	3508,9	-31,7 (-5,65%)	3305 (-5,8%)
10-й поверх				
Переміщення по Z, мм	-7,72	3,01	-6,86 (-11,1%)	2,48 (-17,6%)
Mx, кН/м	-75,6	0,51	-66,7 (-11,8%)	0,48 (-5,9%)
My, кН/м	-71,7	-2,76	-62,53 (-12,8)	-2,52 (-8,7%)
Qx, кН/м	-85,3	2086,7	-74,2 (-13%)	1918 (-8,1%)
Qy, кН/м	-33,3	769,5	-29,32 (-12%)	708,6 (-7,9%)

Висновки. Автоматизоване проектування монолітної багатоповерхової житлової будівлі виявило варіації результатів щодо напружено-деформованого стану елементів конструкції розрахункової схеми при розрахунку у двох режимах — традиційному та з урахуванням послідовності зведення. Зокрема, поздовжні зусилля майже в усіх колонах на нижньому поверсі показали тенденцію до збільшення (у діапазоні 0,2-5,2%) при врахуванні послідовності монтажу. Лише в крайніх колонах Км-13 (Км-16) спостерігалось зниження від 1,1% до 11,1%. Переміщення фундаментної плити показали незначні зміни (від -1,06% до +1,1%), при цьому згинальні моменти зросли до 6,1%, а поперечні сили – до 5,9%.

Для плит перекриття вертикальні переміщення (їх екстремальні значення) уздовж осі Z зменшилися, при цьому для плити першого поверху – на 6,1%, плити 10-го поверху – на 17,6%. Зміни зусиль коливалися від 0,4% до 6,2% і від 5,9% до 13%, відповідно. Ці зміни можна пояснити зменшенням осідання колон при врахуванні процесу зведення. У традиційному розрахунку всі навантаження одночасно прикладались на розрахункову схему, що призводить до дещо більших переміщень. І навпаки, при розгляді послідовності монтажу навантаження накопичуються поступово, що призводить до менших переміщень на кожному поверсі і, як наслідок, до помітної різниці переміщень на верхніх поверхах.

Таким чином, порівняння результатів НДС показує, що різниця між обома варіантами розрахунку незначна на нижніх поверхах, але стає більш вираженою на верхніх поверхах, особливо зі збільшенням висоти будівлі.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що розрахунок із урахуванням послідовності зведення є важливим для багатоповерхівок, виконувати його необхідно, особливо – для будівель із високим рівнем відповідальності. Цей підхід дозволяє реалістично оцінити експлуатаційну поведінку всіх конструктивних елементів, полегшуючи точне проектування та потенційно знижуючи витрати на будівництво завдяки оптимізованому використанню арматури та бетону. Більше того, він мінімізує ризики, пов'язані з локальними руйнуваннями та надзвичайними ситуаціями протягом усього життєвого циклу конструктивних елементів будівель і споруд.

References

1. DBN V.1.2-14:2018. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktivnoi bezpeky budivel i sporud. Diisnyi z 01.01.2019. Minrehionbud ta ZhKH Ukrainy. Kyiv, 2018. 30 s.
2. DBN V.2.2-41:2019. Vysotni budivli. Osnovni polozhennia. Chynnyi vid 01.01.2021. Kyiv: Mnhion Ukrainy, 2021. 53 s.
3. Barabash M. S. Kompiuternoe modelyrovanye protsessov zhyznennoho tsykla ob'ektov stroitelstva: Monohrafiya / Maryia Serheevna Barabash. K.: Yzd-vo «Stal», 2014. 301 s.

4. Barabash M. S. Kompiuternoe modelyrovanye protsessov zhyznennoho tsykla konstruktysyi / M. S. Barabash, Yu. V. Henzerskiy // Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia: Nauk-tekh. zbirnyk. K.: KNUBA, 2013. № 47. S. 83–89.
5. Horodetskiy A. S. Kompiuternoe modelyrovanye protsessa vozvedeniya stroytelnykh konstruktysyi / A. S. Horodetskiy, M. S. Barabash // Stroytelnaia mekhanyka y raschet sooruzheniy. 2014, № 5. S. 28 - 33.
6. Horodetskiy, A.S. Kompiuternoe modelyrovanye v zadachakh stroytelnoi mekhanyky: Uchebnoe posobie / A.S. Horodetskiy, M.S. Barabash, V.N. Sydorov. Yzdatelstvo ASV, 2016. 338 s.
7. Horodetskiy A.S. MONOMAKh-SAPR - prohrammnyi kompleks dlia avtomatyzirovannoho proektyrovanyia zhelezobetonnykh y armokamennykh konstruktysyi mnohoetazhnykh karkasnykh zdaniy / A.S. Horodetskiy, A.A. Lazarev // Novye kompiuternye tekhnolohyy, 2011. № 1 (9). S. 38-41.
8. Perelmutter A.V. SCAD++. Rezhym MONTAZh. Fizychni aspekty. https://www.youtube.com/watch?v=J15B1nub0c4&ab_channel=SCADSoft
9. Rotko S.V., Bulda K.O., Artemuk T.S. Urakhuvannia posliddovnosti zvedennia na NDS konstruktysii pry avtomatyzovanomu proiektuvanni budivel i sporud // Suchasni problemy mistobuduvannia. Perspektyvy ta priorytety rozvytku: zbirnyk tez dopovidei mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii, 17 lystopada 2023 r., m. Lutsk [Elektronnyi resurs]. Lutsk: LNTU, 2023. S. 95-96. URL: <https://konf-mbg.wixsite.com/lntu-bci-mbg-2023>

Література

1. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Дійсний з 01.01.2019. Мінрегіонбуд та ЖКГ України. Київ, 2018. 30 с.
2. ДБН В.2.2-41:2019. Висотні будівлі. Основні положення. Чинний від 01.01.2021. Київ: Мнрегіон України, 2021. 53 с.
3. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография / Мария Сергеевна Барабаш. К.: Изд-во «Сталь», 2014. 301 с.
4. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла конструкций / М. С. Барабаш, Ю. В. Гензерский // Містобудування та територіальне планування: Наук-техн. збірник. К.: КНУБА, 2013. № 47. С. 83–89.
5. Городецкий А. С. Компьютерное моделирование процесса возведения строительных конструкций / А. С. Городецкий, М. С. Барабаш // Строительная механика и расчет сооружений. 2014, № 5. С. 28 - 33.
6. Городецкий, А.С. Компьютерное моделирование в задачах строительной механики: Учебное пособие / А.С. Городецкий, М.С. Барабаш, В.Н. Сидоров. Издательство АСВ, 2016. 338 с.
7. Городецкий А.С. МОНОМАХ-САПР - программный комплекс для автоматизированного проектирования железобетонных и армокаменных конструкций многоэтажных каркасных зданий / А.С. Городецкий, А.А. Лазарев // Новые компьютерные технологии, 2011. № 1 (9). С. 38-41.
8. Перельмутер А.В. SCAD++. Режим МОНТАЖ. Фізичні аспекти. https://www.youtube.com/watch?v=J15B1nub0c4&ab_channel=SCADSoft
9. Ротко С.В., Булда К.О., Артемук Т.С. Урахування послідовності зведення на НДС конструкцій при автоматизованому проектуванні будівель і споруд // Сучасні проблеми містобудування. Перспективи та пріоритети розвитку: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 17 листопада 2023 р., м. Луцьк [Електронний ресурс]. Луцьк: ЛНТУ, 2023. С. 95-96. URL: <https://konf-mbg.wixsite.com/lntu-bci-mbg-2023>