

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до проведення практичних занять та організації самостійної роботи
з навчальної дисципліни

**«КОМП'ЮТЕРНІ МЕТОДИ
РОЗРАХУНКУ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ»**

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна
інженерія, освітня програма «Промислове та цивільне будівництво»)*

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2026**

Методичні рекомендації до проведення практичних занять та організації самостійної роботи з навчальної дисципліни «Комп'ютерні методи розрахунку будівельних конструкцій» (для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія, освітня програма «Промислове та цивільне будівництво») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : П. А. Резнік, О. І. Лугченко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. – 97 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. П. А. Резнік,
канд. техн. наук, доц. О. І. Лугченко

Рецензент

О. О. Калмиков, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою будівельних конструкцій, протокол № 1 від 26 серпня 2025 р.

Методичні рекомендації містять сукупність практичних завдань і вправ із навчальної дисципліни «Сучасні комп'ютерні методи розрахунку будівельних конструкцій», які сприяють засвоюванню набутих знань, умінь і навичок.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1.....	6
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2.....	15
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3.....	20
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 4.....	26
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5.....	30
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 6.....	35
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 7.....	39
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 8.....	45
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 9.....	50
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 10.....	56
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 11.....	63
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 12.....	69
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 13.....	74
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 14.....	79
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 15.....	84
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 16.....	89
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	96

ВСТУП

Стрімкий розвиток інформаційних технологій зумовлює суттєві зміни в інженерній практиці проектування та розрахунку будівельних конструкцій. Сучасне будівництво неможливо уявити без застосування комп'ютерних методів аналізу, які забезпечують підвищення точності розрахунків, ефективність прийнятих конструктивних рішень та можливість моделювання складних просторових систем.

Навчальна дисципліна «Сучасні комп'ютерні методи розрахунку будівельних конструкцій» є однією з профілюючих у підготовці здобувачів спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія. Вона спрямована на формування у студентів знань та практичних умінь, необхідних для професійної діяльності в умовах широкого впровадження програмних комплексів у будівельній галузі.

Основна мета дисципліни полягає у навчанні студентів застосуванню сучасних інформаційних систем для розрахунку та проектування будівель, детального моделювання залізобетонних і металевих конструкцій, використанні спеціалізованих програмних комплексів у будівництві, вирішенні проблем комп'ютерного моделювання та освоєнні основ методу скінченних елементів. Особлива увага приділяється розв'язанню лінійних і нелінійних задач теорії споруд з урахуванням інженерної та фізичної нелінійності, а також особливостей роботи конструкцій різної складності.

У процесі вивчення курсу здобувачі:

- засвоюють принципи побудови та розрахунку плоских і просторових конструкцій;
- навчаються застосовувати оболонкові, стрижневі та об'ємні моделі в чисельному аналізі;
- опановують методику врахування реальної роботи матеріалів, включно з тріщиноутворенням, повзучістю та пластичними деформаціями;
- набувають навичок інтерпретації та критичного аналізу результатів розрахунку, їх зіставлення з нормативними вимогами та практичними інженерними рішеннями.

Практикум укладено відповідно до робочої програми дисципліни. Він призначений для використання студентами під час практичних занять та самостійної роботи. Матеріали включають алгоритми виконання завдань, вихідні дані для моделювання, приклади побудови розрахункових схем та рекомендації щодо аналізу результатів.

Важливою складовою засвоєння дисципліни є самостійна робота здобувачів, спрямована на опрацювання теоретичного матеріалу, закріплення практичних навичок роботи з програмними комплексами та формування вміння застосовувати отримані знання у реальних умовах проєктування.

Таким чином, вивчення дисципліни «Сучасні комп'ютерні методи розрахунку будівельних конструкцій» забезпечує підготовку висококваліфікованих фахівців, здатних використовувати сучасні програмно-обчислювальні технології для аналізу, проєктування та оцінки надійності будівельних конструкцій, що є необхідною умовою розвитку будівельної галузі в умовах сучасних викликів.

Усі викладені практичні завдання базуються на офіційних прикладах програмного комплексу LIRA-FEM, який є вітчизняним інженерним інструментом, що реалізує сучасні алгоритми методу скінченних елементів. Цей комплекс широко застосовується у професійній інженерній практиці в Україні та за її межами, забезпечуючи відповідність вимогам чинних нормативних документів України (ДБН, ДСТУ), а також стандартів Європейського Союзу (Eurocodes) у частині розрахунку будівельних конструкцій.

Такий підхід дозволяє сформувати у здобувачів практичні навички роботи з професійним ПЗ, що відповідає актуальним міжнародним вимогам та є корисним як у локальній, так і глобальній інженерній діяльності.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1

Моделювання та розрахунок залізобетонної плити (LIRA-FEM)

Мета завдання полягає у формуванні та закріпленні практичних навичок побудови розрахункової моделі плити з урахуванням правильного задання граничних умов, що визначають коректність подальших інженерних розрахунків. У межах роботи передбачено опанування методики задання навантажень та формування розрахункової схеми задачі (РСЗ) для забезпечення можливості виконання точного аналізу конструкції.

Додатковою метою є освоєння підбору арматури двома методами – за підходами Карпенка та Вуда – з подальшим порівнянням результатів з метою вибору найбільш ефективного рішення. Передбачено також набуття навичок аналізу та інтерпретації графічних результатів розрахунку, зокрема карт деформацій, згинальних моментів та необхідної площі арматури (A_s).

Вихідні дані

1. Плита $3 \text{ м} \times 6 \text{ м}$, товщина 150 мм.
2. Схема спирання: одна довга грань – вільне обпирання по всій довжині; протилежна коротка грань – опора на кінцях (колони); довгі бокові грані – вільні.
3. Розбивка сітки: 6×12 (крок 0,5 м по обох напрямках).
4. Навантаження:
 - № 1 – власна вага;
 - № 2 – зосереджені сили $P = 1 \text{ т}$ $P = 1 \text{ т}$ $P = 1 \text{ т}$ у вузлах (див. схему завдання);
 - № 3 – зосереджені на пластинах $P = 1 \text{ т}$ $P = 1 \text{ т}$ $P = 1 \text{ т}$ з майданчиком дії $A = B = 0,25 \text{ м}$ $A = B = 0,25 \text{ м}$ $A = B = 0,25 \text{ м}$ для зазначених елементів.
5. Два варіанти конструювання: Карпенко і Вуд (плити).
6. Матеріали (приклад): бетон С16/20, арматура А400С (поздовжня), А500С (поперечна).

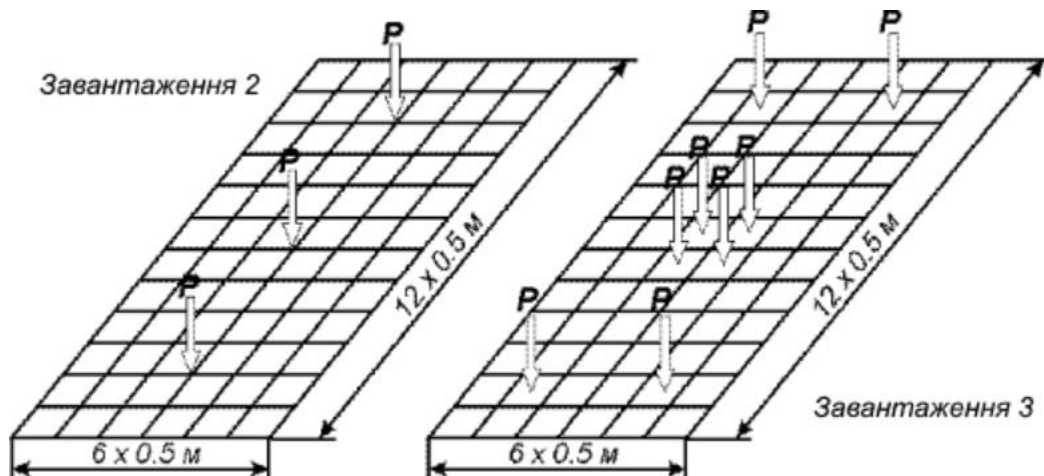


Рисунок 1.1 – Розрахункова схема плити

Алгоритм виконання

Підготовка задачі.

1. Створити нову задачу: Програми → Новий; ознака схеми: 3 DOF у вузлі (Z, U_x, U_y) в XOY; назва напр., 02_плита ЗБ.
2. Зберегти модель (Data/...).

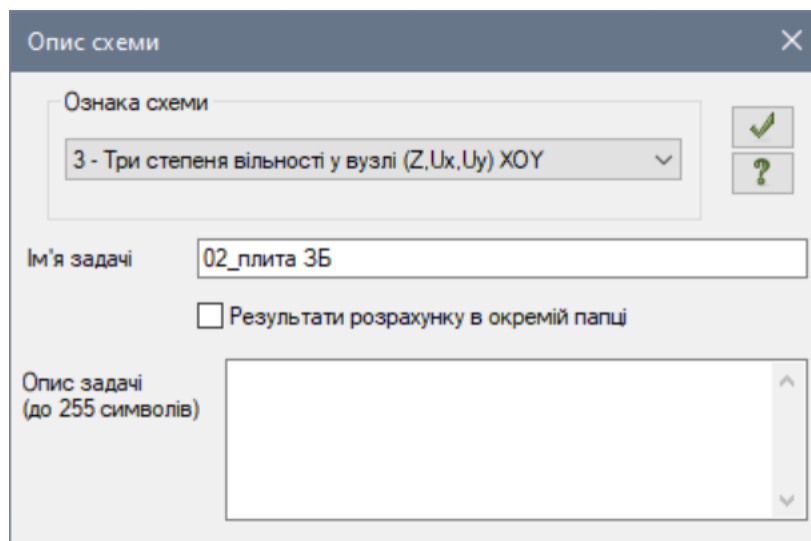


Рисунок 1.2 – Опис схеми

Геометрія й сітка.

3. Генерація пластини:
Створення → Генерація регулярних фрагментів/сітей → Плита;
кроки: 0,5 м по обох напрямках; кількість: 6 × 12. → Застосувати.

5. Призначити в'язі (заборонити Wz для відмічених вузлів). Перевірте кольорову індикацію.

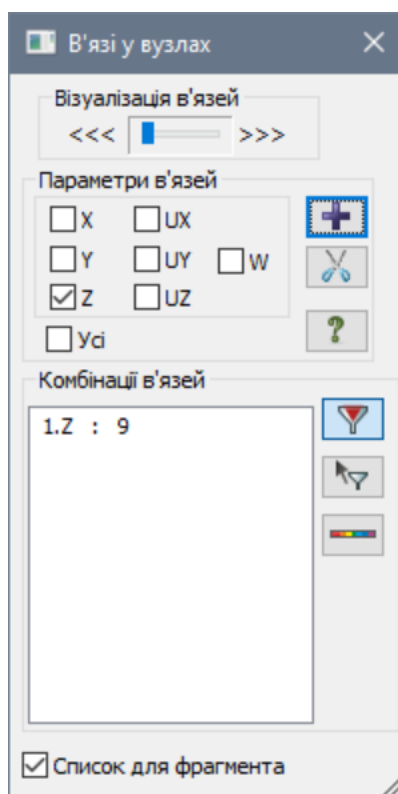


Рисунок 1.6 – Діалогове вікно «В'язі у вузлах»

Варіанти конструювання (ЖБ.)

6. Відкрити «Варіанти конструювання»:

- варіант 1: РСЗ, тип «Плита», теорія Карпенка;
- варіант 2: РСЗ, тип «Плита», теорія Вуда (прапорець «Підбирати арматуру по теорії Вуда»).

7. У «Жорсткості та матеріали» створити тип «Пластина, $h = 15$ см»; задайте $E \approx 3,0 \times 10^6$ т/м², $\nu = 0,2$, $\rho \approx 2,75$ т/м³.

8. На вкладці З/Б для пластин задати: Вид розрахунку: Плита, бетон В20, арматура А–400С (поздовжня), А–240С (поперечна).

9. Призначити обрані жорсткості + матеріали всім елементам (спершу для варіанта Вуда, потім перемкнути на варіант Карпенка і призначити матеріали цього варіанта).

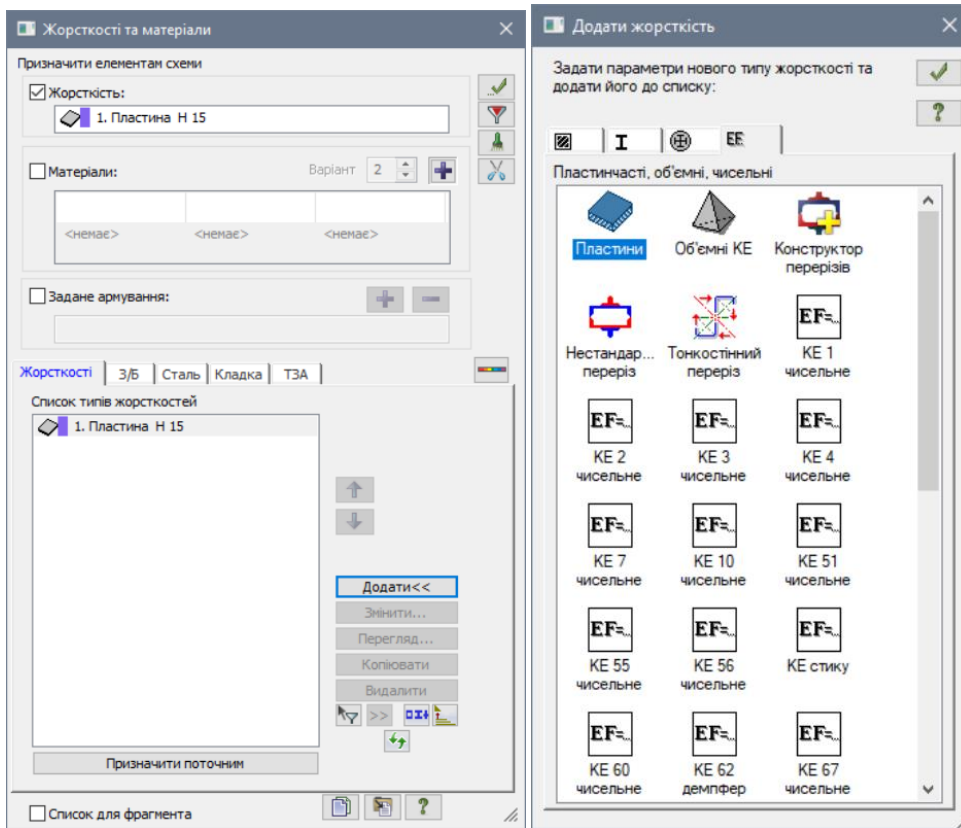


Рисунок 1.7 – Діалогові вікна «Жорсткості та матеріали» (ліворуч) та «Додати жорсткість» (праворуч)

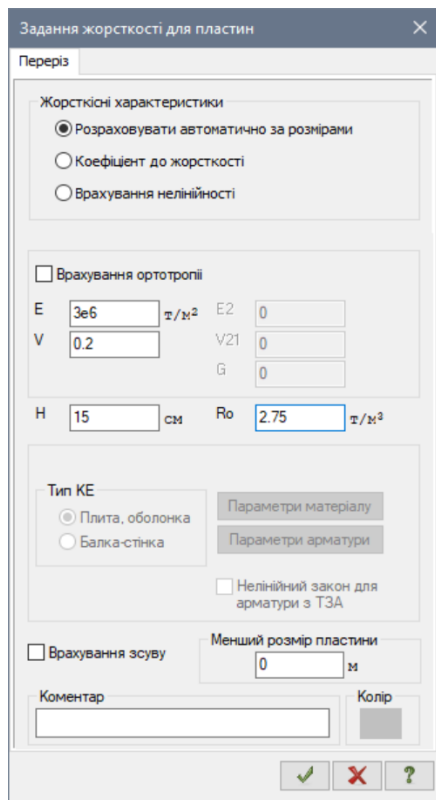


Рисунок 1.8 – Діалогове вікно «Задання жорсткості для пластин»
Навантаження.

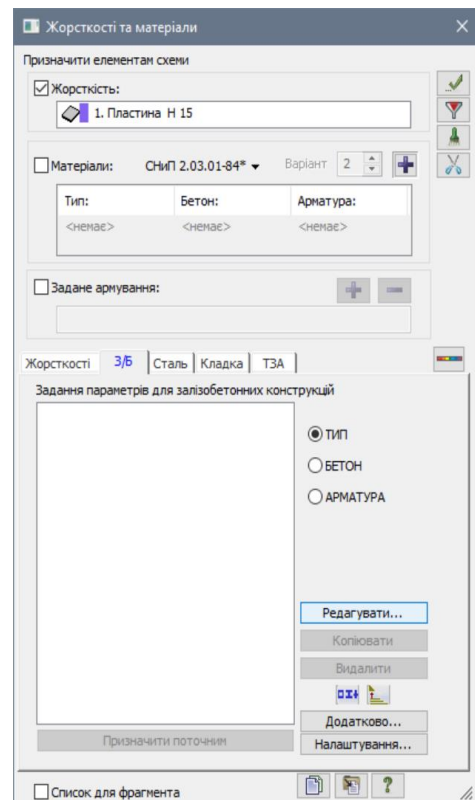


Рисунок 1.9 – Діалогове вікно «Жорсткості та матеріали»

10. Навантаження № 1 (власна вага): Навантаження → Додати власну вагу ($\gamma_f = 1$, «усі»).

11. Навантаження № 2 (вузлові $P = 1$ т): відмітити задані вузли; Навантаження на вузли → Зосереджена сила по Z (величина 1 т зі знаком «-») у глобальній Z, якщо прийнято вниз).

12. Навантаження № 3 (на пластини $P = 1$ т): відмітити задані елементи; Навантаження на пластини → Зосереджена сила з $A = B = 0,25$ м.

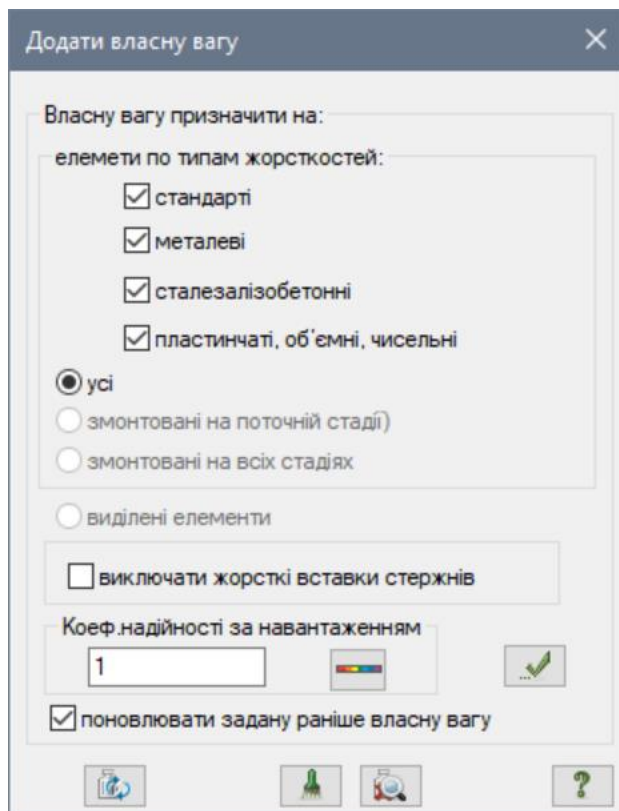


Рисунок 1.10 – Діалогове вікно «Додати власну вагу»

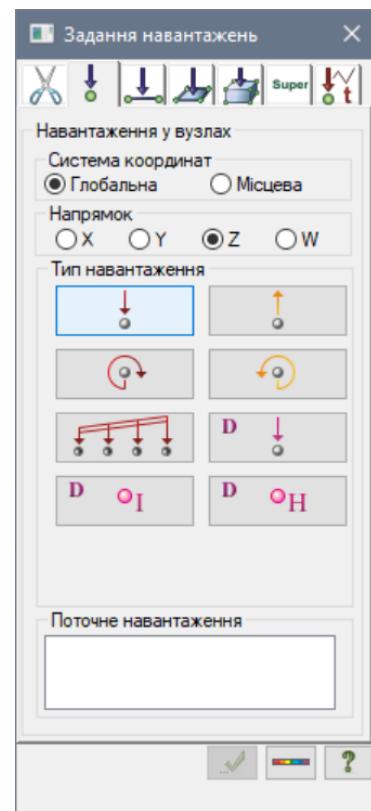


Рисунок 1.11 – Діалогове вікно «Задання навантажень»

13. У «Редакторі завантажень» призначити види: № 1 – Постійне, № 2 та № 3 – Тимчасове тривале.

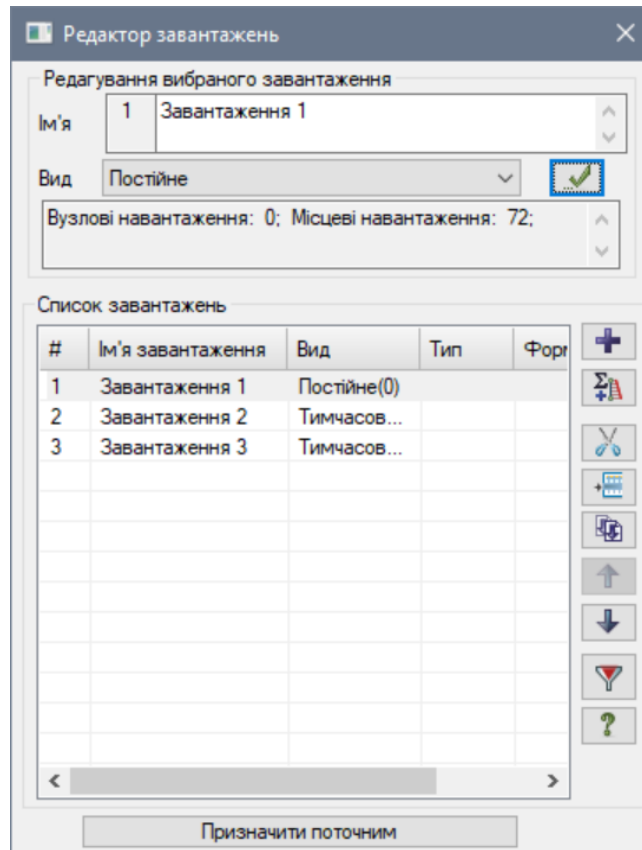


Рисунок 1.12 – Діалогове вікно «Редактор завантажень»

PC3, розрахунок, аналіз.

14. PC3: Розрахунок → Таблиця PCY/PC3 → «Заповнити за замовчуванням» (перевірити коефіцієнти для видів навантажень; за потреби відкоригувати).

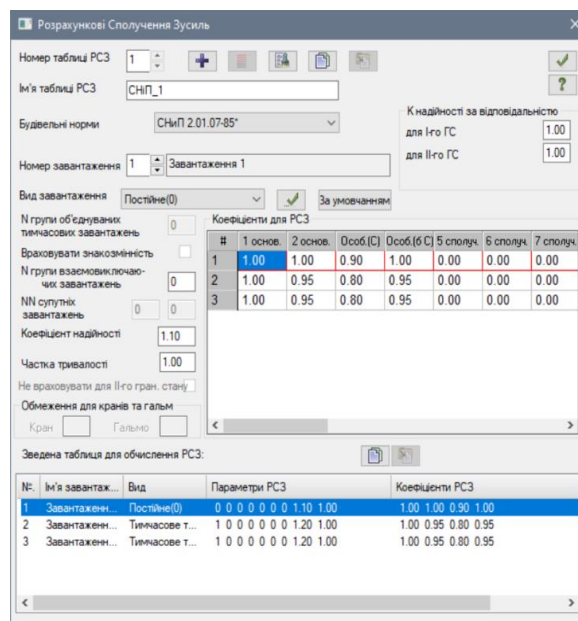


Рисунок 1.13 – Діалогове вікно «Розрахункові сполучення зусиль»

15. Повний розрахунок: Розрахунок → Виконати повний розрахунок.

16. Перегляд результатів (Аналіз):

- деформації (ізополя W_z);
- мозаїки M_x , M_y для пластин;
- стандартні таблиці (RSZ у пластинах) → у звіт/CSV.

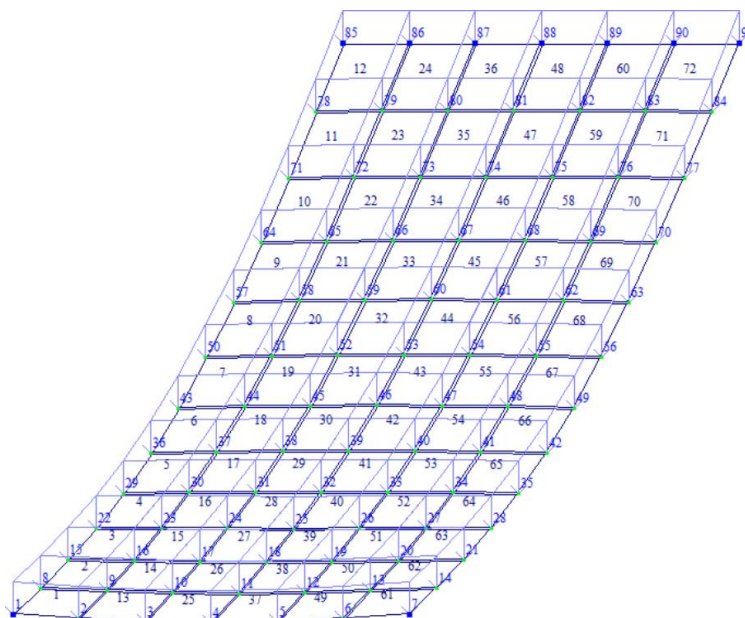


Рисунок 1.14 – Розрахункова схема з урахуванням переміщень вузлів

Підбір арматури та порівняння теорій.

17. Залізобетон → Армування пластин: переглянути нижню A_s уздовж X_1 та Y_1 ; точково – «Інформація про елемент».

18. Сформувати таблиці арматури в пластинах (для Варіант 1 і Варіант 2).

19. Перемкнути варіанти конструювання та порівняти карти A_s (Карпенко та Вуд) – відмітити відмінності в пікових зонах (біля опор / під зосередженими навантаженнями).

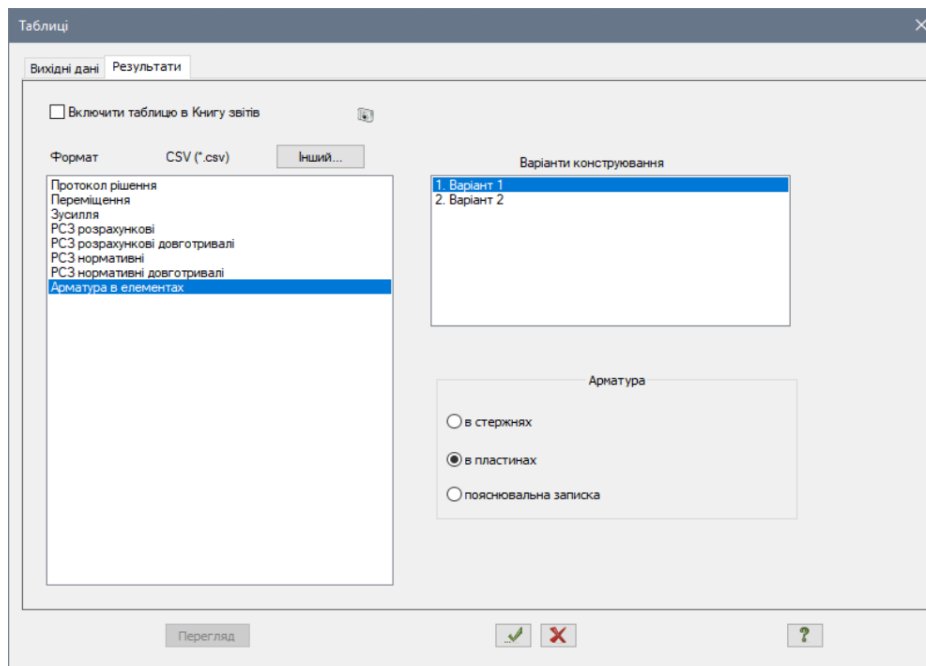


Рисунок 1.15 – Діалогове вікно «Таблиці»

Порада: перед порівнянням приховати «номери вузлів / елементів» і «навантаження», для більш чіткого сприйняття ізополів; масштаб мозаїк уніфікувати.

Типові помилки

- Плутанина з напрямом осі Z (знак навантаження).
- Непослідовне призначення матеріалів різним варіантам конструювання.
- Невірна ідентифікація вузлів/елементів при заданні $P = 1$ т.
- Неузгоджені види завантажень \rightarrow хибна таблиця РСЗ.
- Порівняння карт із різними шкалами.

Питання для самоперевірки

1. Як впливає схема спирання (вільний край та лінійна опора/точки) на розподіл M_x та M_y ?
2. Чому пікові A_s очікувано виникають біля опор/під зосередженими силами?

3. Чим відрізняються результати підбору за теорією Карпенка та Вуда для цієї плити і чому?
4. Яка комбінація РСЗ дала максимальні моменти? Де розташовані їхні максимальні та мінімальні значення?
5. Чому важливо уніфікувати масштаби мозаїк при порівнянні варіантів конструювання?
6. Як зміниться картина W_z , M_x , M_y та A_s , якщо замінити вузлові зосереджені сили на розподілені по майданчику?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2

Розрахунок двомірної залізобетонної рами (LIRA-FEM)

Мета завдання полягає у набутті та закріпленні практичних навичок створення розрахункової моделі плоскої залізобетонної рами з урахуванням опор, вузлів і елементів конструкції. У межах роботи передбачається опанування методики задання різних типів навантажень – вузлових та на стрижні – а також формування розрахункової схеми задачі (РСЗ) для подальшого виконання аналізу.

Додатковою метою є виконання повного розрахунку та підбору арматури елементів рами відповідно до чинних нормативних вимог. Особлива увага приділяється формуванню навичок інтерпретації результатів розрахунків, зокрема оцінки переміщень, визначення внутрішніх зусиль та аналізу потреби в арматурі.

Вихідні дані

1. Схема: двопролітна, двоповерхова залізобетонна рама у площині XOZ .
2. Проліт: $L_1 = L_2 = 6,0$ м.
3. Висота поверхів: $H_1 = H_2 = 3,0$ м.
4. Перерізи:
 - колони – 400 мм \times 400 мм;

- ригелі – 300 мм × 500 мм.
5. Матеріали: бетон С20/25, арматура А400С.
 6. Сітка вузлів: відповідно до розмірів прольотів і висот поверхів.
 7. Граничні умови: жорстке зацмлення в основі колон.
 8. Навантаження:
 - власна вага конструкцій;
 - тимчасове рівномірне розподілене навантаження на ригелі;
 - тимчасове зосереджене навантаження у вузлах.

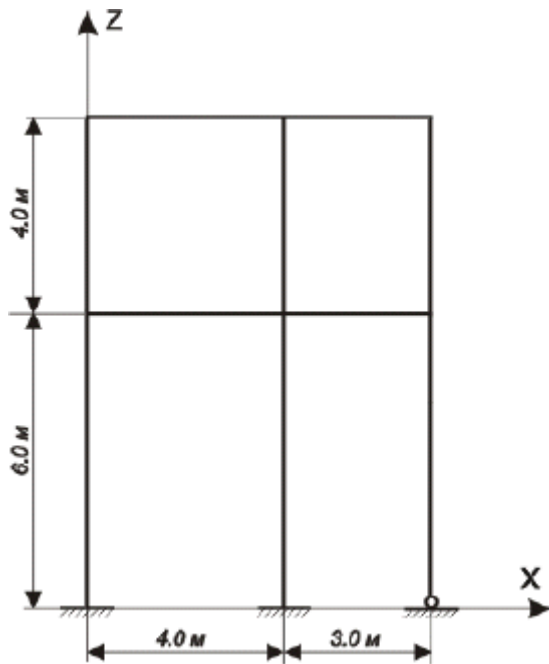


Рисунок 2.1 – Схема рами

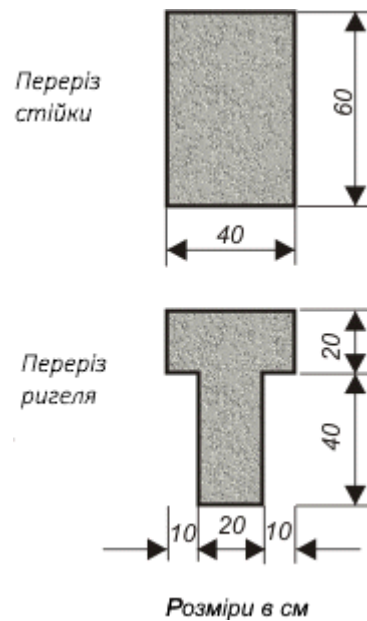


Рисунок 2.2 – Перерізи елементів рами

Алгоритм виконання

Підготовка задачі.

1. Створити нову задачу: Програми → Новий, $DOF = 3$ (U_x , U_y , φ) у площині XOZ .
2. Зберегти файл із назвою «Рама_2D».

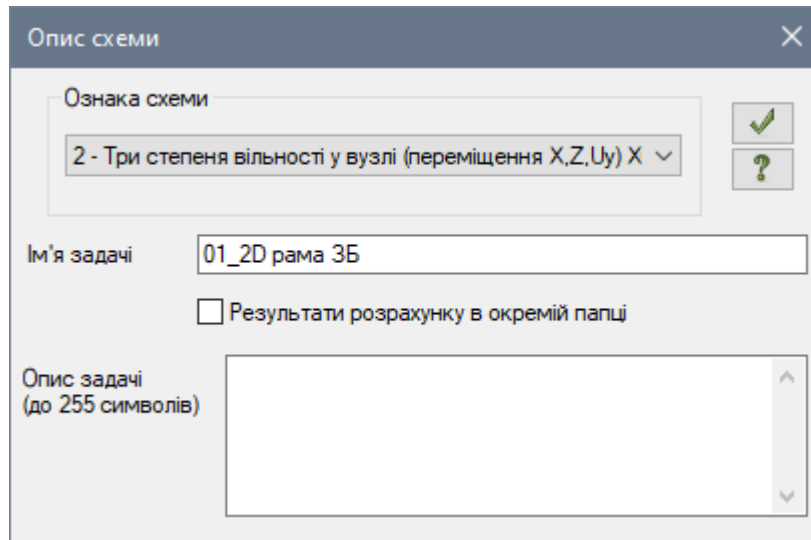


Рисунок 2.3 – Опис схеми

Побудова геометрії.

3. Створити вузли в координатах згідно з розмірами прольотів та висот.
4. З'єднати вузли стрижневими елементами: ригелі та колони.
5. Присвоїти елементам геометричні характеристики:
 - Жорсткості → Стрижень → h , b згідно з перерізами.

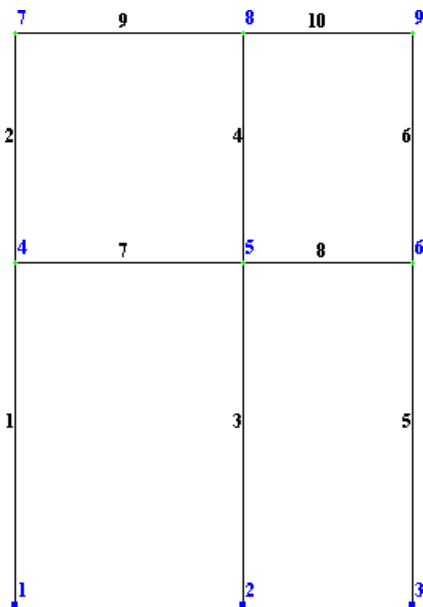


Рисунок 2.4 – Розрахункова схема

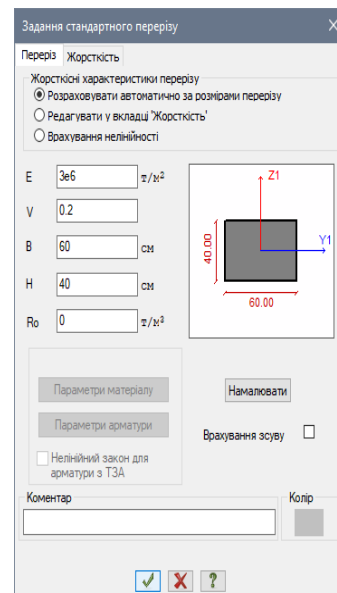


Рисунок 2.5 – Задання стандартного перерізу

Матеріали і конструювання.

6. Створити тип матеріалу: бетон C20/25, арматура A400С.

7. У «Варіантах конструювання» створити РСЗ для елементів типу «Балка» і «Колона» з відповідними класами бетону та арматури.
8. Призначити матеріали елементам.

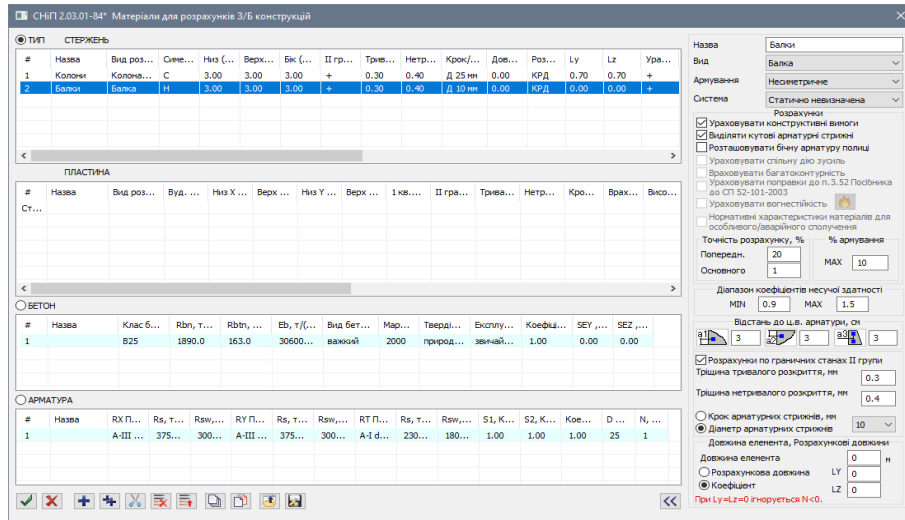


Рисунок 2.6 – Матеріали і конструювання

Граничні умови.

9. Призначити жорстке защемлення вузлам основи колон (заборона U_x, U_y, φ).

Навантаження.

10. Власна вага – автоматично ($\gamma_f = 1$, Постійне).
11. Рівномірно розподілене навантаження – на стрижні ригелів (тимчасове тривале).
12. Зосереджені сили – у вибраних вузлах (тимчасове тривале).

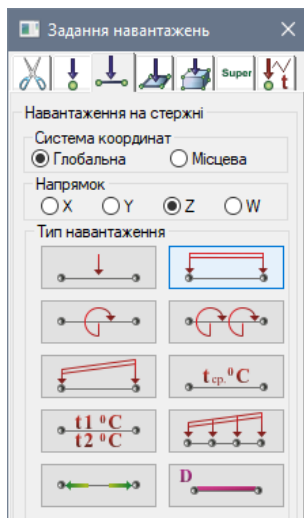


Рисунок 2.7 – Задання навантажень

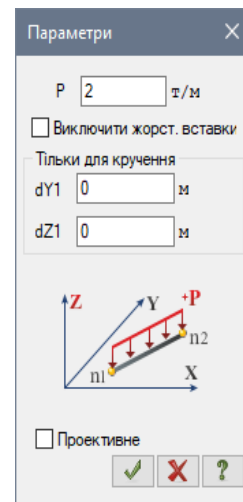


Рисунок 2.8 – Задання параметрів

PC3 та розрахунок.

13. Заповнити таблицю PC3 за замовчуванням, перевіривши коефіцієнти.

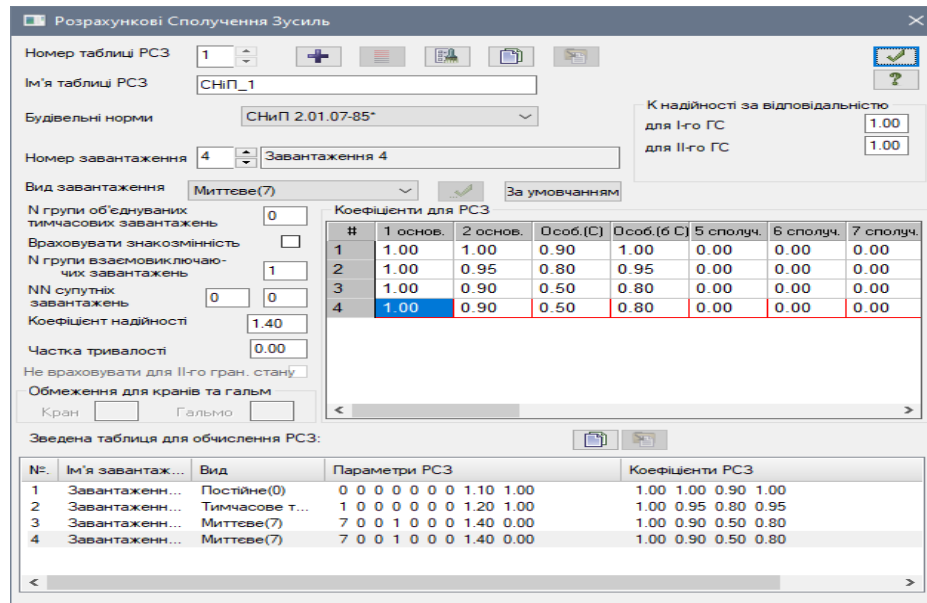


Рисунок 2.9 – Розрахункові сполучення зусиль

14. Виконати повний розрахунок.

15. Переглянути результати: переміщення, M, Q, N для елементів.

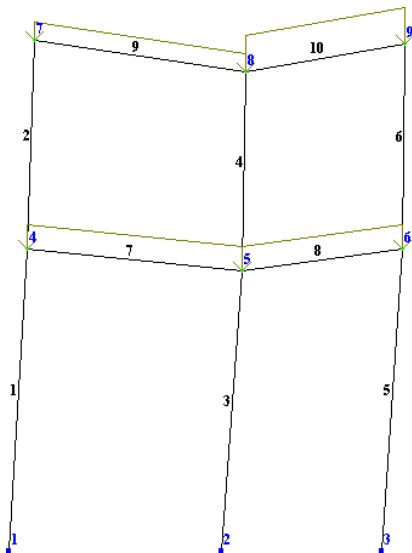


Рисунок 2.10 – Розрахункова схема з врахуванням переміщень вузлів

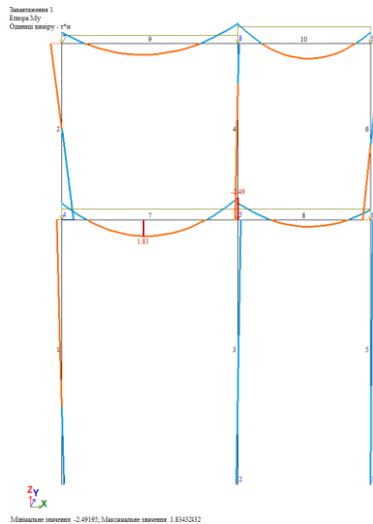


Рисунок 2.11 – Епюри згинальних моментів M_y

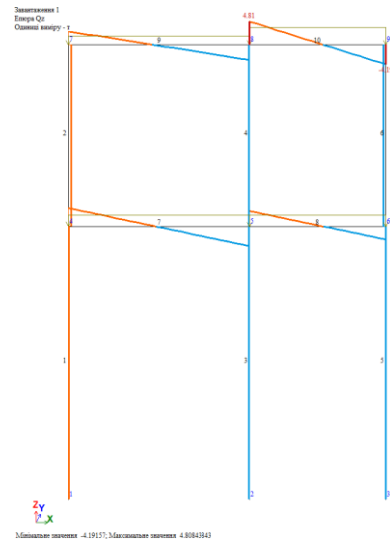


Рисунок 2.12 – Епюри поперечних сил Q_z

Підбір арматури.

16. Для колон і ригелів переглянути карти A_s (поздовжня, поперечна арматура).
17. Порівняти зусилля в елементах між прольотами й поверхами.

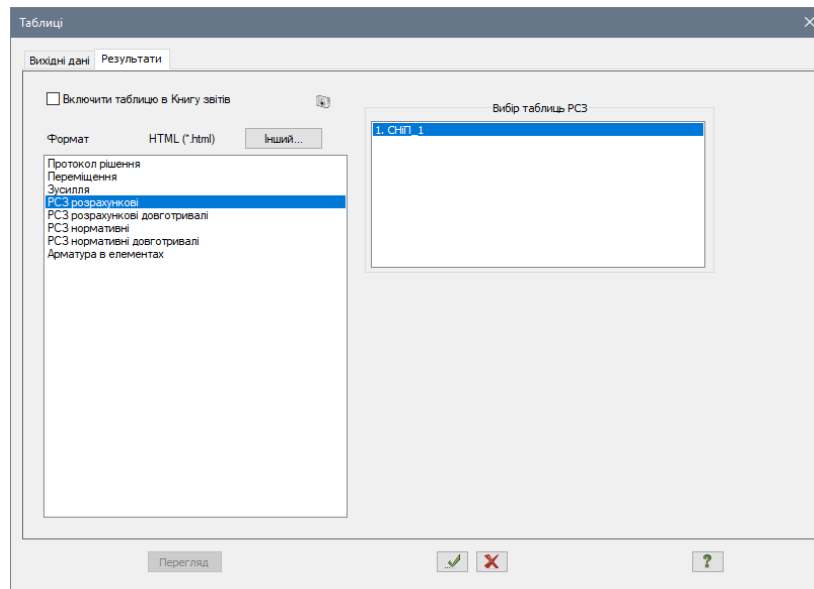


Рисунок 2.13 – Формування і перегляд таблиць результатів розрахунку

Аналіз результатів

18. Визначити максимальні моменти і поперечні сили.
19. Зробити висновки про роботу рами.

Питання для самоперевірки

1. Як впливає зміна висоти поверху на значення M і Q у ригелях?
2. Які особливості роботи жорстко защемленої рами порівняно з шарнірно опертою?
3. У яких елементах рами спостерігаються найбільші осьові сили N і чому?
4. Як розподіляється арматура у верхній і нижній зонах ригеля при рівномірному навантаженні?
5. Чому важливо розділяти постійні та тимчасові навантаження при формуванні РСЗ?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3

Розрахунок металеві вежі (LIRA-FEM)

Мета завдання полягає в опануванні методики побудови просторової стрижневої моделі металеві вежі з урахуванням конструктивних елементів, зокрема розпірок, поясів та систем зв'язків, що забезпечують просторову жорсткість конструкції. У рамках виконання роботи передбачається навчання правильному заданню просторових навантажень, включно з урахуванням власної ваги конструкції та впливу вітрового навантаження.

Також передбачається проведення розрахунку напружено-деформованого стану металеві вежі з подальшим підбором оптимальних перерізів металевих елементів відповідно до нормативних вимог. Важливою складовою завдання є формування навичок інтерпретації результатів розрахунку, що включає аналіз переміщень, визначення внутрішніх зусиль та перевірку стійкості конструкції.

Вихідні дані

1. Конструкція: чотиригранна просторово-стрижнева вежа.
2. Висота: $H = 30$ м.
3. Кількість секцій: 6 (по 5 м).
4. Геометрія основи: квадрат $4 \text{ м} \times 4 \text{ м}$.
5. Елементи:
 - вертикальні стійки – круглі труби $\text{Ø}159 \times 6$ мм (S355);
 - горизонтальні та діагональні зв'язки – труби $\text{Ø}89 \times 4$ мм (S355).
6. Граничні умови: шарнірне закріплення основи.
7. Навантаження:
 - власна вага (автоматично);
 - вітрове навантаження згідно з ДБН / Єврокод (наприклад, $q_0 = 0,3$ кПа на висоті 10 м з урахуванням коефіцієнтів);
 - додаткове зосереджене навантаження на верхній майданчик (антени, обладнання).

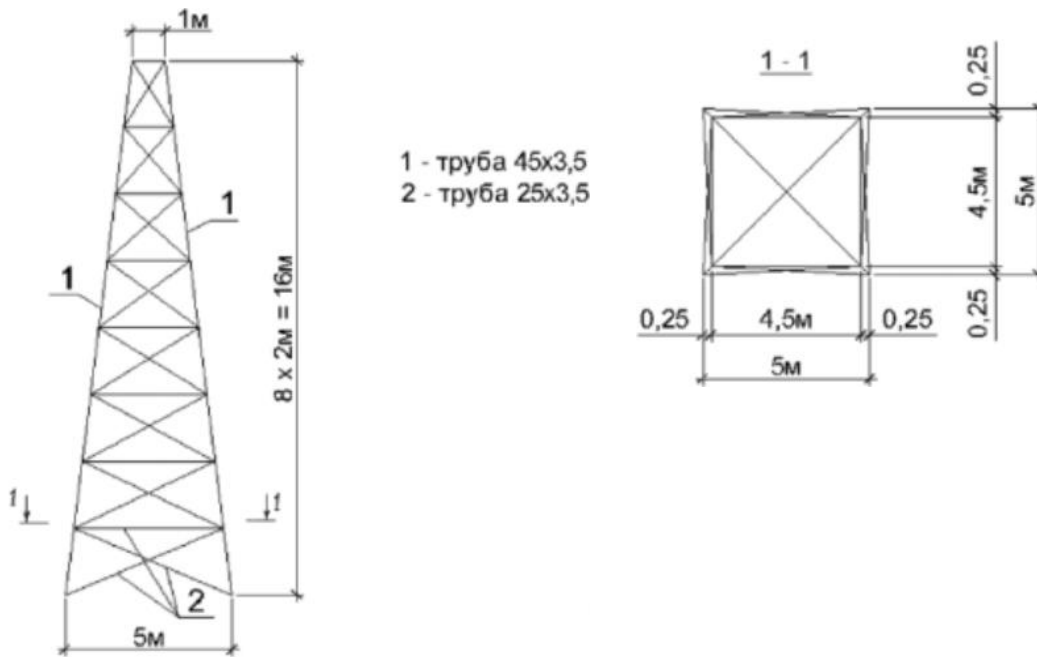


Рисунок 3.1 – Схема вежі

Алгоритм виконання

Створення задачі.

1. Новий проєкт: Просторова рама, $DOF = 6$.
2. Задати назву «Вежа_металева».

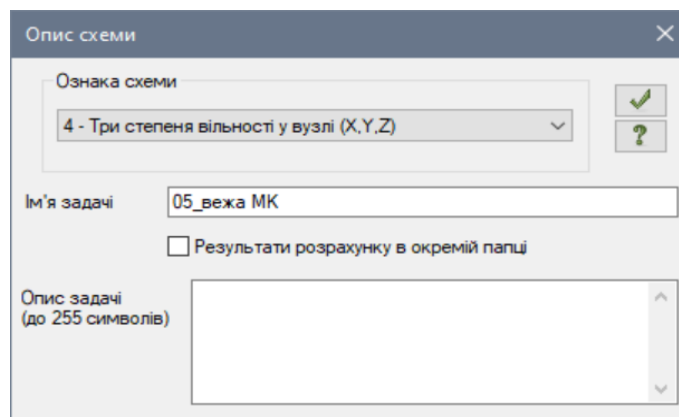


Рисунок 3.2 – Опис схеми

Геометрія.

3. Побудувати вузли основи (4 точки квадрата $4\text{ м} \times 4\text{ м}$).
4. Копіювати вузли вгору з кроком 5 м до висоти 30 м .
5. З'єднати вертикальні стійки між вузлами по кутах.
6. Додати горизонтальні зв'язки (по периметру кожної секції).

7. Додати діагональні зв'язки у площинах граней.

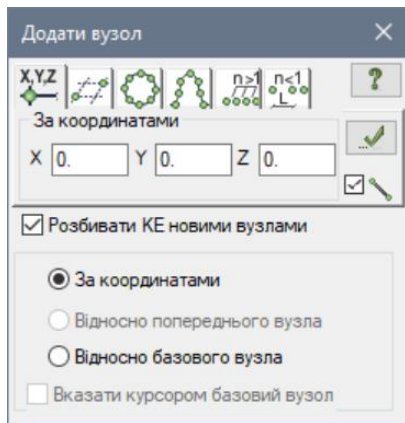


Рисунок 3.3 – Побудова вузлів основи

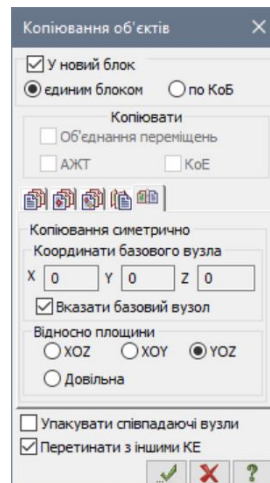


Рисунок 3.4 – Копіювання об'єктів

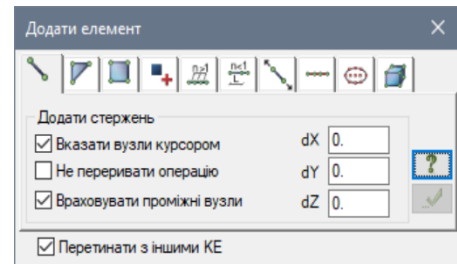


Рисунок 3.5 – Додавання елементів між вузлами

Матеріали і перерізи.

8. Створити матеріал S355 (модуль пружності, густина).
9. Призначити перерізи труб для стійок, горизонтальних та діагональних зв'язків.
10. Перевірити орієнтацію локальних осей.

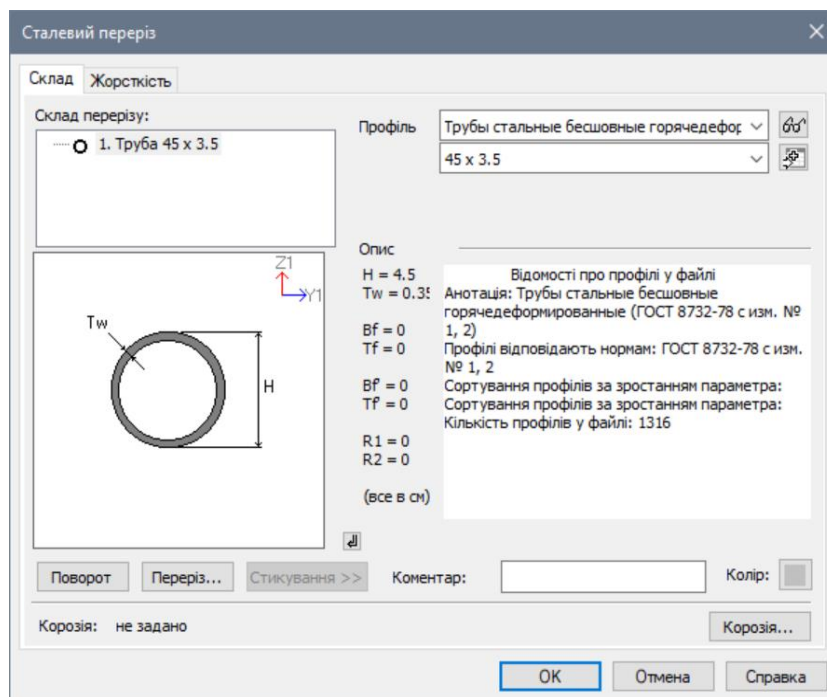


Рисунок 3.6 – Формування перерізів

Закріплення.

11. Шарнірне закріплення вузлів основи ($U_x, U_y, U_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ – фіксовані).

Навантаження.

12. Постійне: власна вага ($\gamma_f = 1$, Постійне).

13. Вітрове: лінійно розподілене навантаження по висоті на стійки, з урахуванням зміни тиску з висотою.

14. Зосереджене: на верхні вузли (обладнання).

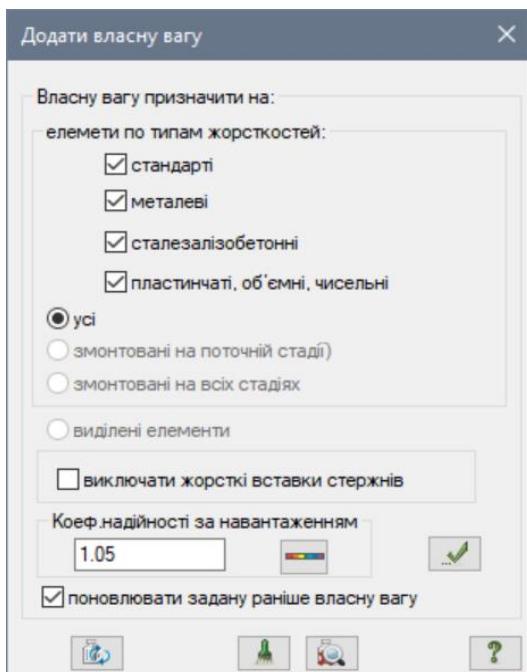


Рисунок 3.7 – Задання власної ваги

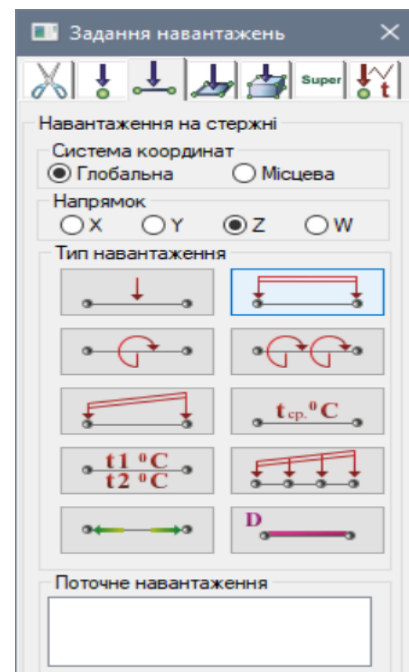


Рисунок 3.8 – Задання навантажень

РСЗ і розрахунок.

15. Створити РСЗ за Єврокодом:

- виконати розрахунок НДС;
- переглянути результати переміщень, M, N, Q .

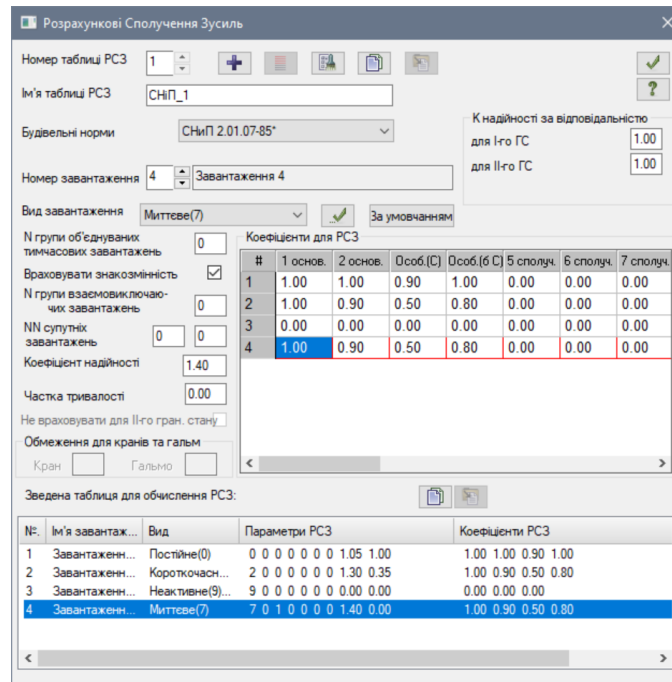


Рисунок 3.9 – Розрахункові сполучення зусиль

Перевірка і підбір перерізів.

18. Виконати підбір перерізів за нормами для стиснутих, розтягнутих та згинальних елементів.

19. Перевірити коефіцієнти використання міцності (≤ 1).

Аналіз результатів.

20. Визначити максимальні горизонтальні відхилення верхівки вежі.

21. Проаналізувати найбільш навантажені стрижні.

22. Зробити висновки щодо стійкості та ефективності конструкції.

Питання для самоперевірки

1. Як змінюється горизонтальне відхилення вежі при збільшенні висоти?
2. Які елементи найбільше сприймають вітрове навантаження?
3. Як впливають діагональні зв'язки на жорсткість конструкції?
4. Що таке коефіцієнт використання перерізу та як його інтерпретувати?
5. Чому важливо враховувати зміну тиску вітру з висотою?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 4

Розрахунок плоскої металевої рами (LIRA-FEM)

Мета завдання полягає в опануванні методики побудови плоскої стрижневої моделі сталеві рами з урахуванням прольотів, висот та жорсткісних характеристик її елементів. У межах виконання роботи передбачається засвоєння принципів правильного задання різних видів навантажень для плоскої моделі, зокрема постійних, тимчасових, снігових та вітрових.

Також важливим етапом є проведення розрахунку напружено–деформованого стану конструкції та перевірки міцності елементів відповідно до нормативних вимог. Завдання передбачає формування навичок аналізу результатів, включно з оцінкою переміщень, визначенням внутрішніх зусиль та підбором оптимальних перерізів елементів сталеві рами.

Вихідні дані

1. Конструкція: однопрольотна плоска рама.
2. Проліт: $L = 24$ м.
3. Висота в колоні: 6 м.
4. Матеріал: сталь S355.
5. Елементи:
 - колони – двотавр IPE 300;
 - ригель – двотавр IPE 400.
6. Закріплення: шарнірне в основах колон.
7. Навантаження:
 - власна вага конструкції;
 - постійне навантаження від покриття: $0,8$ кН/м²;
 - снігове навантаження згідно з ДБН / Єврокод;
 - вітрове навантаження (для плоскої схеми – горизонтальне зосереджене чи розподілене).

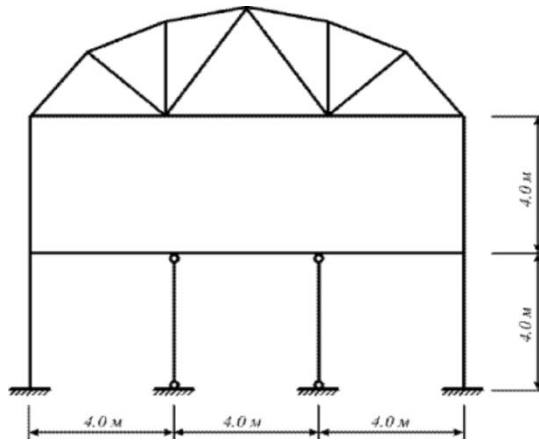


Рисунок 4.1 – Схема поперечного перетину будівлі

Алгоритм виконання

Створення задачі.

1. Створити новий проєкт Пласка рама, $DOF = 3$.
2. Встановити одиниці вимірювання – кН, м, $^{\circ}\text{C}$.

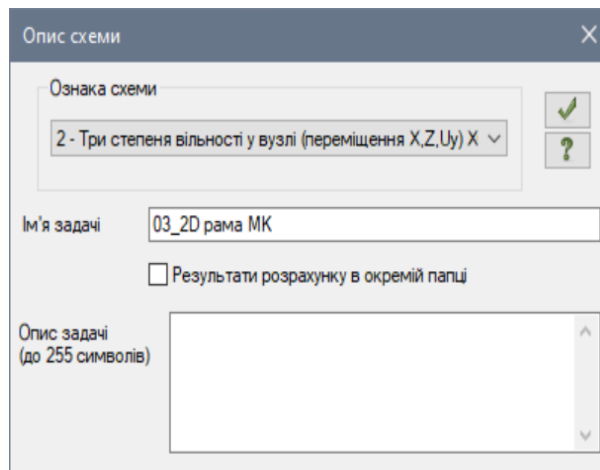


Рисунок 4.2 – Опис схеми

Геометрія.

3. Задати вузли колон у координатах $(0;0)$, $(L;0)$ та вузли верху колон на висоті 6 м.
4. З'єднати колони та ригель у єдину рамну схему.

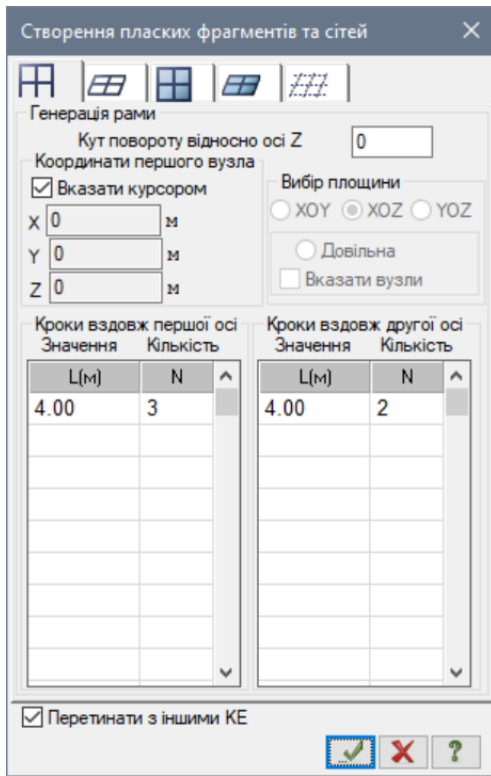


Рисунок 4.3 – Створення геометричної схеми

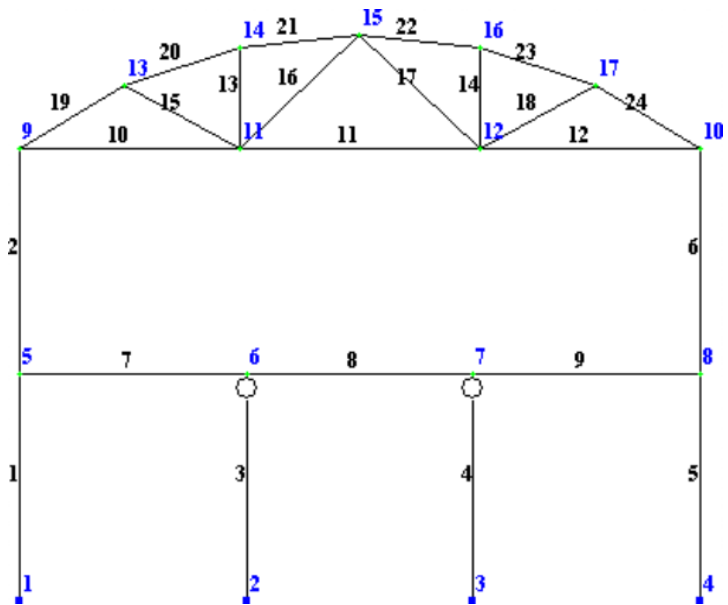


Рисунок 4.4 – Розрахункова схема

Матеріали і перерізи.

5. Створити матеріал S355 ($E = 2,1 \times 10^5$ МПа, $\gamma = 78,5$ кН/м³).
6. Призначити перерізи IPE 300 для колон, IPE 400 для ригеля.

Закріплення.

7. У вузлах основи колон – шарнірне закріплення ($U_x = U_y = \varphi_z = 0$).

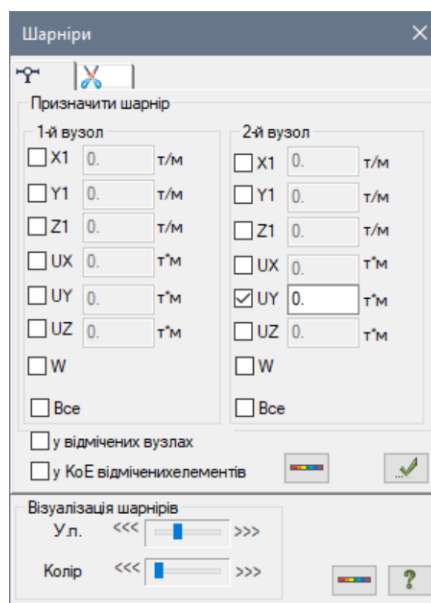


Рисунок 4.5 – Встановлення закріплення

Навантаження.

8. Власна вага – автоматично.
9. Постійне навантаження – рівномірно розподілене по ригелю.
10. Снігове – розрахувати за нормативом і задати розподіл на ригель.
11. Вітрове – горизонтальне навантаження на колони.

Розрахунок і РСЗ.

12. Створити розрахункові комбінації навантажень за Єврокодом.
13. Виконати розрахунок НДС.
14. Переглянути переміщення, зусилля M, N, Q.

Перевірка та підбір перерізів.

15. Виконати перевірку за нормами (стійкість, міцність).

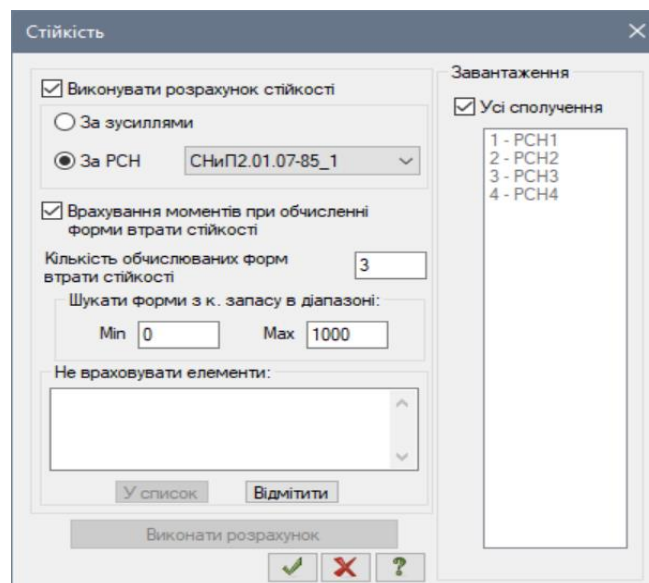


Рисунок 4.6 – Задання параметрів для розрахунку рами на стійкість

16. За необхідності змінити перерізи для забезпечення коефіцієнта використання ≤ 1 .

Аналіз результатів.

17. Визначити максимальний прогин ригеля.
18. Проаналізувати розподіл моментів у колоні та ригелі.
19. Зробити висновки щодо достатності жорсткості.

Питання для самоперевірки

1. Як впливає висота колон на прогин ригеля?
2. Чому при шарнірному закріпленні основ колон момент у основі дорівнює нулю?
3. Як зміниться розподіл моментів при збільшенні прольоту?
4. Що означає коефіцієнт використання перерізу 0,95?
5. Чому важливо перевіряти як міцність, так і стійкість елементів?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5

Розрахунок циліндричного залізобетонного резервуару

Мета завдання полягає у набутті практичних навичок побудови об'ємної моделі тонкостінної циліндричної оболонки в програмному комплексі LIRA-FEM з урахуванням особливостей просторової роботи конструкції. У межах виконання роботи передбачається освоєння налаштування жорсткісних характеристик оболонкових елементів для коректного моделювання залізобетонних стін резервуару.

Важливими етапами є задання граничних умов, навантажень від гідростатичного тиску та власної ваги, а також виконання розрахунку напружено – деформованого стану конструкції. Завдання передбачає проведення аналізу отриманих результатів, включно з оцінкою напружень, переміщень та зусиль у стінці резервуару, а також ознайомлення з принципами перевірки міцності оболонкових конструкцій відповідно до чинних норм.

Вихідні дані

1. Діаметр внутрішній: 12 м.
2. Висота стінки: 8 м.
3. Товщина стінки: 200 мм.

4. Матеріал: бетон класу С30/37 ($E = 30\,000$ МПа, $\gamma = 25$ кН/м³).
5. Закріплення: жорстке зацмлення у вузлах нижнього кільця стінки.
6. Навантаження:
 - власна вага конструкції;
 - гідростатичний тиск води по висоті (від 0 на верху до максимуму внизу).

Алгоритм виконання

Створення задачі.

1. Створити новий проєкт у режимі Оболонкові елементи з одиницями вимірювання – м, кН.
2. Вказати параметри моделі (розрахунок у фізично лінійній постановці).

Побудова геометрії.

3. Створити замкнене коло радіусом 6 м у плані.
4. Розбити коло на 36–72 сегменти (залежно від бажаної точності).
5. Виконати екструзію (копіювання по висоті) до 8 м з розбиттям по висоті на 8–16 поясів.

Пояснення: чим дрібніша сітка, тим точніший розрахунок, але більше обсяг обчислень.

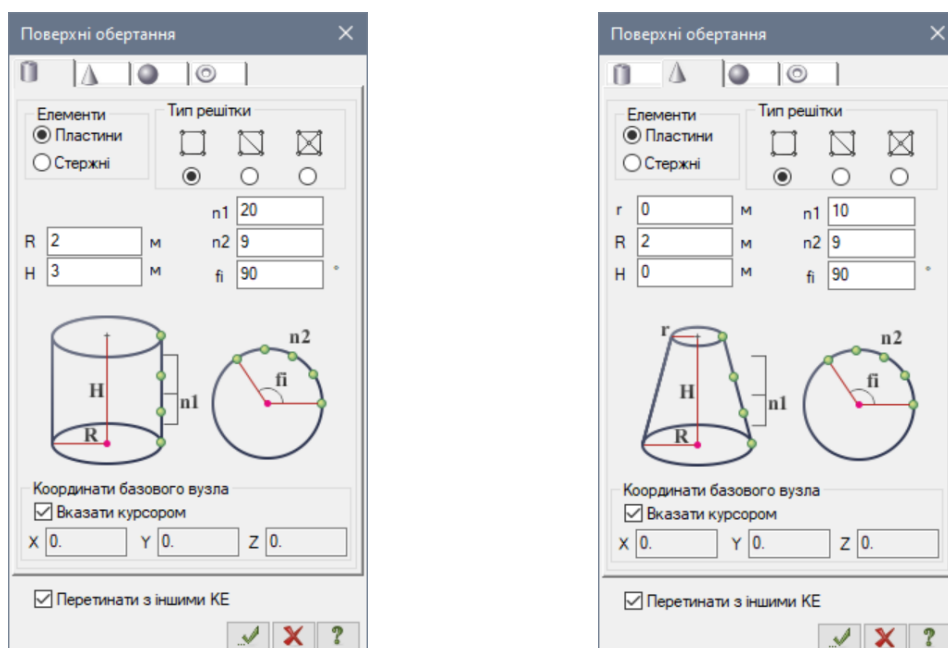


Рисунок 5.1 – Створення геометричної схеми

Задання матеріалів і жорсткостей.

6. Створити матеріал С32/40, призначити модуль пружності, густину, коеф. Пуассона.
7. Додати жорсткість «Оболонка» з товщиною 0,2 м.
8. Призначити цю жорсткість усім елементам стінки.

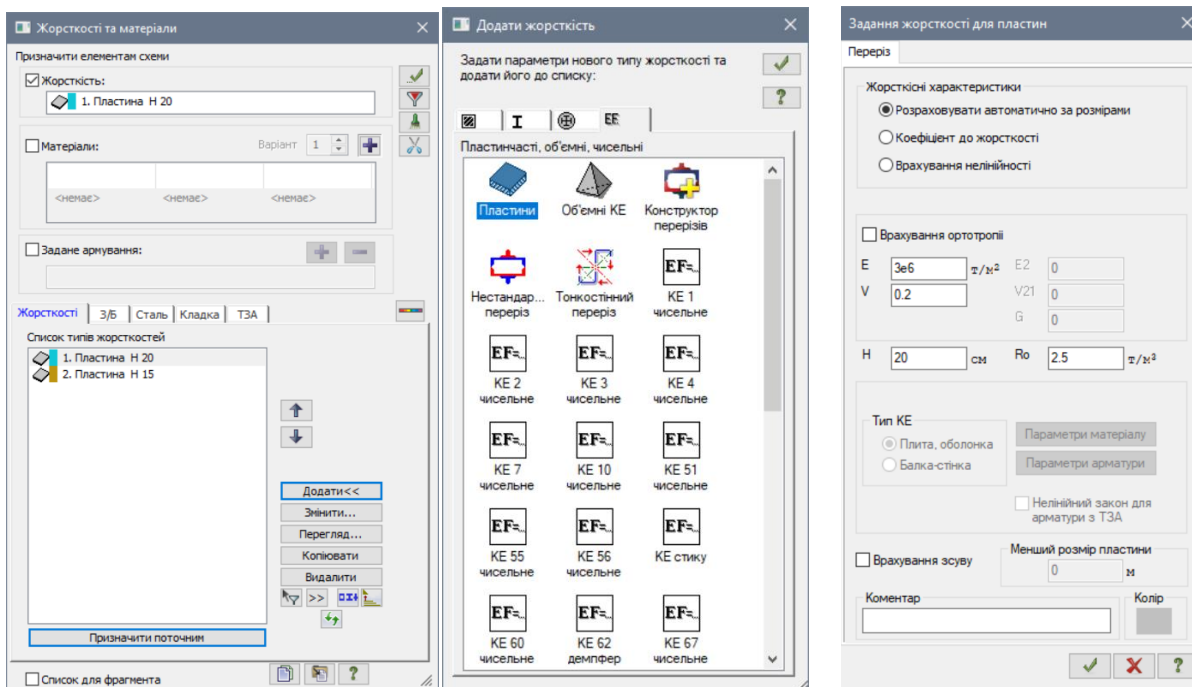


Рисунок 5.2 – Задання параметрів жорсткості і параметрів матеріалів елементам резервуара

Граничні умови.

9. У вузлах нижнього кільця зафіксувати переміщення по X, Y, Z.
10. Забезпечити сумісність вузлів у напрямку тангенційних зсувів (якщо необхідно).

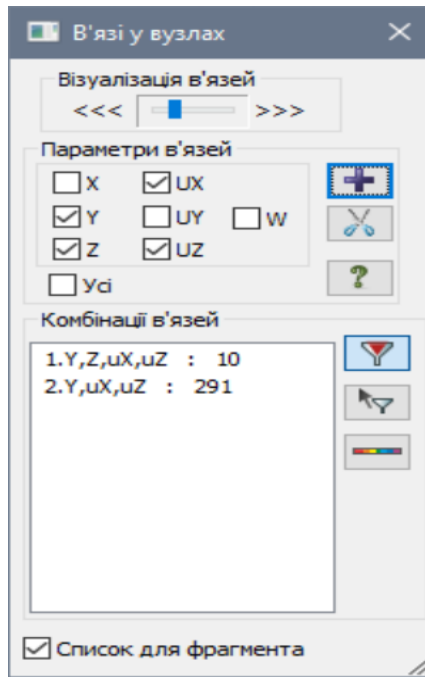


Рисунок 5.3 – Задання граничних умов

Навантаження

11. Включити власну вагу конструкції.
12. Задати навантаження від гідростатичного тиску:
 - увімкнути режим оболонкових елементів;
 - створити навантаження з лінійною зміною інтенсивності по висоті від 0 кН/м^2 (верх) до $\gamma \times h$ (низ).
13. Розмістити навантаження на внутрішню поверхню стінки.

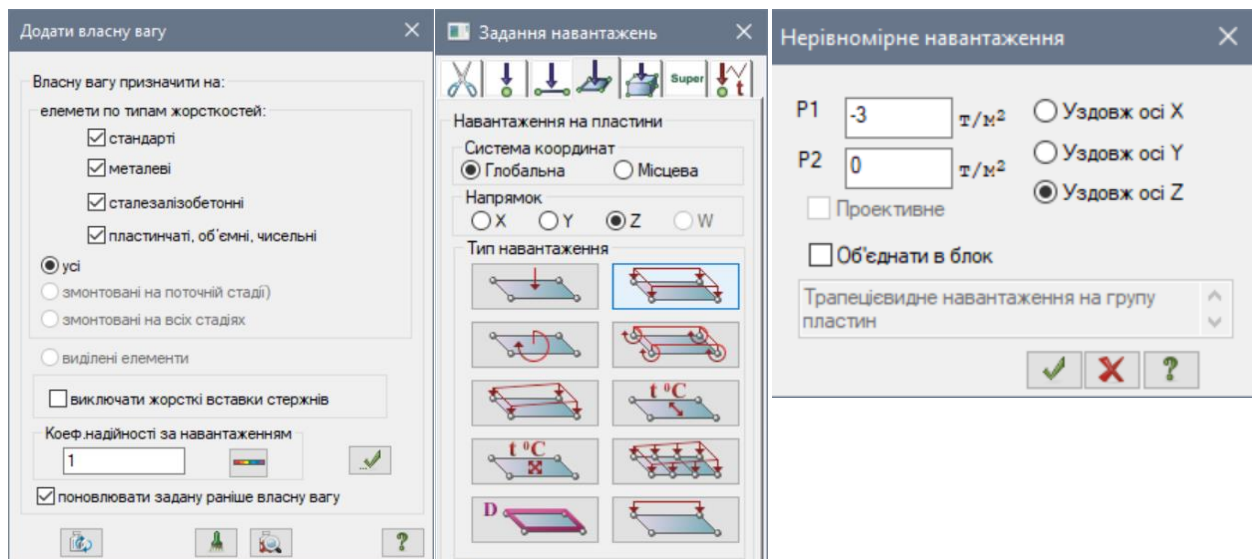


Рисунок 5.4 – Задання навантажень

Розрахунок і аналіз результатів.

14. Сформувати навантажувальні стани і комбінації.
15. Виконати розрахунок.
16. Переглянути:
 - карти переміщень (радіальні, вертикальні);
 - карти мембранних та згинальних напружень;
 - розподіл зусиль по висоті.

Завантаження 2
Ізополя переміщень по X(L)
Одиничні виміру - мм

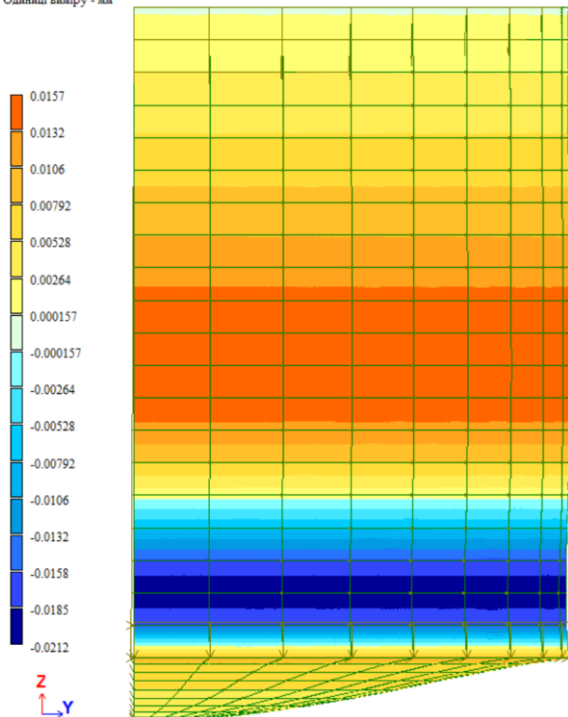


Рисунок 5.5 – Ізополя переміщень за напрямом локальної осі X

Завантаження 2
Ізополя переміщень по Z(G)
Одиничні виміру - мм

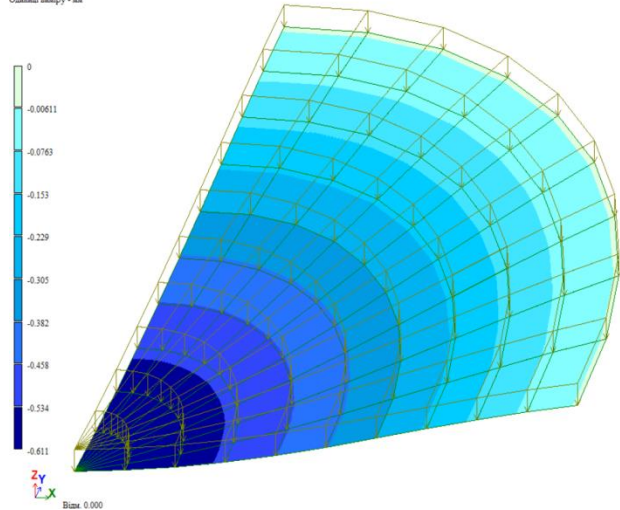


Рисунок 5.6 – Ізополя переміщень за напрямом глобальної осі Z

Перевірка міцності.

17. Виконати перевірку елементів оболонки за нормативами (бетон на розтяг і стиск).
18. Визначити критичні ділянки для армування (зона біля основи, стики).

Питання для самоперевірки

1. Як впливає крок розбиття сітки на точність розрахунку оболонки?

2. Чому у зоні основи резервуару виникають найбільші мембранні напруження?
3. Як зміниться розподіл напружень, якщо товщину стінки збільшити?
4. Чим відрізняються мембранні та згинальні напруження в оболонках?
5. Чому при розрахунку враховують лише внутрішній гідростатичний тиск?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 6

Розрахунок щогл в геометрично нелінійній постановці

Мета завдання полягає у набутті практичних навичок побудови просторової стрижневої моделі щогли в програмному комплексі LIRA-FEM з урахуванням особливостей роботи гнучких конструкцій. У межах роботи передбачається освоєння методики налаштування геометрично нелінійного розрахунку, що дозволяє врахувати вплив деформацій на напружено-деформований стан системи.

Важливими етапами є задання навантажень від вітру, власної ваги та монтажних тросів (відтяжок), а також аналіз впливу геометричної нелінійності на переміщення та внутрішні зусилля в елементах щогли.

Вихідні дані

1. Висота щогли: 40 м.
2. Схема: три яруси відтяжок, крок по висоті – 13,3 м.
3. Матеріал: сталь С245, $E = 2 \times 10^5$ МПа, $\gamma = 78,5$ кН/м³.
4. Закріплення: вузли нижнього кільця щогли – жорстке защемлення.
5. Навантаження:
 - власна вага;
 - вітрове навантаження за ДБН або Єврокодом;
 - попереднє натягування відтяжок.

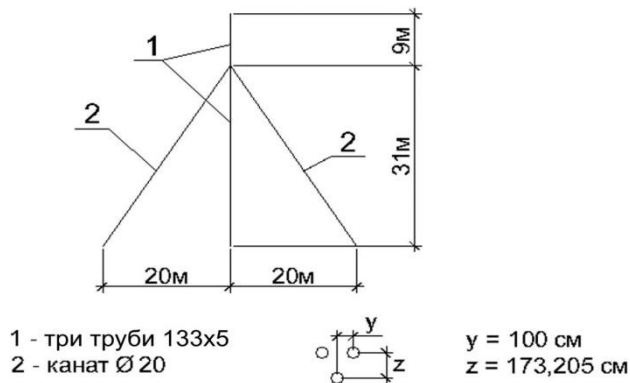


Рисунок 6.1 – Схема щогли

Алгоритм виконання

Створення задачі.

1. Вибрати одиниці: м, кН.
2. У налаштуваннях увімкнути геометрично нелінійний розрахунок.

Побудова геометрії.

3. Створити вертикальну вісь (лінію) з висотою щогли.
4. Розбити її на ділянки за розташуванням вузлів кріплення відтяжок.
5. Створити три яруси відтяжок, з'єднавши відповідні вузли з точками кріплення на ґрунті під кутом.

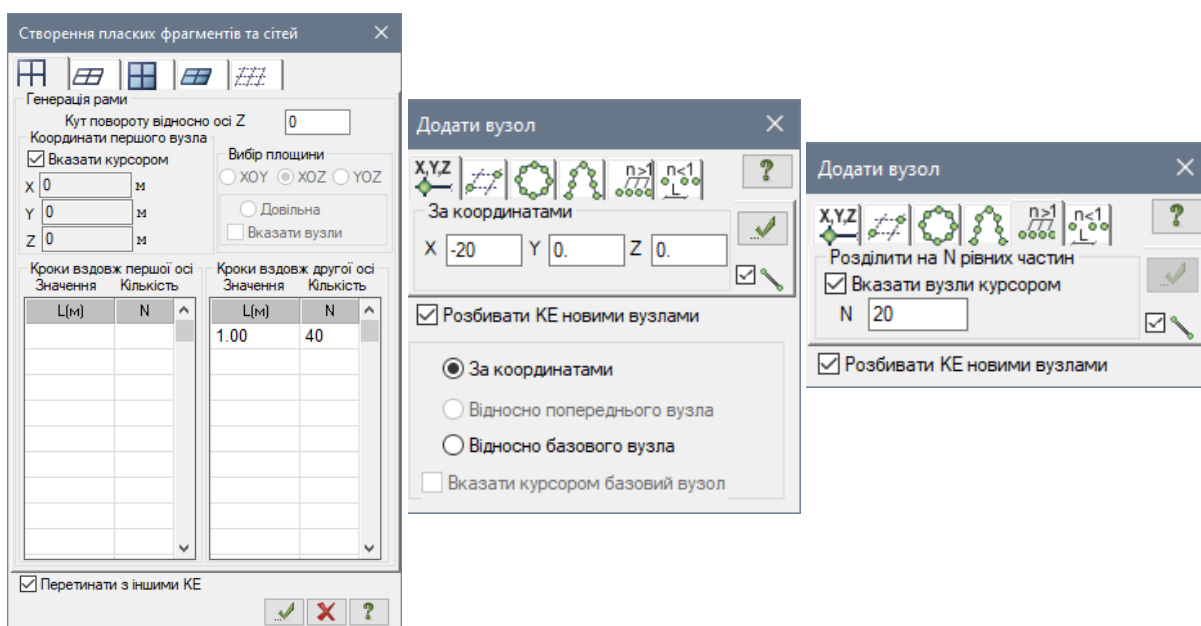


Рисунок 6.2 – Створення геометричної схеми щогли

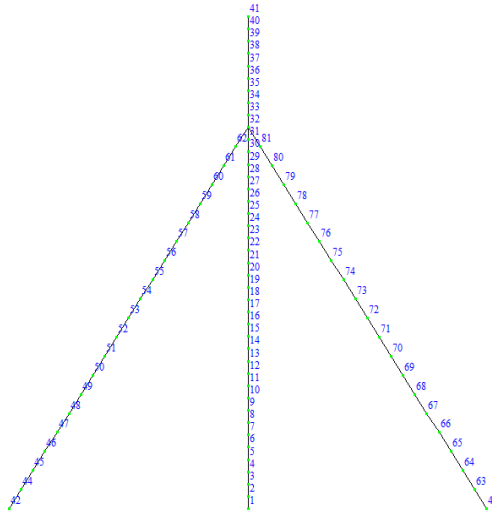


Рисунок 6.3 – Розрахункова схема щогли

Матеріали та жорсткості.

6. Додати матеріал «Сталь С245» з модулем пружності 2×10^5 МПа.
7. Призначити жорсткості стрижнів щогли (труба / кутник за сортаментом).
8. Призначити жорсткості тросів відтяжок (з урахуванням їх діаметра).

Граничні умови.

9. Зафіксувати вузли основи по X, Y, Z.
10. Для відтяжок вказати можливість роботи лише на розтяг (кабельні елементи).

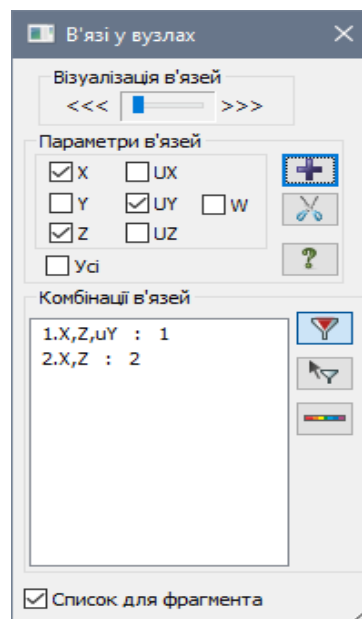


Рисунок 6.4 – Задання граничних умов у вузлах

Навантаження.

11. Додати власну вагу.
12. Задати вітрове навантаження: рівномірно або зі зміною по висоті згідно з нормативами.
13. Для відтяжок задати початкове натягування (через попереднє переміщення або навантаження).

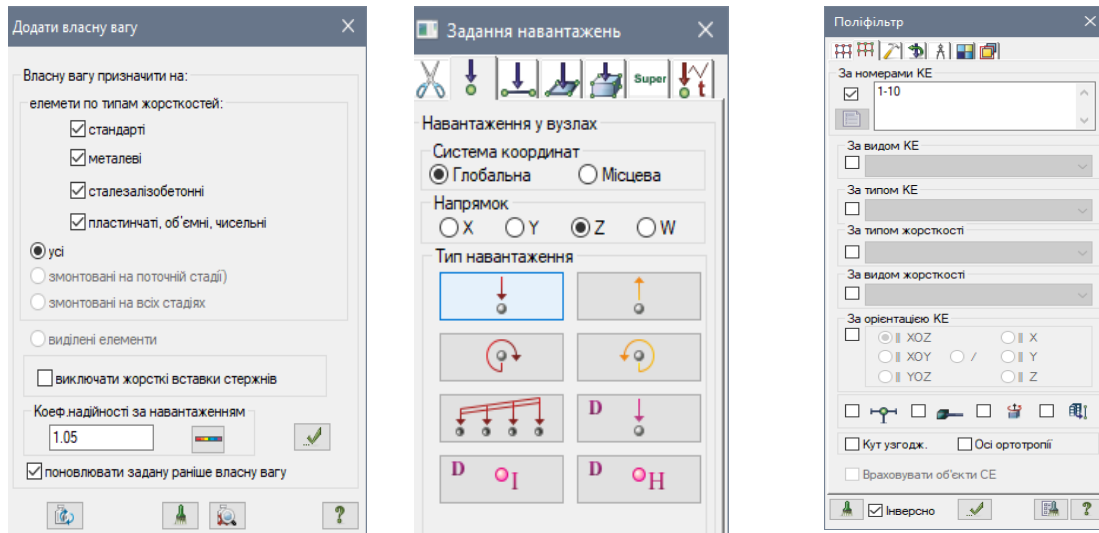


Рисунок 6.5 – Задання навантажень

Розрахунок.

14. Виконати лінійний розрахунок (для порівняння).
15. Виконати геометрично нелінійний розрахунок з урахуванням зміни форми.

Аналіз результатів.

16. Порівняти переміщення верхівки щогли у лінійній та нелінійній постановках.
17. Переглянути розподіл зусиль у відтяжках і стрижнях щогли.
18. Визначити вплив геометричної нелінійності на розрахункові напруження.

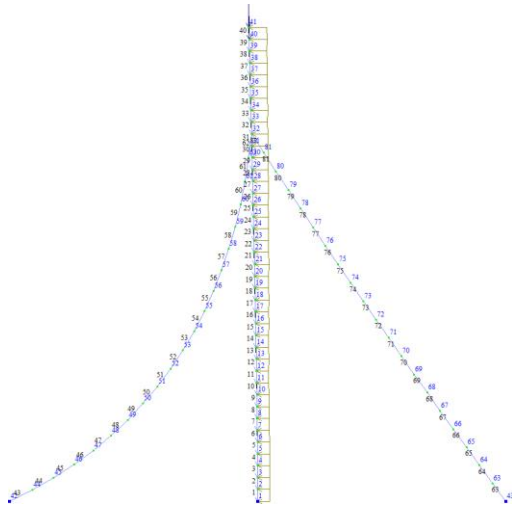


Рисунок 6.6 – Деформована форма конструкції після нелінійного розрахунку

Питання для самоперевірки

1. Чому гнучкі конструкції необхідно розраховувати з урахуванням геометричної нелінійності?
2. Як початкове натягування відтяжок впливає на стійкість щогли?
3. Чим відрізняється робота тросів у лінійній та нелінійній постановках?
4. Як зміниться розрахунок, якщо відтяжки моделювати як стрижні з роботою на стиск і розтяг?
5. Які параметри сітки розрахункової моделі найбільше впливають на точність результатів?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 7

Розрахунок просторового каркаса з фундаментною плитою на пружній основі

Мета завдання полягає у набутті практичних навичок моделювання просторового каркаса будівлі у поєднанні з фундаментною плитою в програмному середовищі. У межах роботи передбачається вивчення методики

врахування взаємодії системи «основа – фундамент» шляхом використання коефіцієнта постелі для моделювання пружних властивостей ґрунтової основи.

Передбачено освоєння застосування пластинчастих елементів для моделювання фундаментної плити та стрижневих елементів – для колон і ригелів каркаса. Важливою складовою є виконання розрахунку просторової моделі з подальшим аналізом переміщень, внутрішніх зусиль та напружень у конструктивних елементах.

Вихідні дані

1. Габарити будівлі: 18 м × 12 м, висота поверху – 3,6 м, кількість поверхів – 3.
2. Матеріал: залізобетон С20/25, арматура класу А500С.
3. Коефіцієнт постелі: $k = 50\,000 \text{ кН/м}^3$.
4. Закріплення: фундаментна плита на пружній основі.
5. Навантаження:
 - постійні (власна вага конструкцій);
 - тимчасові тривалі (експлуатаційні навантаження на перекриття);
 - вітрове навантаження.

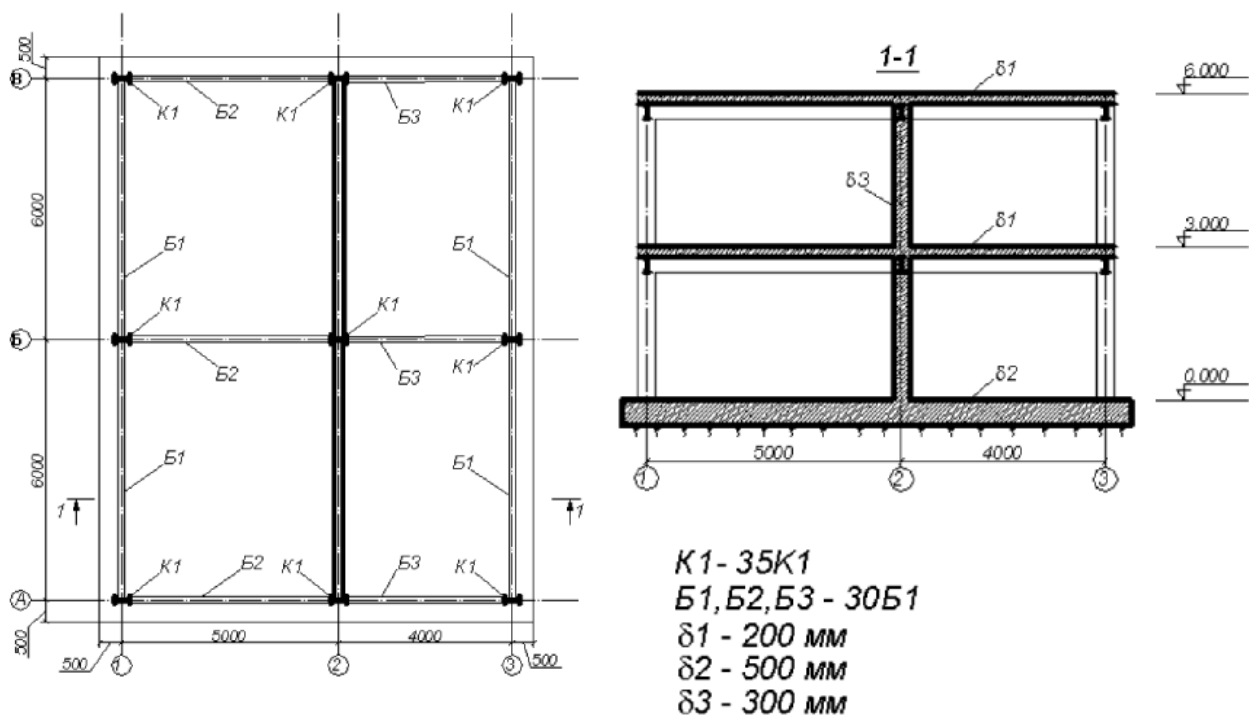


Рисунок 7.1 – Схема каркаса будівлі

Алгоритм виконання

Створення задачі та вибір одиниць.

1. Задати систему в м, кН.
2. У налаштуваннях передбачити використання пластинчастих елементів для плити.

Побудова геометрії просторового каркаса.

3. Задати координати осей колон.
4. Побудувати колони (стрижневі елементи) і ригелі (стрижневі елементи по верхніх поверхах).
5. Створити сітку фундаментної плити (пластинчасті елементи) з розбивкою 1–1,5 м.

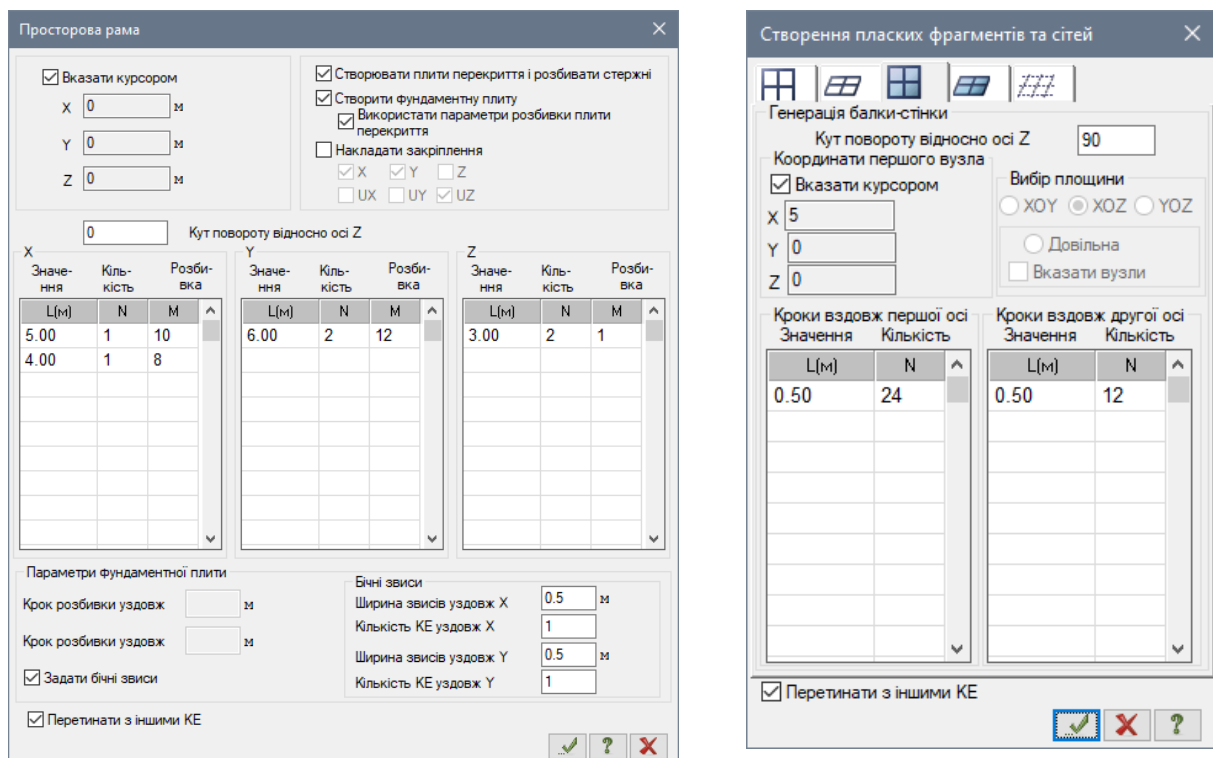


Рисунок 7.2 – Створення геометричної схеми

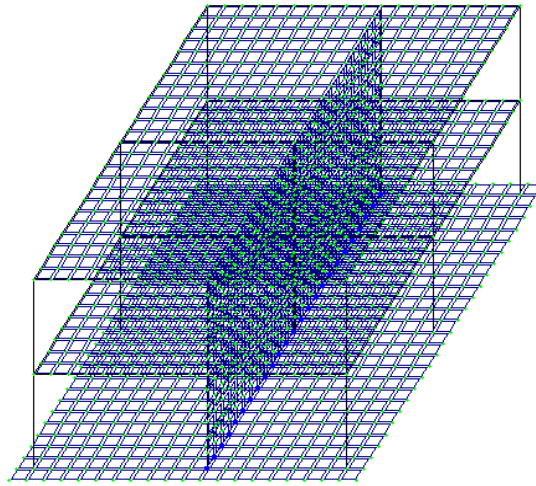


Рисунок 7.3 – Розрахункова схема каркаса

Матеріали та жорсткості.

6. Додати матеріал «ЗБ С20/25» для колон і плити.
7. Призначити перерізи стрижнів (колон, ригелів) за заданими розмірами.
8. Для плити вказати товщину (наприклад, 0,4 м).

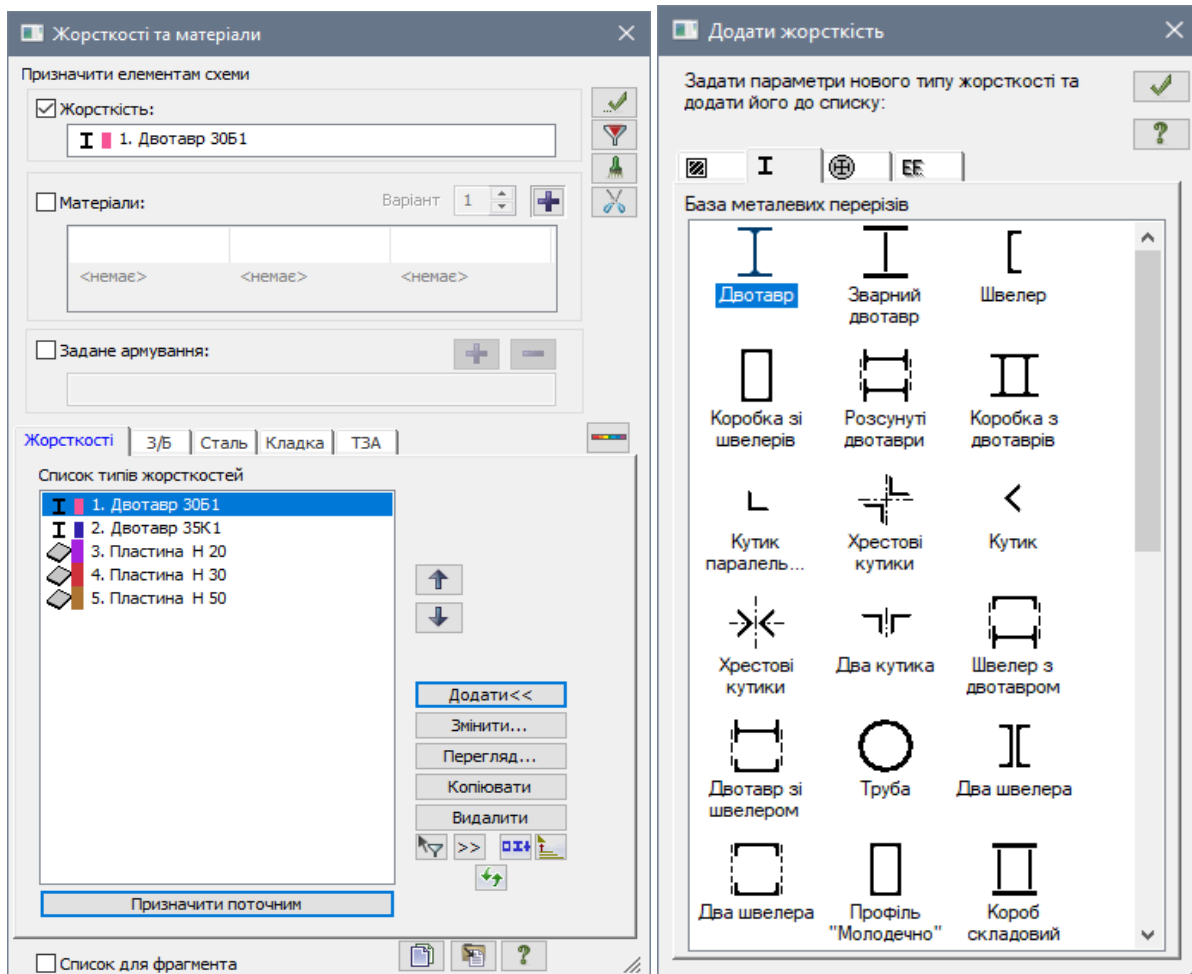


Рисунок 7.4 – Задання параметрів жорсткості

Граничні умови (пружна основа).

9. Для вузлів плити призначити коефіцієнт постелі k .
10. Перевірити, щоб закріплення враховували роботу основи тільки у вертикальному напрямку.

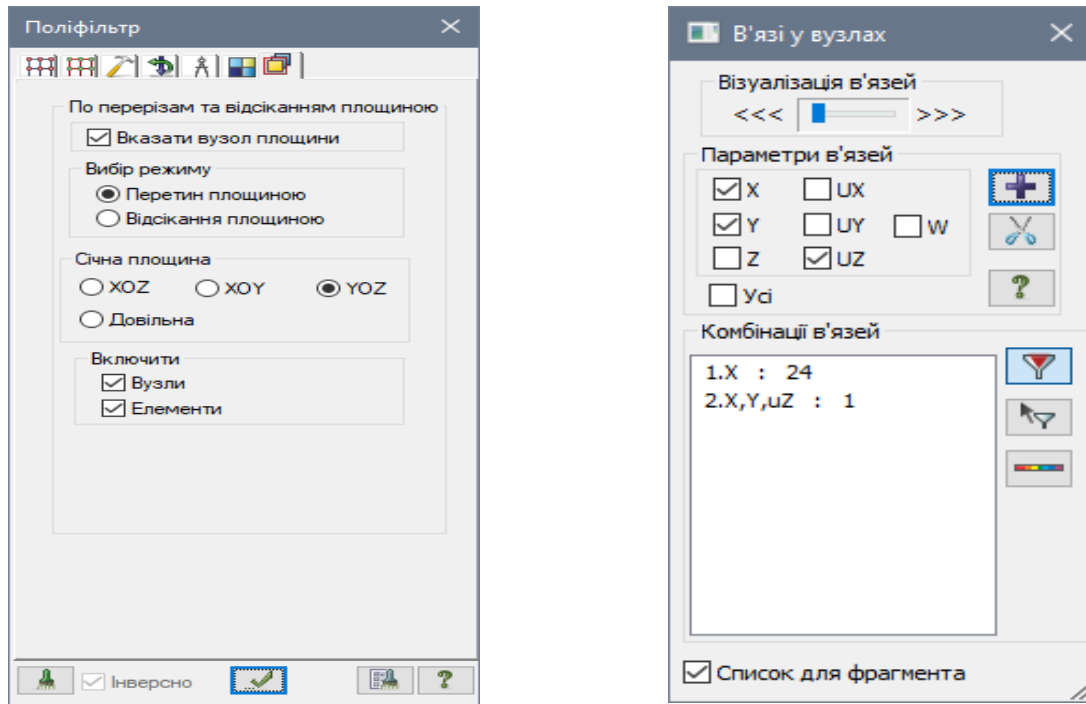


Рисунок 7.5 – Задання граничних умов

Задання навантажень.

11. Додати власну вагу.
12. Тимчасові навантаження – на перекриття кожного поверху.
13. Вітрове навантаження – на фасадні колони та ригелі з урахуванням висоти будівлі.

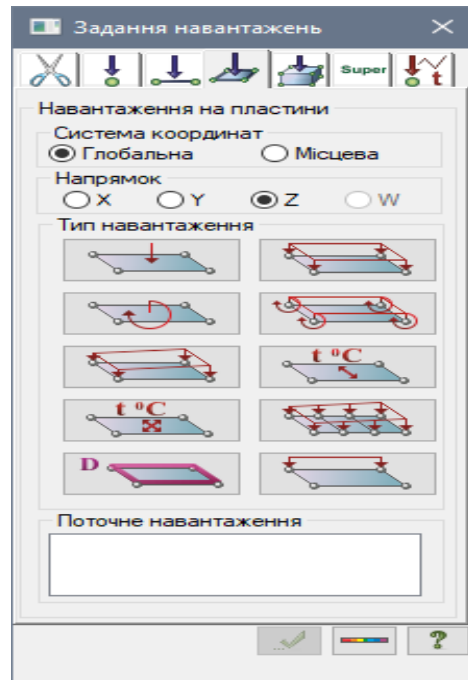
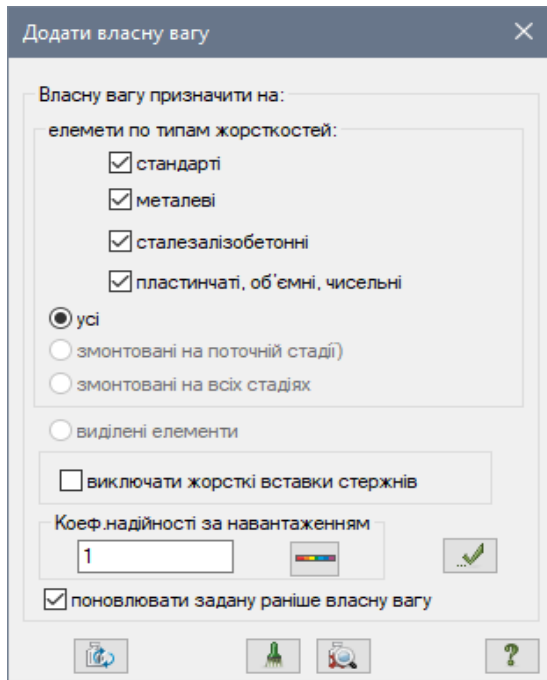


Рисунок 7.6 – Задання навантажень

Формування комбінацій навантажень.

14. Виконати автоматичне формування комбінацій навантажень за ДБН або Єврокодом.
15. Передбачити основні та особливі комбінації.

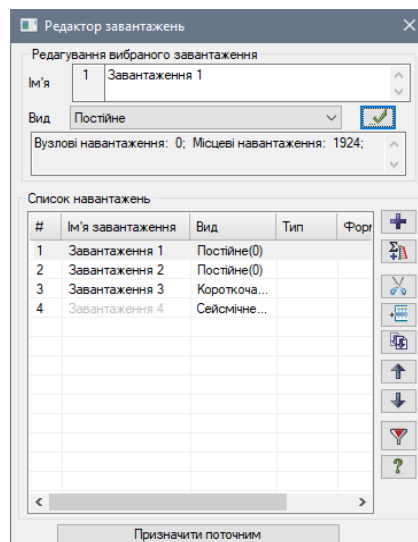


Рисунок 7.7 – Задання розширеної інформації про завантаження

Розрахунок.

16. Виконати розрахунок просторової моделі.
17. Переглянути карти переміщень, епюр зусиль у стрижнях та M_x , M_y у плиті.

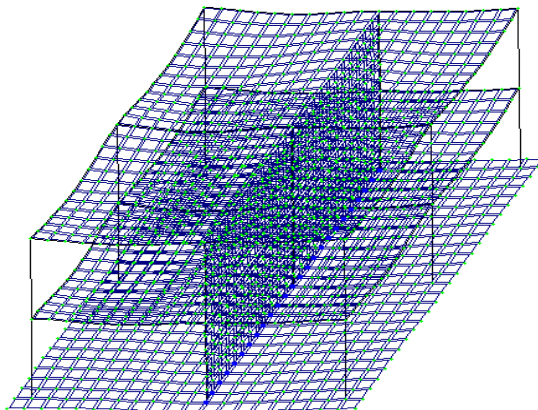


Рисунок 7.8 – Розрахункова схема з урахуванням переміщень вузлів

Аналіз результатів

18. Визначити максимальні прогини плити та переміщення верхніх точок каркаса.
19. Перевірити напруження у плиті та зусилля в колонних перерізах.

Питання для самоперевірки

1. Яку роль відіграє коефіцієнт постелі в розрахунку фундаментної плити?
2. Чому для фундаментних плит у LIRA-FEM застосовують пластинчасті елементи?
3. Як зміниться жорсткість системи при збільшенні товщини плити?
4. Що показують епюри M_x і M_y у плиті?
5. Як зміниться розрахунок, якщо прийняти абсолютно жорстке закріплення замість пружної основи?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 8

Розрахунок просторового каркаса з фундаментною плитою на ґрунтовій основі

Мета завдання полягає у набутті практичних навичок побудови та розрахунку просторової моделі каркаса будівлі з урахуванням взаємодії

системи «основа – фундамент». У межах роботи передбачається освоєння застосування пружно – пластичної моделі основи з використанням модуля деформації ґрунту для більш точного відображення роботи фундаменту в умовах реального навантаження.

Важливою складовою є виконання розрахунку просторової системи з фундаментною плитою, включно з аналізом переміщень, внутрішніх зусиль та напружень у конструктивних елементах, що дозволяє оцінити напружено – деформований стан будівлі в цілому.

Вихідні дані

1. Габарити будівлі: 24 м × 18 м, кількість поверхів – 5, висота поверху – 3,3 м.
2. Матеріал: ЗБ С25/30, арматура класу А500С.
3. Модуль деформації ґрунту: $E = 30$ МПа.
4. Товщина фундаментної плити: 0,5 м.
5. Навантаження: постійні, тимчасові, вітрові.

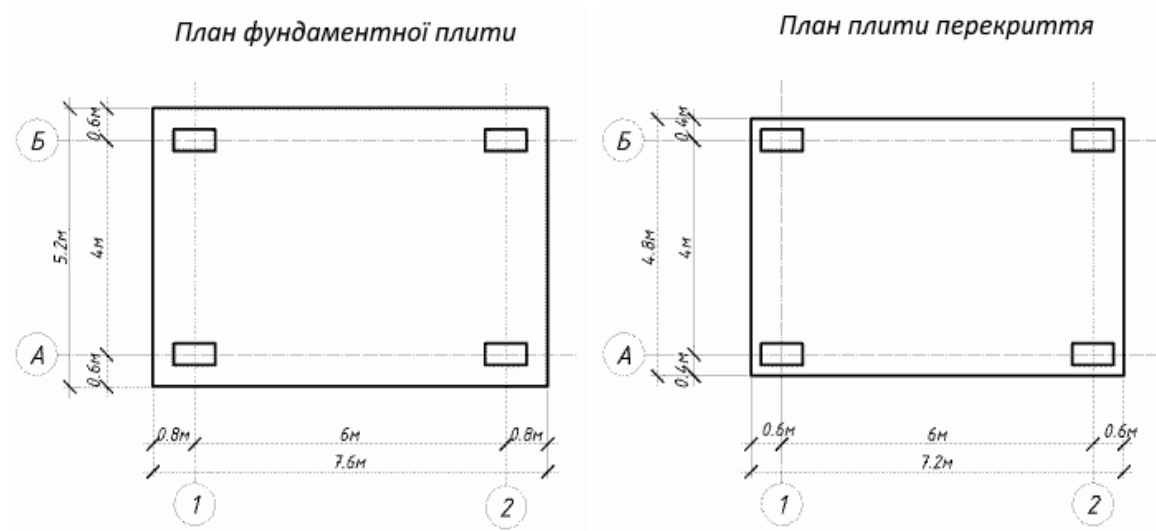


Рисунок 8.1 – Схема просторового каркаса

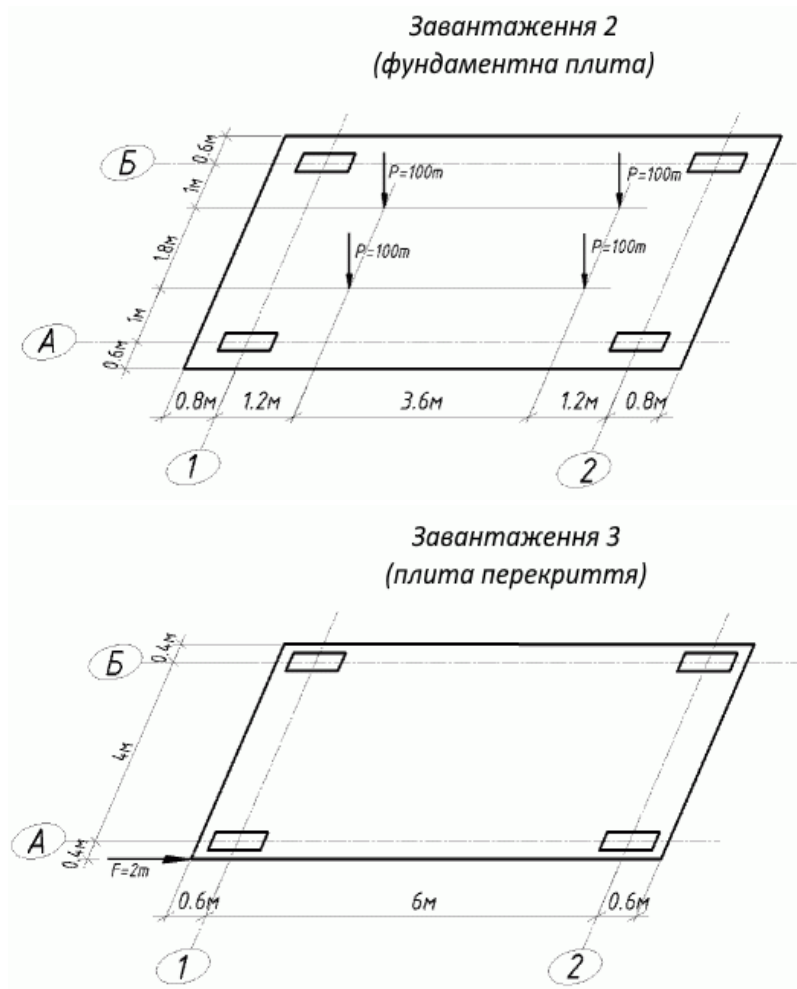


Рисунок 8.2 – Схеми завантажень плит каркаса

Алгоритм виконання

Створення задачі.

1. Обрати одиниці вимірювання (м, кН).
2. Передбачити в налаштуваннях використання ґрунтової основи з модулем Е.

Геометрія моделі.

3. Задати координатну сітку для колон.
4. Побудувати колони, ригелі та міжповерхові перекриття.
5. Створити сітку фундаментної плити з оптимальним розміром елементів (1–1,5 м).

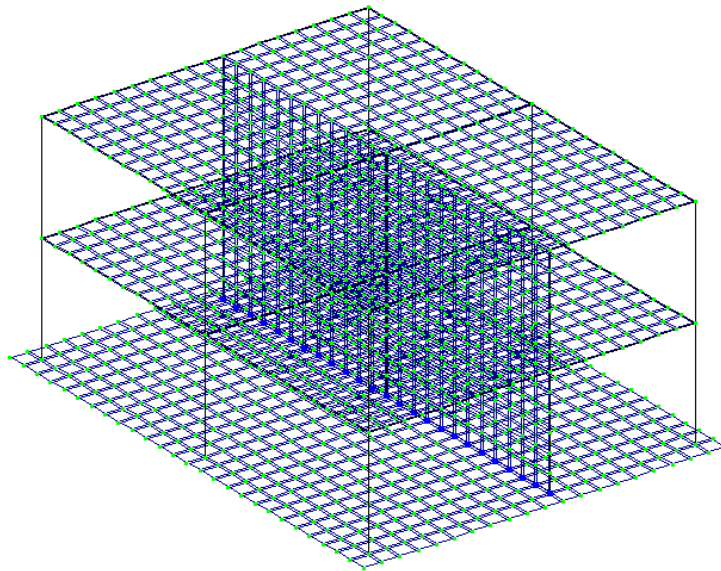


Рисунок 8.3 – Розрахункова 3D-модель

Матеріали та жорсткості.

6. Додати матеріали для залізобетону та ґрунту (модуль деформації E).
7. Призначити перерізи стрижнів та товщину плити.

Задання стандартного перерізу

Переріз Жорсткість

Жорсткісні характеристики перерізу

- Розраховувати автоматично за розмірами перерізу
- Редагувати у вкладці 'Жорсткість'
- Врахування нелінійності

E т/м^2

V

B см

H см

Ro т/м^3

Намалювати

Врахування зсуву

Нелінійний закон для арматури з ТЗА

Коментар

Копіювати

Рисунок 8.4 – Задання перерізів

Задання жорсткості для пластин

Переріз

Жорсткісні характеристики

- Розраховувати автоматично за розмірами
- Коефіцієнт до жорсткості
- Врахування нелінійності

Врахування ортотропії

E т/м^2 E2

V V21

G

H см Ro т/м^3

Тип KE

- Плита, оболонка
- Балка-стінка

Нелінійний закон для арматури з ТЗА

Врахування зсуву Менший розмір пластини м

Коментар

Копіювати

Рисунок 8.5 – Задання жорсткості

Закріплення та основа.

8. Призначити ґрунтову основу для вузлів плити, використовуючи модуль Е та коефіцієнт Пуассона.

9. Перевірити напрямки роботи основи (зазвичай – вертикальний та частково горизонтальний).

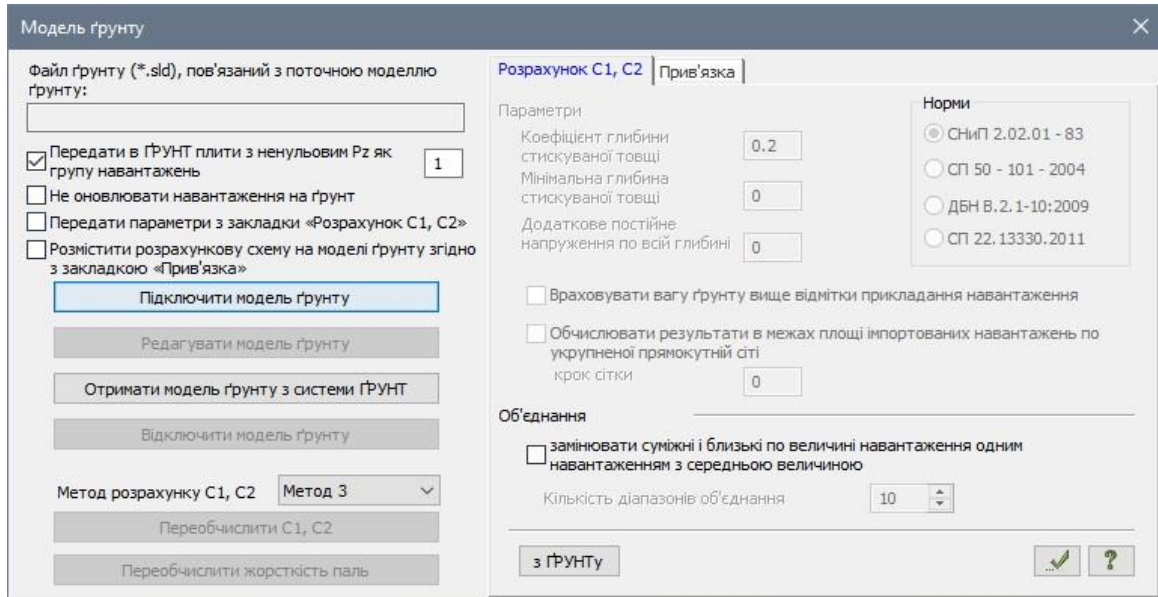


Рисунок 8.6 – Запуск системи «ґрунт»

Навантаження.

10. Додати власну вагу конструкцій.

11. Тимчасові навантаження – на перекриття.

12. Вітрові – на зовнішні елементи каркаса.

Комбінації навантажень.

13. Сформувати основні та особливі комбінації навантажень згідно з ДБН або Єврокодом.

Розрахунок.

14. Запустити розрахунок, отримати переміщення, зусилля, моменти у плиті та стрижнях.

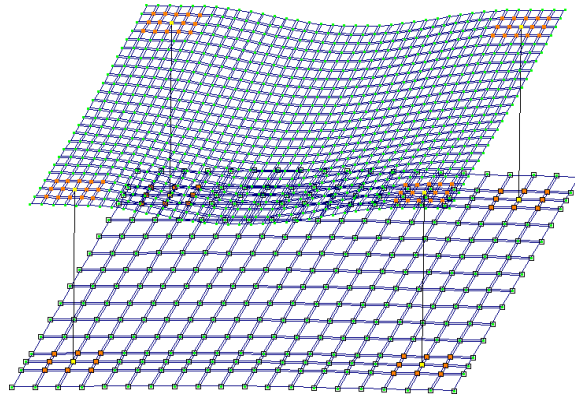


Рисунок 8.7 – Переміщення вузлів

Аналіз.

15. Оцінити максимальні прогини плити, переміщення верху каркаса, розподіл контактних тисків під плитою.
16. Перевірити напруження та зусилля в елементах.

Питання для самоперевірки

1. Чим ґрунтова основа відрізняється від моделі з коефіцієнтом постелі?
2. Як модуль деформації ґрунту впливає на переміщення системи?
3. Для чого потрібен коефіцієнт Пуассона ґрунту в розрахунках?
4. Як зміниться результат, якщо товщину плити збільшити?
5. Чому важливо аналізувати розподіл контактних тисків під плитою?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 9

Розрахунок фізично нелінійної балки з урахуванням повзучості бетону

Мета завдання полягає в ознайомленні з методами моделювання фізичної нелінійності залізобетонних елементів у програмному комплексі LIRA-FEM. У межах роботи передбачається навчання врахуванню повзучості бетону під час виконання інженерних розрахунків та аналізу впливу тривалих

навантажень на напружено-деформований стан балки, зокрема на величину її прогинів.

Додатковою метою є закріплення навичок налаштування параметрів матеріалів із використанням діаграм « σ – ϵ » для бетону і сталі, що дозволяє більш точно відображати реальну роботу конструкції в умовах експлуатації.

Вихідні дані

1. Схема балки та її закріплення показані на рисунку 9.1.
2. Перерізи елементів балки показані на рисунку 9.2.
3. Матеріал балки – залізобетон С20/25, арматура А400С.
4. Стан розрахункової схеми аналізується після 365 та 730 днів.
5. Навантаження:
 - постійне (власна вага + конструктивне навантаження);
 - тимчасове тривале (експлуатаційне);
 - умови розрахунку: урахування фізичної нелінійності та повзучості бетону.

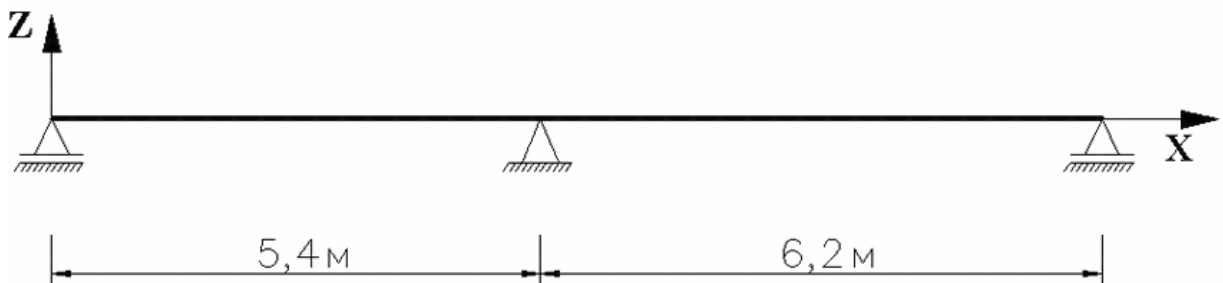


Рисунок 9.1 – Схема балки

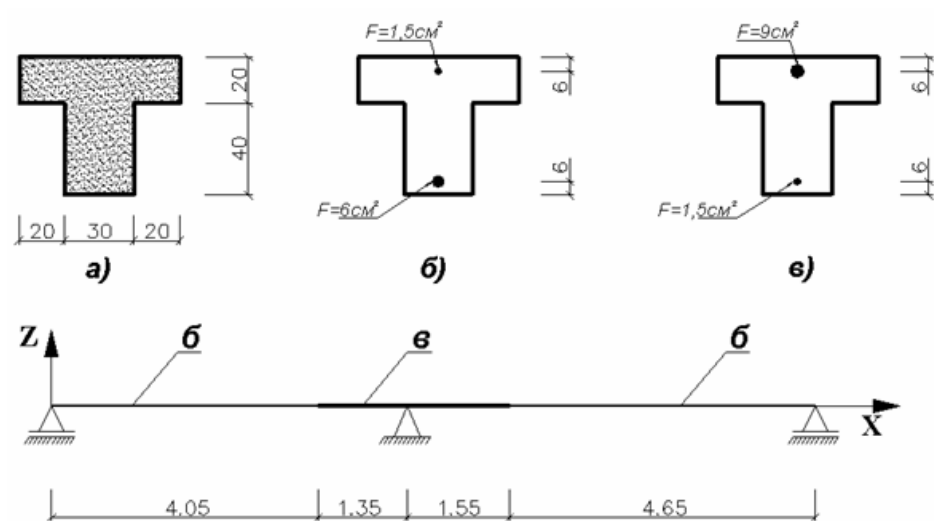


Рисунок 9.2 – Перерізи елементів балки

Алгоритм виконання

Створення нової задачі.

1. Запустити LIRA-FEM, створити новий файл проєкту.
2. Встановити систему одиниць вимірювання: метри, кН.
3. Активувати у налаштуваннях проєкту можливість фізично нелінійного розрахунку (ФНЛ).

Задання геометрії.

4. Створити вузли у плані за координатами, відповідно до довжини прольотів.
5. З'єднати вузли стрижневими елементами, утворивши геометричну модель балки.



Рисунок 9.3 – Розрахункова схема балки

Задання перерізу.

6. Вибрати тип перерізу прямокутний залізобетонний.
7. Задати ширину b та висоту h згідно з вихідними даними.
8. Перевірити, щоб переріз відповідав класу бетону за міцністю.

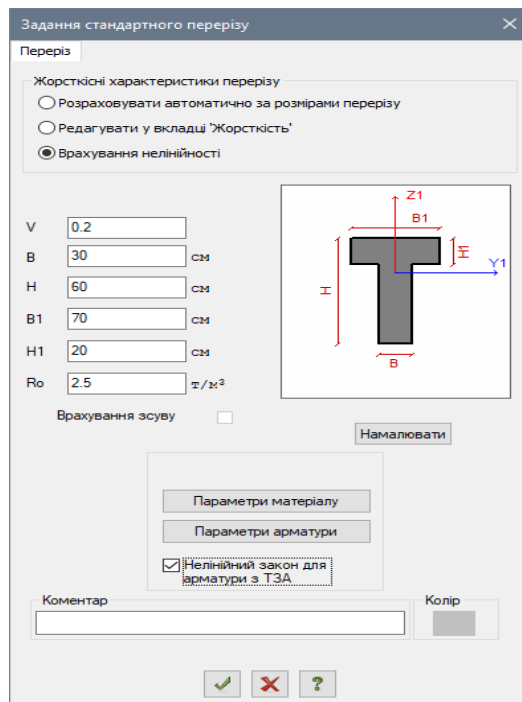


Рисунок 9.4 – Задання перерізу балки

Задання матеріалів.

9. Створити новий матеріал бетон C20/25:

- призначити відповідну діаграму деформування « σ – ϵ » для ФНЛ розрахунку;
- вказати модуль пружності E , коефіцієнт Пуассона ν , граничні деформації.

10. Створити матеріал для арматури A400C з власною діаграмою « σ – ϵ ».

11. Прив'язати арматуру до перерізу балки (повздовжня та поперечна арматура за варіантом).

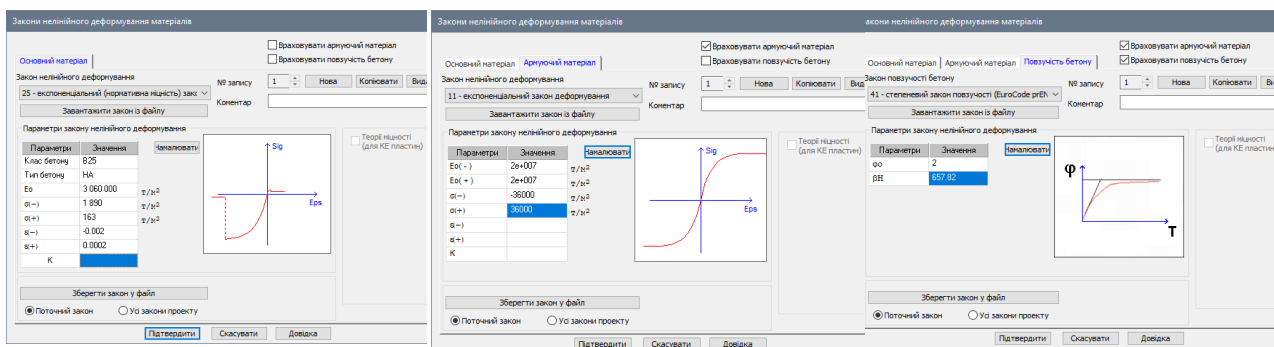


Рисунок 9.5 – Задання законів нелінійного деформування матеріалів

Врахування повзучості бетону.

12. У властивостях матеріалу бетону відкрити розділ «Повзучість і усадка».
13. Активувати врахування повзучості бетону.
14. Ввести параметри: коефіцієнт повзучості $\varphi(t, t_0)$ або модуль повзучості за ДБН / Eurocode 2.
15. Вказати тривалість дії навантаження.
16. Якщо норматив вимагає, врахувати усадку бетону.

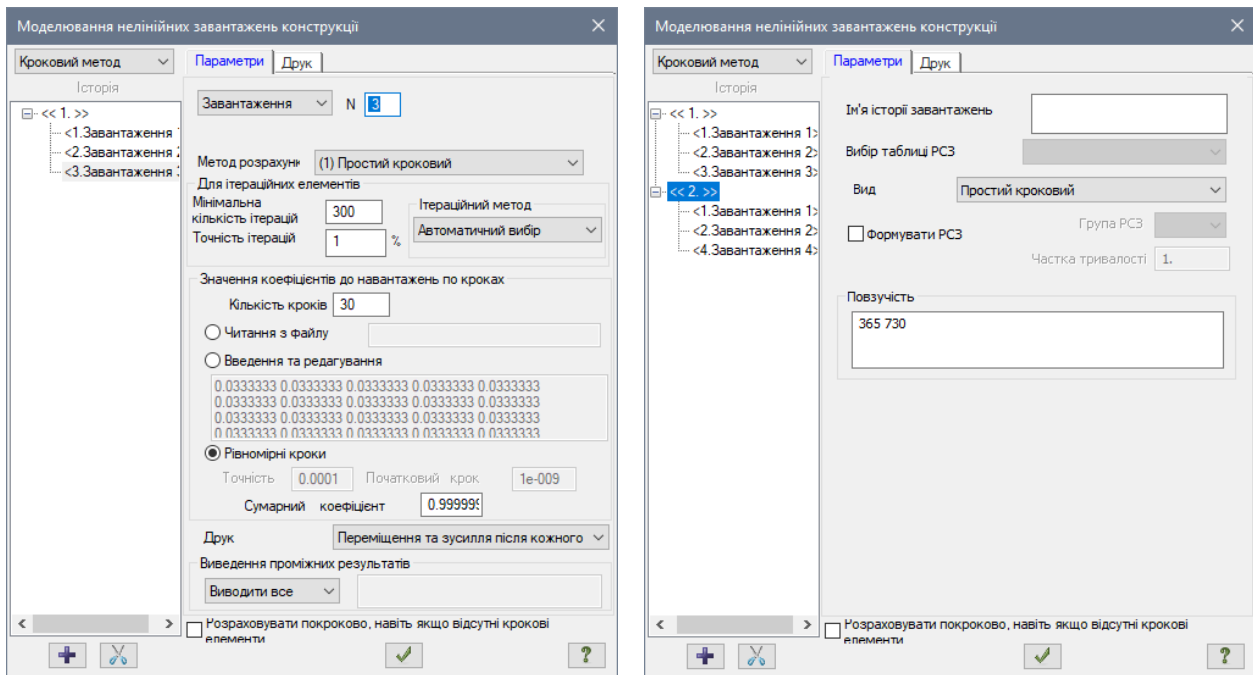


Рисунок 9.6 – Моделювання нелінійних завантажень

Задання навантажень.

17. Власна вага: активувати автоматичний розрахунок власної ваги конструкції.
18. Постійне навантаження: задати рівномірно розподілене по довжині балки (наприклад, від конструкцій підлоги, облицювання тощо).
19. Тривале тимчасове навантаження: задати окремим навантажувальним станом.
20. Призначити групи навантажень (постійне, тимчасове тривале) для правильного поєднання.

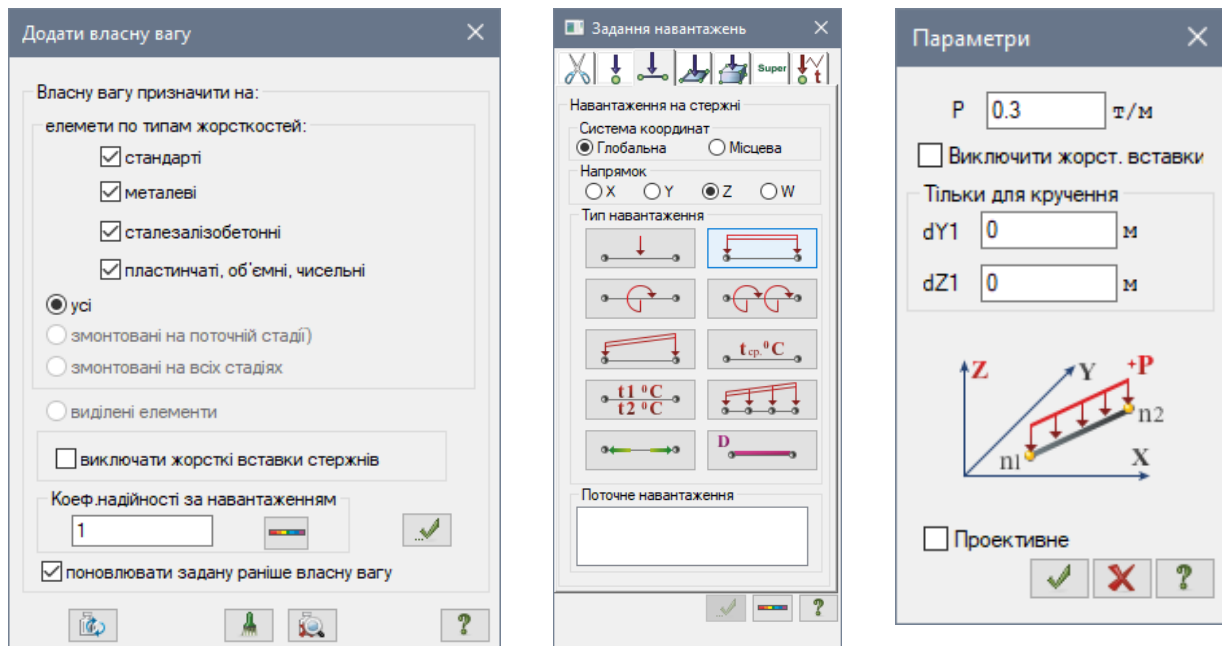


Рисунок 9.7 – Задання навантажень

Граничні умови.

21. Для шарнірно опертої балки закріпити вузли опор від вертикальних переміщень (і горизонтальних, якщо необхідно).

22. Перевірити, щоб не виникло кінематичних невизначеностей у схемі.

Налаштування розрахунку.

23. У діалоговому вікні розрахунку вибрати ФНЛ з урахуванням повзучості.

24. Задати кроки навантаження (наприклад, 10–20 кроків для плавної побудови діаграми).

25. Активувати опцію аналіз тривалих навантажень.

Виконання розрахунку.

26. Запустити розрахунок.

27. Перевірити протокол розрахунку на відсутність помилок або попереджень.

Аналіз результатів.

28. Переглянути карти переміщень – визначити максимальні прогини.

29. Переглянути карти напружень у бетоні та арматурі.

30. Проаналізувати діаграму «момент – кривина» для балки.

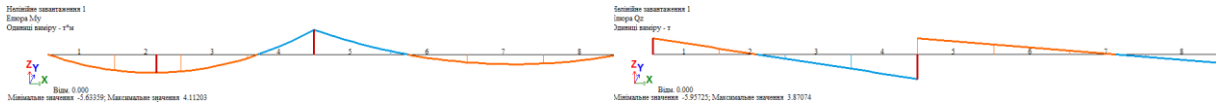


Рисунок 9.8 – Епюри внутрішніх зусиль

31. Порівняти результати з розрахунком без урахування повзучості:
 - як змінились прогини;
 - як змінились напруження у бетоні та арматурі?
32. Зробити висновки щодо впливу тривалих навантажень.

Питання для самоперевірки

1. Що таке фізична нелінійність і як вона моделюється в LIRA-FEM?
2. Як нормативно визначають параметри повзучості бетону?
3. Чим повзучість відрізняється від усадки?
4. Який вплив тривалих навантажень на прогини та напруження балки?
5. Чому важливо виконувати порівняльний розрахунок «з» і «без» урахування повзучості?
6. Як змінюється розподіл напружень у бетоні при тривалій дії навантажень?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 10

Розрахунок шпунта, посиленого анкерами, спільно з ґрунтовим масивом (LIRA-FEM)

Метою виконання даної роботи є набуття практичних навичок моделювання та розрахунку огорожувальних конструкцій котловану, що реалізовані у вигляді шпунтової стіни, посиленої системою анкерів, які взаємодіють з багат шаровою ґрунтовою основою. У межах цієї мети

передбачено відпрацювання методики застосування фізично нелінійної моделі ґрунту за критеріями Кулона – Мора, яка дозволяє врахувати реальну роботу масиву під дією навантажень і змінюваних у процесі будівництва умов.

Також мета полягає у засвоєнні принципів поетапного (стадійного) розрахунку, що відображає реальну послідовність зведення огорожі та проведення екскаваційних робіт, а крім того – у вивченні впливу попереднього натягу анкерів на зменшення переміщень шпунтової стіни та перерозподіл зусиль у системі «ґрунт – конструкція». Реалізація зазначеної мети забезпечує формування цілісного уявлення про роботу підпірних споруд у складних інженерно-геологічних умовах та створює підґрунтя для виконання подальших інженерних розрахунків, пов'язаних із проєктуванням огорож котлованів і підземних споруд.

Вихідні дані

1. Геометрія основи: профіль 60 м × 20 м, товщина шару 1 м; крок конструктивних елементів сітки 1 м × 1 м. Котлован: 20 м × 8 м. Огорожа: вертикальні елементи висотою 14 м. Анкерна система: опори (форкопфи) довжиною 3 м; анкери довжиною 10 м під кутом 45°.

2. Матеріали ґрунтових шарів (модель Кулона – Мора, КЕ 281–284):

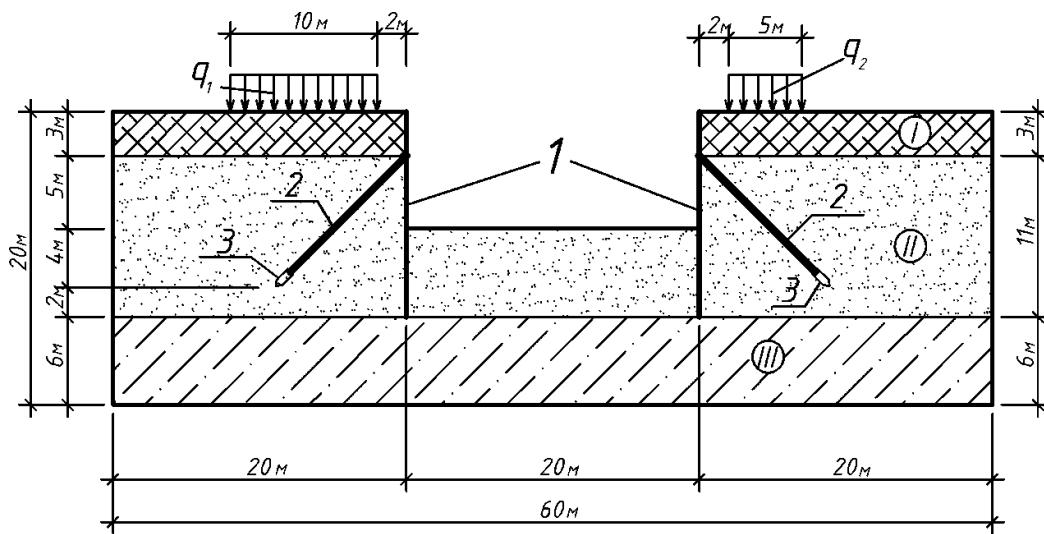
- шар 1 (насип): $E = 800 \text{ т/м}^2$; $\nu = 0,3$; $h = 100 \text{ см}$; $\gamma = 1,6 \text{ т/м}^3$; $c = 0,1 \text{ т/м}^2$; $R_t = 0,01 \text{ т/м}^2$; $\varphi = 30^\circ$; коеф. переходу до вторинної гілки $K_e = 3$;
- шар 2 (пісок): $E = 3\,000 \text{ т/м}^2$; $\nu = 0,3$; $h = 100 \text{ см}$; $\gamma = 1,7 \text{ т/м}^3$; $c = 0,1 \text{ т/м}^2$; $R_t = 0,01 \text{ т/м}^2$; $\varphi = 30^\circ$.

Примітка. Вісь Y – поперек площини; використовуємо ознаку схеми «2 – три ступені вільності (X, Z, U_y)».

3. Навантаження:

- власна вага ґрунту тришарової основи;
- постійні рівномірно-розподілені навантаження на поверхню основи: $g_1 = 1 \text{ т/м}$; $g_2 = 0,5 \text{ т/м}$; + власна вага конструкцій огорожі;
- попередній натяг анкерів $F = 5 \text{ т}$ (спец. елемент);

- фіктивне точкове навантаження $P = 0,25$ т у крайній точці основи за напрямом граничних умов.



- 1 - шпунтова огорожа
- 2 - анкери
- 3 - опори анкерів
- I - насипний ґрунт
- II - пісок
- III - суглинок

Рисунок 10.1 – Схема конструкцій огорожі котловану і навантажень на багатошарову основу

Алгоритм виконання

Створення задачі.

1. Ім'я: 10_шпунт_з_ґрунт_масивом.
2. Площина: X0Z, «2 – три СВ (X, Z, Uy)».

Сітка та тип скінченного елемента.

3. Створити прямокутну область 60 м × 20 м, крок 1 м.
4. Призначити тип 281 (фізично нелінійний прямокутний елемент пласкої задачі ґрунту) для області.
5. Увімкнути відображення номерів вузлів за потреби.

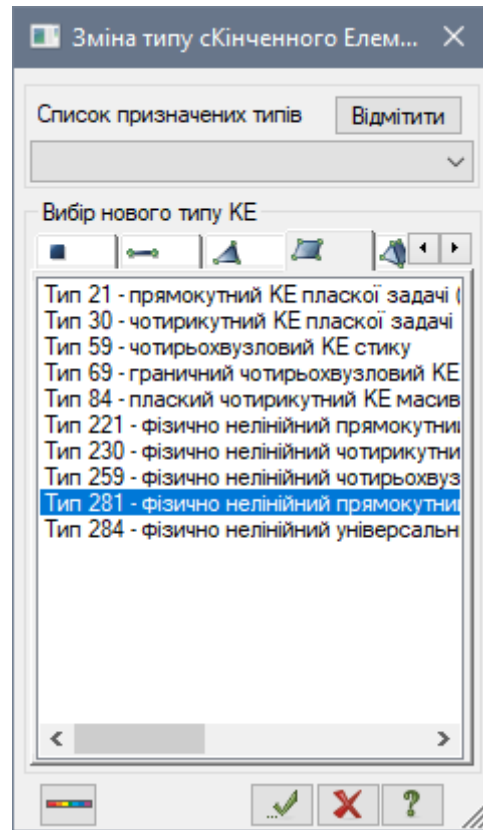
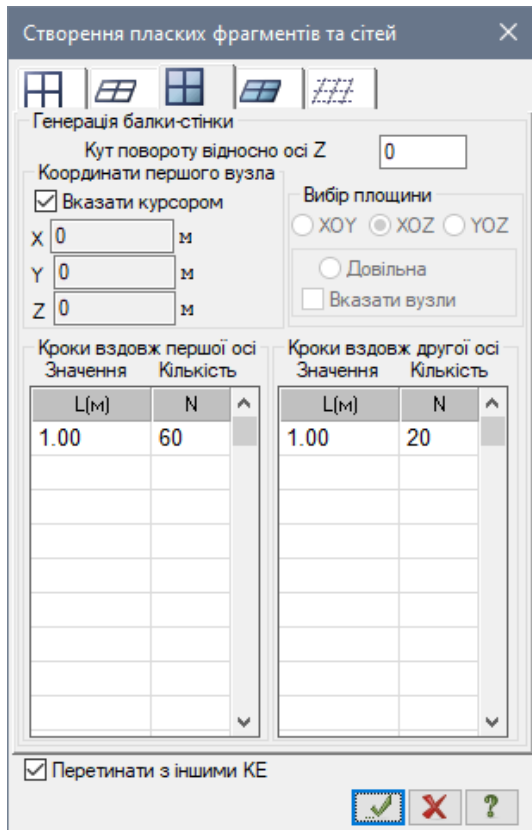


Рисунок 10.2 – Створення геометричної схеми

Вставка конструкцій огорожі та анкерів.

- Додати стрижні шпунтової огорожі (висота 14 м) по межах котловану.
- Додати опори анкерів (≈ 3 м) та анкери довжиною 10 м під 45° .
- Переконаватися в коректному зчепленні вузлів огорожі з ґрунтовою сіткою.

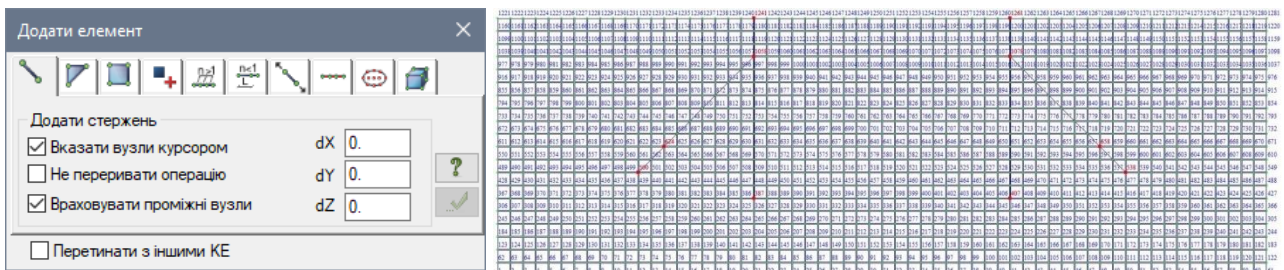


Рисунок 10.3 – Вставка конструкцій огорожі та анкерів

Граничні умови

- По нижній межі основи заборонити переміщення X, Z.

10. На бокових межах – граничні умови згідно з плоскою постановкою (заборона нормальних переміщень).

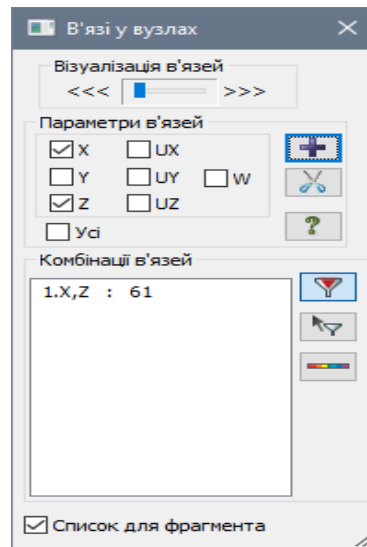


Рисунок 10.4 – Задання граничних умов

Матеріали та жорсткості ґрунту.

11. Створити кінцевий елемент 281–284 (чисельний опис) для шару 1 (насип) з параметрами вище.

12. Двічі скопіювати тип жорсткості для шару 2 та шару 3; відредагувати параметри.

13. Призначити кольори / коментарі для зручності ідентифікації шарів.

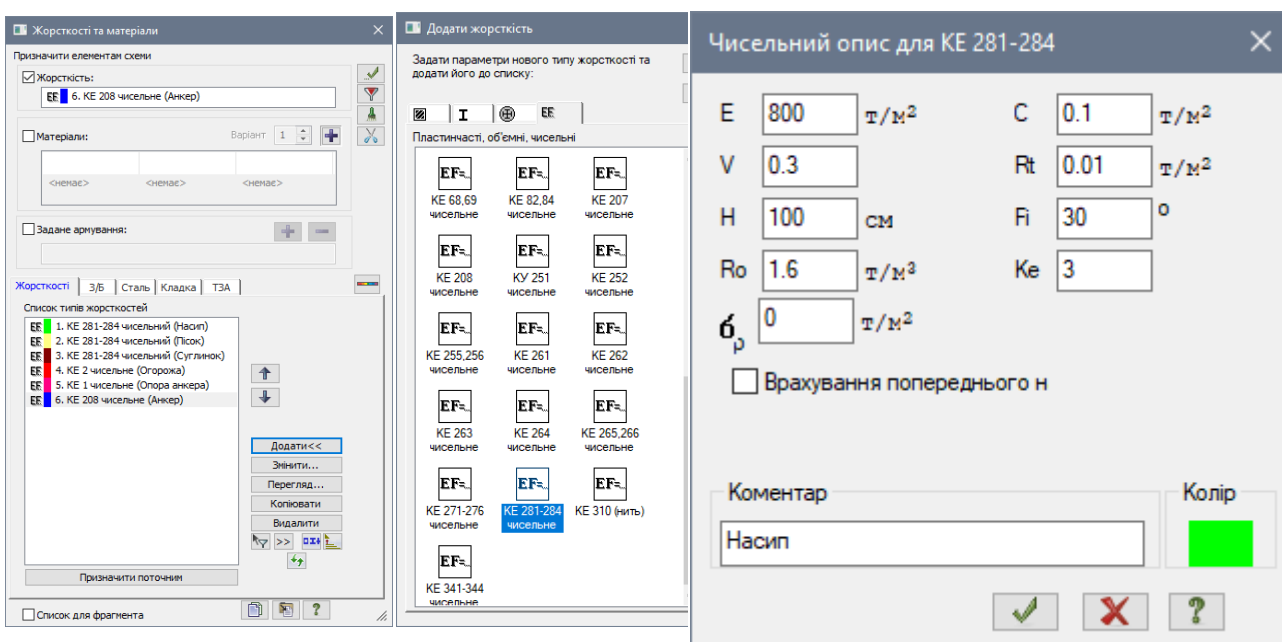


Рисунок 10.5 – Задання жорсткісних параметрів елементам

Формування навантажень.

14. Додати власну вагу.

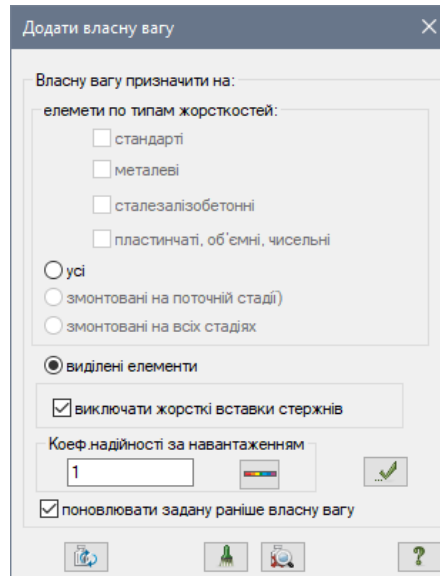


Рисунок 10.6 – Задання власної ваги

15. Задати $g_1 = 1$ т/м, $g_2 = 0,5$ т/м на поверхню + власна вага огорожі.

16. У поліфільтрі обрати Тип 208 (спец. двовузловий елемент попереднього натягу). На вкладці «Навантаження на стержні» задати форкопф, $P = 5$ т.

17. Задати точкове $P = 0,25$ т у крайньому вузлі основи за напрямком відповідних граничних умов.

Стадійність монтажу та нелінійне завантаження.

18. Стадія 1: базова – власна вага.

19. Стадія 2: монтаж огорожі (жорсткість «4. Кінцевого елемента 2 чисельне (Огорожа)» → «Усі відмічені»). У другому нелінійному завантаженні встановити прапорець «Обнулити переміщення».

20. Стадія 3: екскавація 1-го шару всередині огорожі (виділити «1. КЕ 281–284 (Насип)» у межах котловану).

21. Стадія 4: монтаж / активація анкерів і попередній натяг (посилання на навантаження № 4).

22. Стадія 5: завершення, фіктивне навантаження для коректної послідовності.

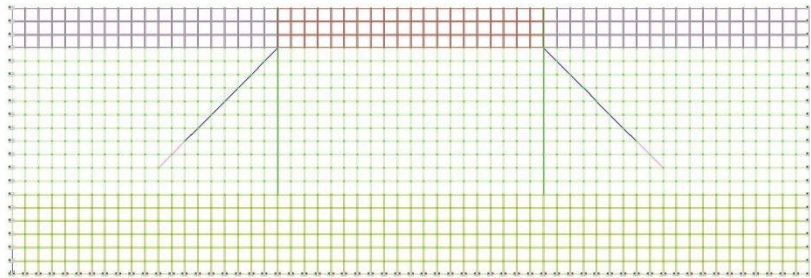
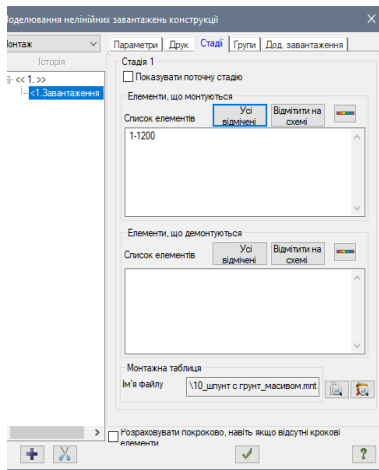


Рисунок 10.7 – Задання завантажень

Розрахунок.

1. Запустити фізично нелінійний розрахунок із моделлю Кулона – Мора і переходом до вторинної гілки (K_e).
2. Отримати переміщення, зусилля, моменти у плиті та стрижнях.
3. Оцінити максимальні прогини.
4. Перевірити напруження та зусилля в елементах

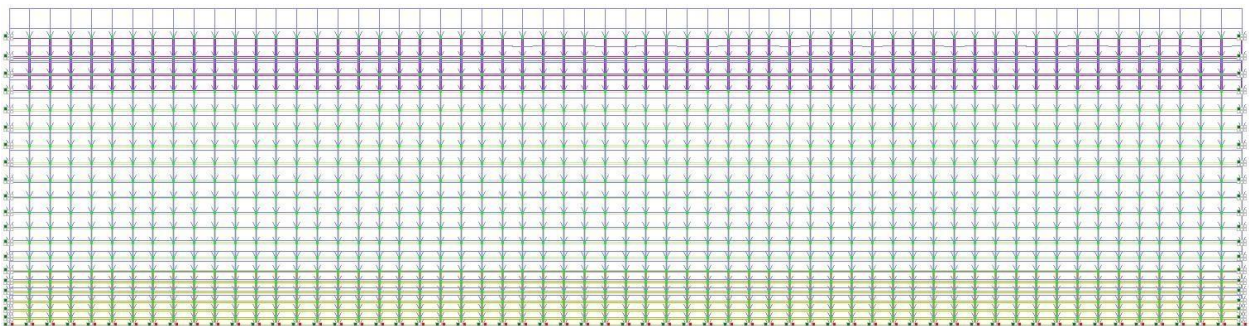


Рисунок 10.8 – Розрахункова схема з урахуванням переміщень вузлів

Питання для самоперевірки

1. Яку роль відіграє «обнулення переміщень» на 2-й стадії?
2. Чим відрізняється первинна та вторинна гілки деформування ґрунту і як впливає коефіцієнт K_e ?
3. Як впливає попередній натяг анкерів на роботу шпунтової стіни та ґрунтового масиву?

4. Як зміняться результати при іншому куті / довжині анкерів?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 11

Розрахунок сталевого каркаса будівлі з підготовкою інформації для розрахунку на прогресуюче обвалення

Мета роботи полягає у засвоєнні методики моделювання сталевих каркасів багатоповірхової будівлі в програмному комплексі LIRA-FEM. У межах виконання завдання передбачається опанування способів підготовки вихідних даних для подальшого аналізу конструкції на прогресуюче обвалення, що є важливим етапом оцінки надійності та безпеки будівлі.

Важливою складовою є навчання створенню просторових моделей сталевих рам та виконання перевірки їх тримальної здатності відповідно до чинних нормативних вимог, що дозволяє комплексно оцінити працездатність каркаса в умовах експлуатаційних та аварійних навантажень.

Вихідні дані

1. Схема рами та її закріплення показані на рисунку 11.1.
2. Перерізи елементів:
 - крайні та середні колони – двотавр № 35 К1;
 - балки повздовжні – двотавр № 30;
 - балки поперечні – зварний двотавр;
 - в'язі по колонах – два кутики $75 \times 75 \times 6$.
3. Конструктивна схема: сталевий рамно-в'язевий каркас.
4. Матеріали: сталь класу S355 для основних елементів.
5. Навантаження: постійне, тимчасове, вітрове.
6. Розрахункова програма: LIRA-FEM, режим просторової задачі.

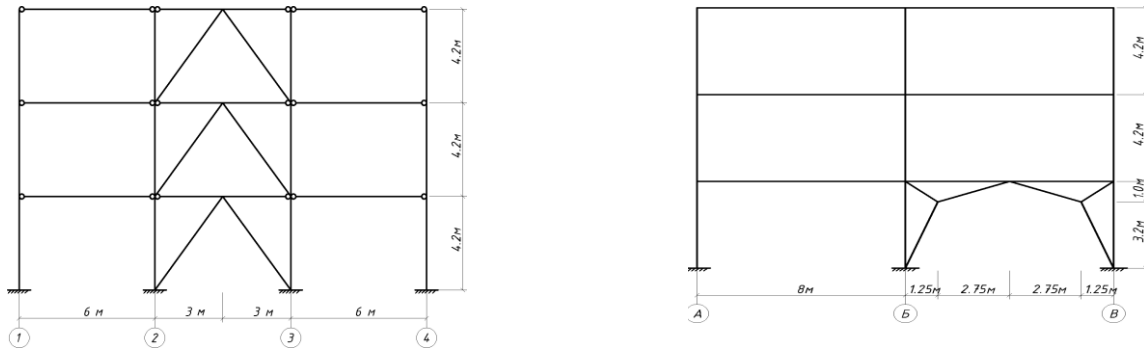


Рисунок 11.1 – Розрахункова схема поперечника будівлі

Алгоритм виконання

Створення нової задачі.

1. Запустити LIRA-FEM, вибрати одиниці вимірювання – метри, кН.
2. Створити новий файл задачі, встановити просторовий розрахунок.

Побудова геометричної схеми.

3. Задати координати вузлів згідно з планом осей будівлі та висоти поверхів.
4. Об'єднати вузли стрижневими елементами (колони, ригелі, в'язі).
5. Перевірити правильність з'єднання вузлів (відсутність розривів у моделі).

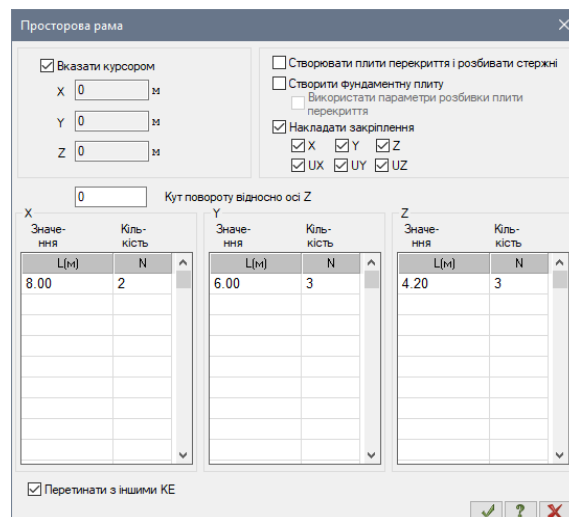


Рисунок 11.2 – Побудова просторової рами

Призначення перерізів і матеріалів.

- Для колон призначити гарячекатані двотаври або складені перерізи за сортаментом.
- Для ригелів – двотаври або швелери згідно з варіантом.
- Для вертикальних і горизонтальних в'язей – круглі або кутикові профілі.
- Призначити матеріал сталь S355.

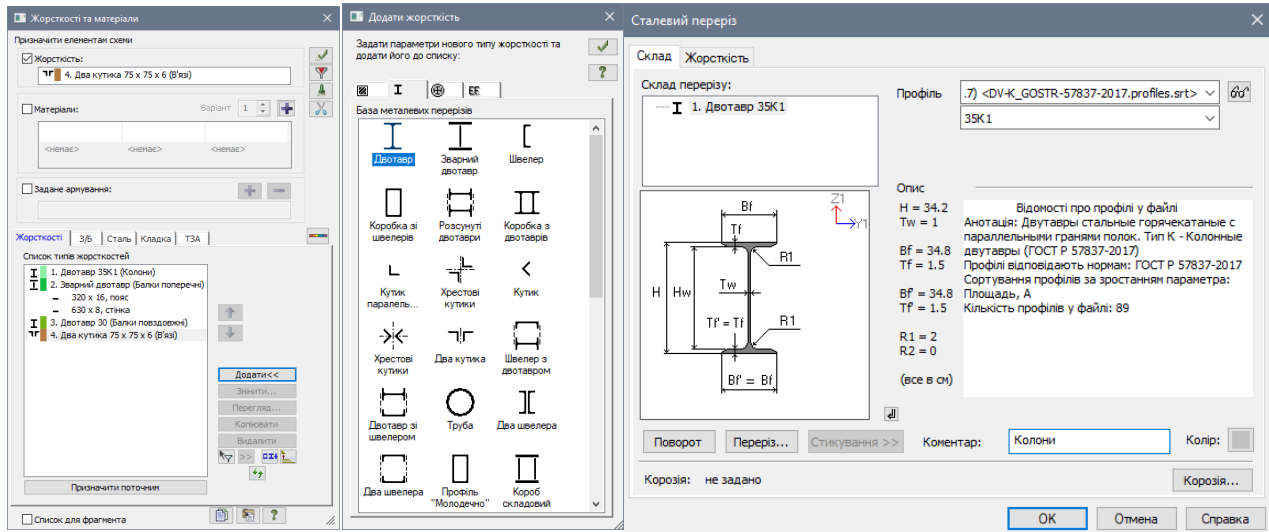


Рисунок 11.3 – Задання жорсткісних характеристик і параметрів матеріалів елементам схеми

Задання граничних умов.

- Опори колон першого поверху – шарнірно нерухомі або жорстко защемлені (згідно з завданням).
- У вузлах на рівні покриття за необхідності задати пружні закріплення.

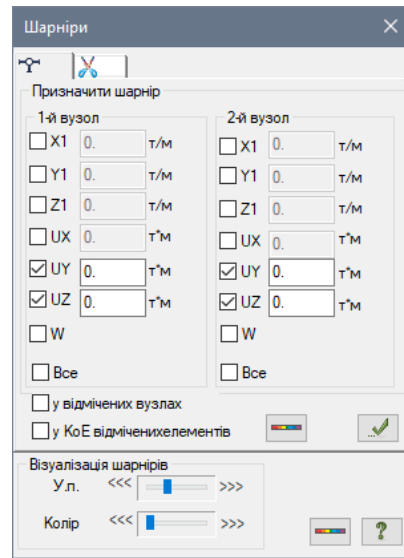
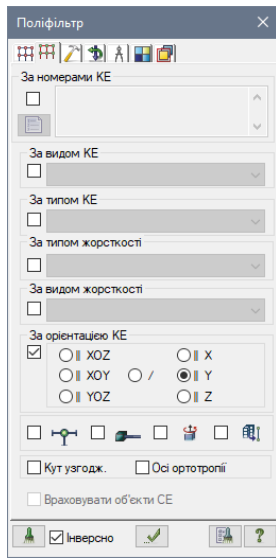


Рисунок 11.4 – Задання граничних умов

Завдання навантажень.

12. Постійне навантаження: власна вага конструкцій, вага огорожувальних конструкцій.
13. Тимчасове: експлуатаційне, снігове, вітрове (згідно з ДБН або Eurocode).
14. Навантаження прикласти у відповідних вузлах або на елементи.

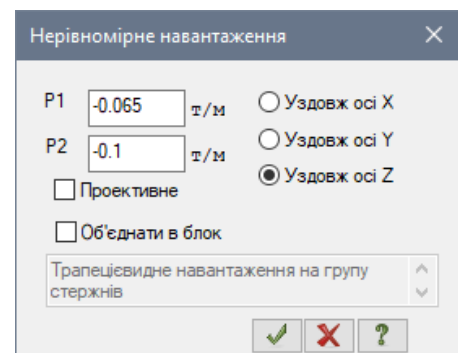
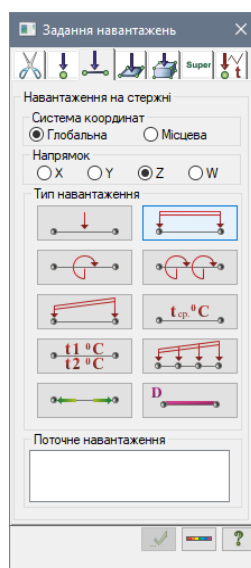
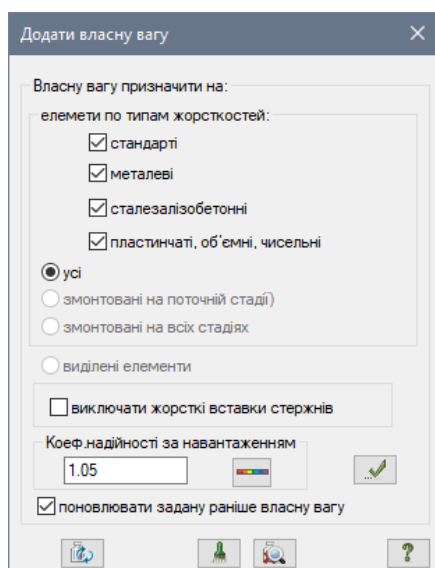


Рисунок 11.5 – Задання навантажень

Формування комбінацій навантажень (КН).

15. Створити КН за граничними станами (ULS, SLS).
16. Додати комбінації, які будуть використані при моделюванні аварійних ситуацій (вилучення елементів).

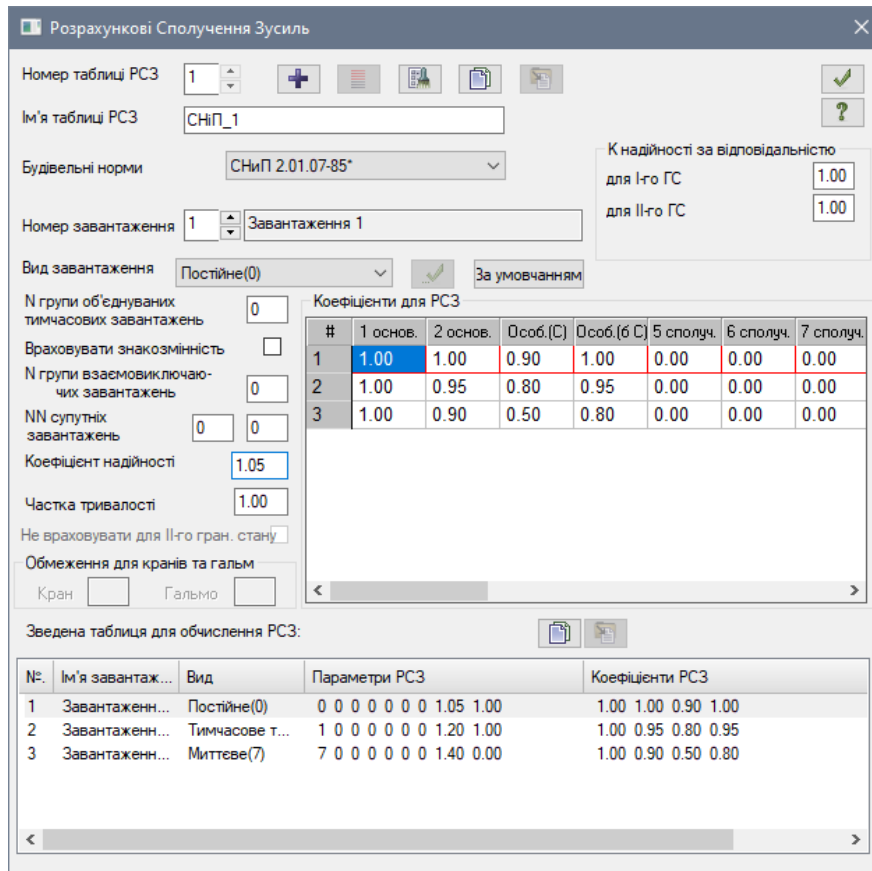


Рисунок 11.6 – Генерація таблиці

Розрахунок каркаса.

17. Запустити лінійно-статичний розрахунок.
18. Переглянути переміщення, зусилля, перевірити відсутність нестійкості.
19. За необхідності змінити перерізи для забезпечення міцності.

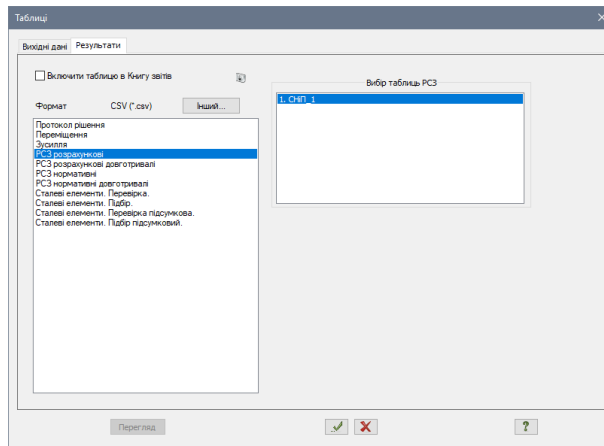


Рисунок 11.7 – Формування і перегляд таблиць результатів розрахунку

Підготовка до розрахунку на прогресуюче обвалення.

20. Зберегти основну модель як окремий файл.
21. У копії моделі виконати вилучення окремих елементів (колон, ригелів) згідно зі сценарієм аварії.
22. Перевірити нову схему на стійкість і перерозподіл зусиль.

Аналіз результатів.

23. Визначити максимальні переміщення і напруження у пошкодженій схемі.
24. Порівняти з допустимими значеннями.
25. Сформулювати висновки щодо запасу тримальної здатності.

Питання для самоперевірки

1. Які особливості моделювання сталевих каркасів у LIRA-FEM?
2. Як впливають зв'язки на жорсткість каркаса?
3. У чому полягає методика підготовки моделі до розрахунку на прогресуюче обвалення?
4. Які комбінації навантажень потрібно використовувати для аварійних розрахунків?
5. Як інтерпретувати результати розрахунку при вилученні елементів?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 12

Розрахунок просторового залізобетонного каркаса у фізично нелінійній постановці

Мета роботи полягає у засвоєнні методики моделювання просторових залізобетонних каркасів у фізично нелінійній постановці з використанням програмного комплексу LIRA-FEM. У межах завдання передбачається опанування принципів роботи з нелійними моделями матеріалів, що дозволяють більш точно врахувати реальні фізико-механічні властивості бетону та арматури.

Особлива увага приділяється врахуванню процесів тріщиноутворення та перерозподілу зусиль у конструкції, що забезпечує підвищену точність прогнозування її напружено-деформованого стану та оцінки тримальної здатності в умовах експлуатаційних навантажень.

Вихідні дані

1. Двопрогінна триповерхова будівля.
2. Розміри прогонів – 6 м, крок колон – 6 м, висота поверхів – 3 м.
3. Колони в місцях обпирання на фундаментну плиту жорстко затиснені. Матеріал – залізобетон С20/25, арматура А400С.
4. Перерізи елементів:
 - колони першої та останньої рам – прямокутний переріз розміром 500 мм × 500 мм;
 - крайні колони середньої рами – тавровий переріз висотою 1 200 мм (ширина полки – 1 200 мм, товщина полиці – 300 мм, товщина стінки – 300 мм);
 - центральні колони середньої рами – двотавровий переріз висотою 600 мм (ширина полок – 600 мм, товщина полиць – 200 мм, товщина стінки – 200 мм);
 - балки перекриття та покриття – прямокутний переріз розміром 400 мм × 500 мм;

- плити перекриття та покриття – товщина 200 мм.
- конструктивні елементи: колони, ригелі, плити перекриття.

Матеріал: бетон класу С32/40, арматура класу А500С.

5. Навантаження: постійне, тимчасове, снігове, вітрове.
6. Розрахункова схема: просторова.

Алгоритм виконання

Створення нової задачі.

1. Вибрати одиниці вимірювання – метри, кН.
2. Створити просторову розрахункову задачу.

Геометрична модель.

3. Ввести координати вузлів за планом та висотою.
4. Задати стрижневі елементи (колони, ригелі) та пластинчасті елементи (плити перекриття).
5. Перевірити цілісність геометрії (відсутність «висячих» вузлів).

Призначення матеріалів та перерізів.

6. Для бетону задати фізично нелінійну модель (наприклад, Бетон 55 за LIRA-FEM).
7. Для арматури – модель з урахуванням діаграми «напруження – деформація».
8. Призначити перерізи елементам згідно з завданням.

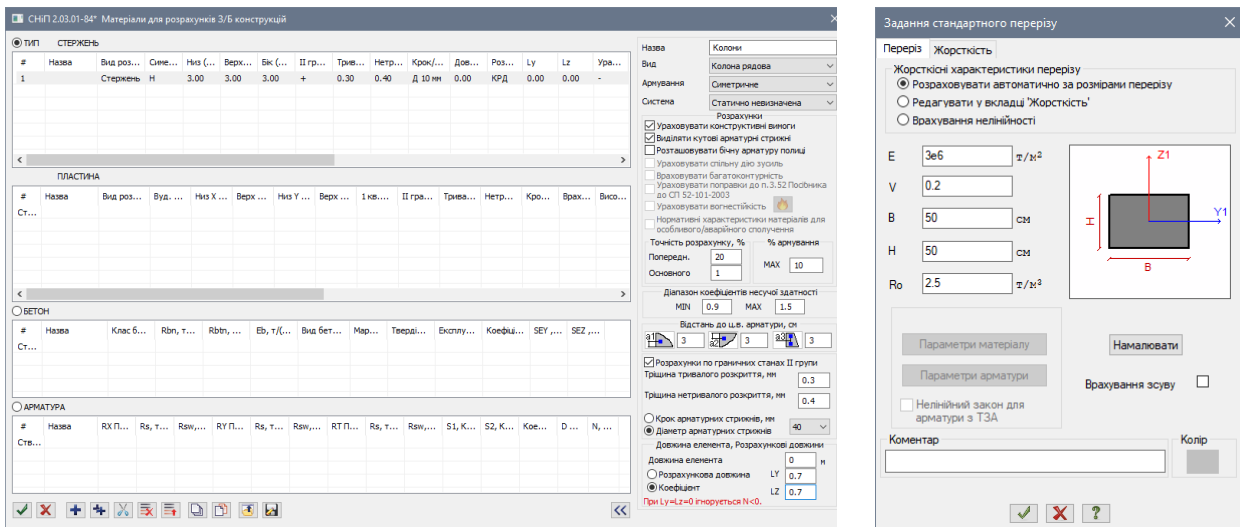


Рисунок 12.1 – Призначення матеріалів та перерізів

Граничні умови.

9. Закріпити вузли нижніх кінців колон (защемлення або шарнір).
10. За необхідності задати пружні зв'язки з ґрунтовою основою.

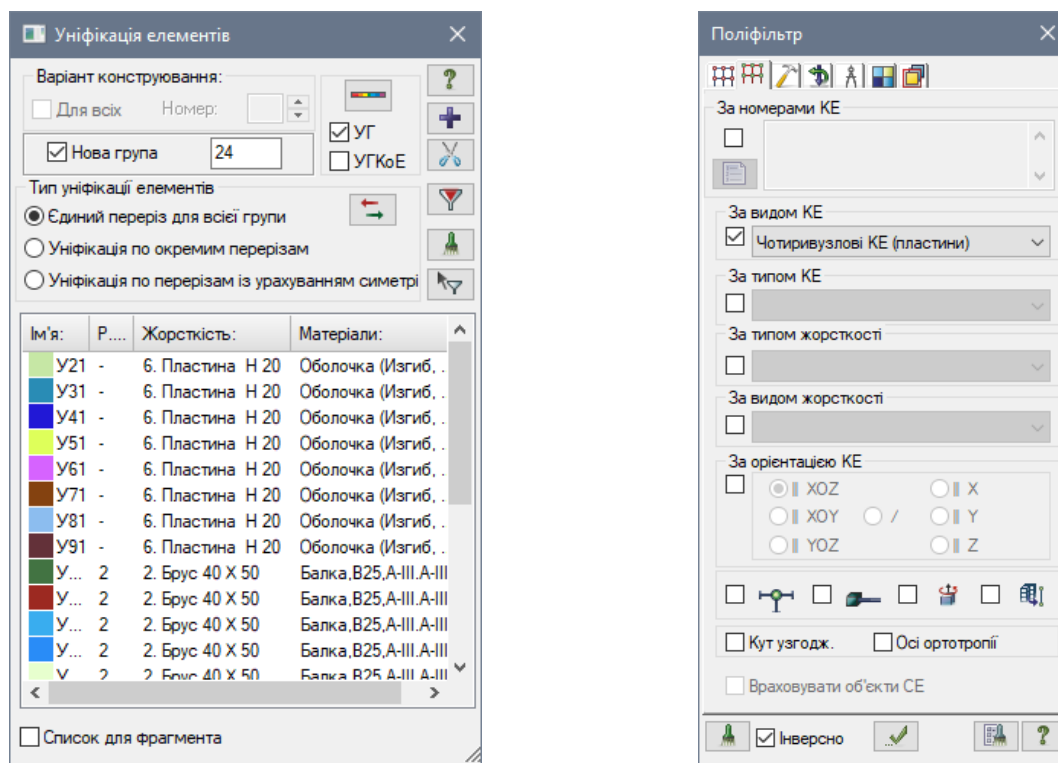


Рисунок 12.2 – Уніфікація елементів

Задання навантажень.

11. Постійні: власна вага конструкцій, вага перегородок, покриттів.
12. Тимчасові: експлуатаційне навантаження.
13. Кліматичні: снігове та вітрове.

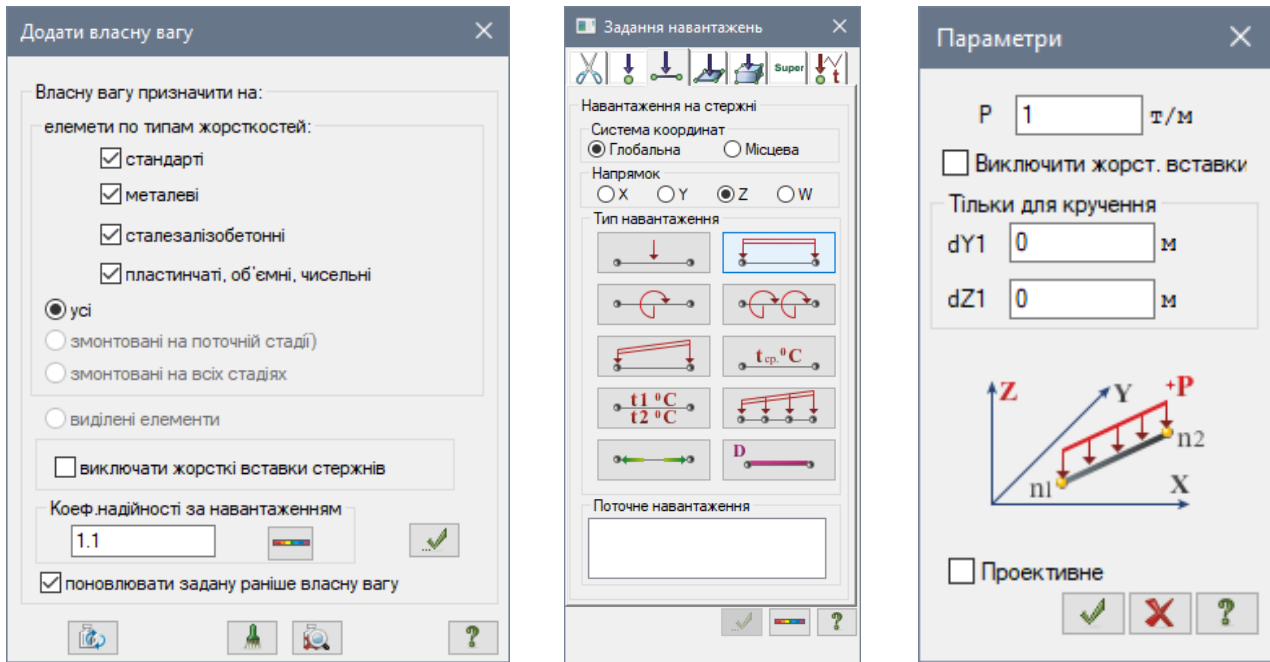


Рисунок 12.3 – Задання навантажень

Формування комбінацій навантажень.

14. ULS – граничні стани тримальної здатності.

15. SLS – граничні стани придатності.

Налаштування фізично нелінійного розрахунку

16. Вибрати тип нелінійності – фізична.

17. Вказати параметри діаграм матеріалів.

18. Увімкнути урахування тріщиноутворення для залізобетонних елементів.

Виконання розрахунку.

19. Запустити фізично нелінійний розрахунок.

20. Перевірити результати поетапного навантаження.

21. Оцінити зони пластичних деформацій та розкриття тріщин.

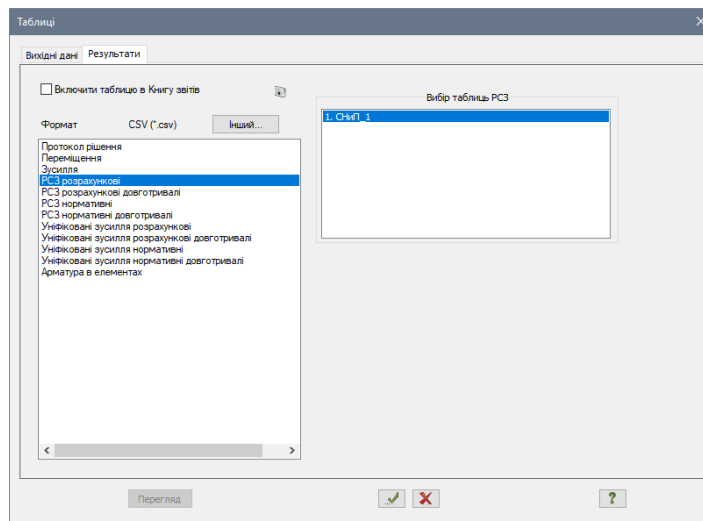


Рисунок 12.4 – Перегляд таблиць результатів розрахунку

Аналіз результатів.

22. Визначити максимальні прогини та переміщення.
23. Переглянути карти напружень у бетоні та арматурі.
24. Порівняти з допустимими нормами (ДБН, Eurocode).
25. Сформулювати висновки щодо тримальної здатності.

Питання для самоперевірки

1. У чому різниця між фізичною та геометричною нелінійністю?
2. Як ураховується робота бетону після утворення тріщин?
3. Чому важливе покрокове навантаження в нелінійному розрахунку?
4. Як визначаються зони пластичних деформацій у моделі?
5. Які основні параметри необхідно ввести для моделі арматури?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 13

Розрахунок металевої ферми з круглих профілів

Мета роботи полягає у демонстрації процедури розрахунку вузла металевої ферми, виконаної з круглих трубчастих елементів, із використанням сучасних розрахункових методів. У межах завдання передбачається показ порядку редагування параметрів, що задаються користувачем, та перевірки тримальної здатності вузла відповідно до нормативних вимог.

Додатковою метою є ознайомлення з особливостями зміни геометричних та жорсткісних характеристик елементів конструкції з метою забезпечення необхідної міцності та надійності роботи вузла в умовах проєктних навантажень.

Вихідні дані

1. Схема ферми та закріплення – згідно з рисунком 13.1.
2. Передбачувані перерізи елементів ферми:
 - верхній пояс – труба безшовна гарячекатана $\text{Ø}159 \times 7.5$ мм;
 - нижній пояс – труба безшовна гарячекатана $\text{Ø}133 \times 5$ мм;
 - крайні розкоси (1–10, 2–10, 9–17, 8–17) – труба $\text{Ø}76 \times 5$ мм;
 - інші розкоси – труба $\text{Ø}63.5 \times 5$ мм.
3. Матеріал: сталь С235.
4. Коефіцієнти:
 - умов роботи $\gamma_c = 0.9$;
 - надійності за призначенням $\gamma_n = 0.95$.
5. Розрахункові зусилля у вузлі (див. рис. 20.2):
 - пояс: $N_x = -255$ кН.
 - розкіс 1: $N_x = 120$ кН.
 - розкіс 2: $N_x = -196$ кН.

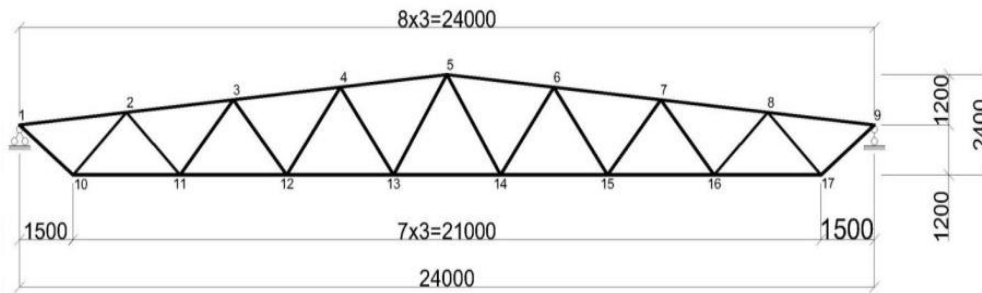


Рисунок 13.1 – Геометрія металевої ферми

Алгоритм виконання

Запуск та створення нового вузла.

1. Створити новий вузол: Файл → Новий → Вузол або кнопка на панелі інструментів.
2. У вікні Вибір типу вузла обрати:
 - тип конструкції: Вузли ферм;
 - підтип: Труба кругла (відповідний варіант на рисунку).
3. Натиснути «ОК».

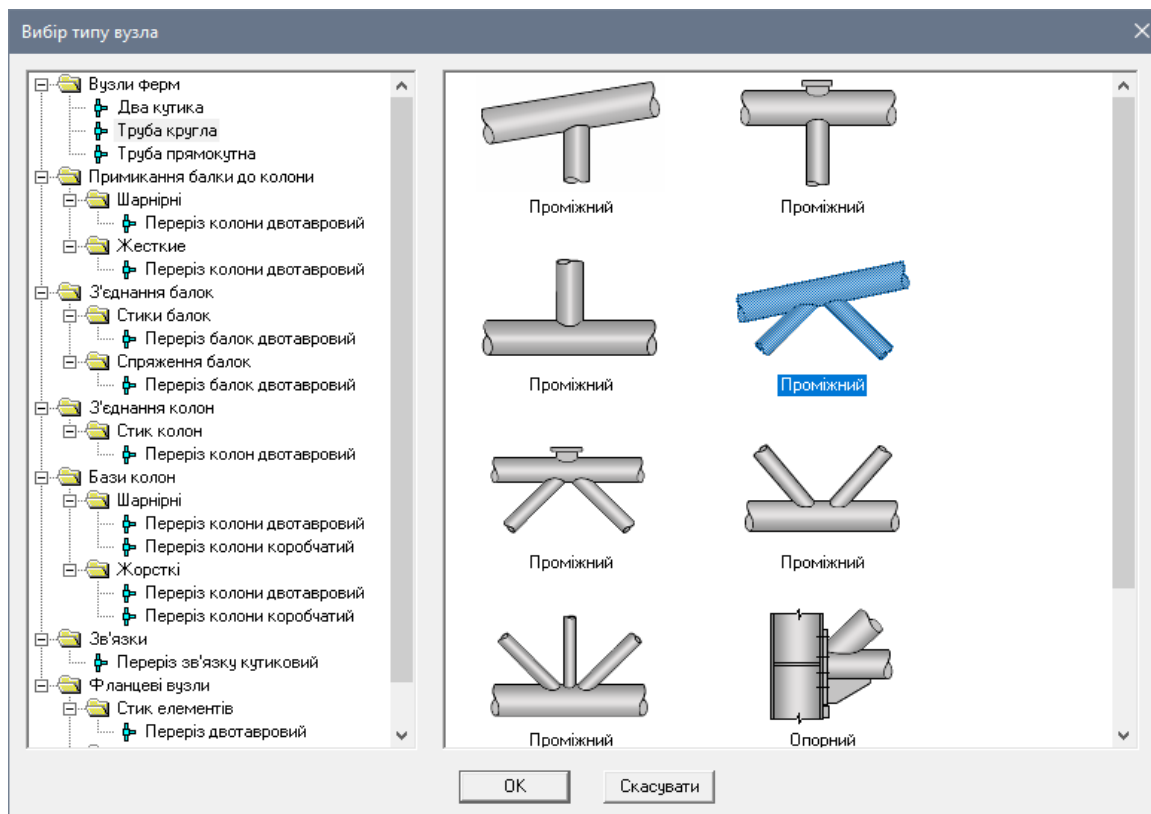


Рисунок 13.2 – Вибір типу вузла

Загальні параметри вузла.

4. У діалоговому вікні Загальне вказати:

- найменування вузла – Вузол ферми 1;
- $\gamma_n = 0.95$;
- $\gamma_c = 0.9$.

5. Для групи Шви:

• властивості: коефіцієнт умов роботи $\gamma_c = 0.9$; марка дроту – Св-10ГА.

6. За необхідності – налаштувати Фактори ризику:

- нормоване значення: Z25.
- жорсткість з'єднання: Середня.

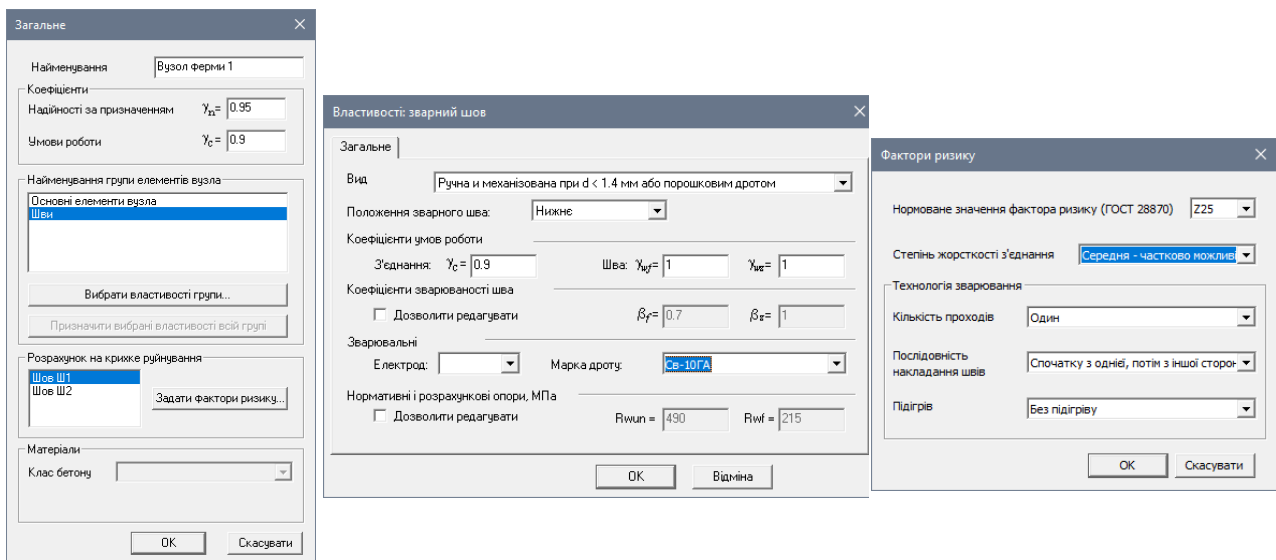


Рисунок 13.3 – Задання параметрів вузла

Введення зусиль.

7. У вікні Розрахункові зусилля задати:

- пояс: –255 кН.
- розкіс 1: 120 кН.
- розкіс 2: –196 кН.

Розрахункові зусилля

	Елемент	КЕ	пер.	Nx, кН	My, кНм	Qz, кН	Mz, кНм	Qy, кН	Нав:
1	Пояс	-1	-1	-255.000	0.000	0.000	0.000	0.000	Постій
2	Розкіс 1	-1	-1	120.000	0.000	0.000	0.000	0.000	Постій
3	Розкіс 2	-1	-1	-196.000	0.000	0.000	0.000	0.000	Постій

Додати рядок
Видалити рядки
ОК
Скасувати

Рисунок 13.4 – Розрахункові зусилля

Задання геометрії та перерізів.

8. Відкрити: Редагувати → Параметри вузла.
9. Для Поясу:
 - профіль: труби безшовні гарячедеформовані;
 - розмір: $\text{Ø}152 \times 6$ мм;
 - сталь: ВСт3кп.
10. Для розкосу 1:
 - $\text{Ø}63.5 \times 5$ мм, сталь ВСт3кп.
11. Для розкосу 2:
 - $\text{Ø}73 \times 5$ мм, сталь ВСт3кп.
12. Задати довжини:
 - пояс: 3015 мм;
 - розкіс 1: 2121 мм;
 - розкіс 2: 2121 мм.
13. Задати кути нахилу:
 - пояс: -5.42° ;
 - розкіс 1: -135° ;
 - розкіс 2: -44.59° .

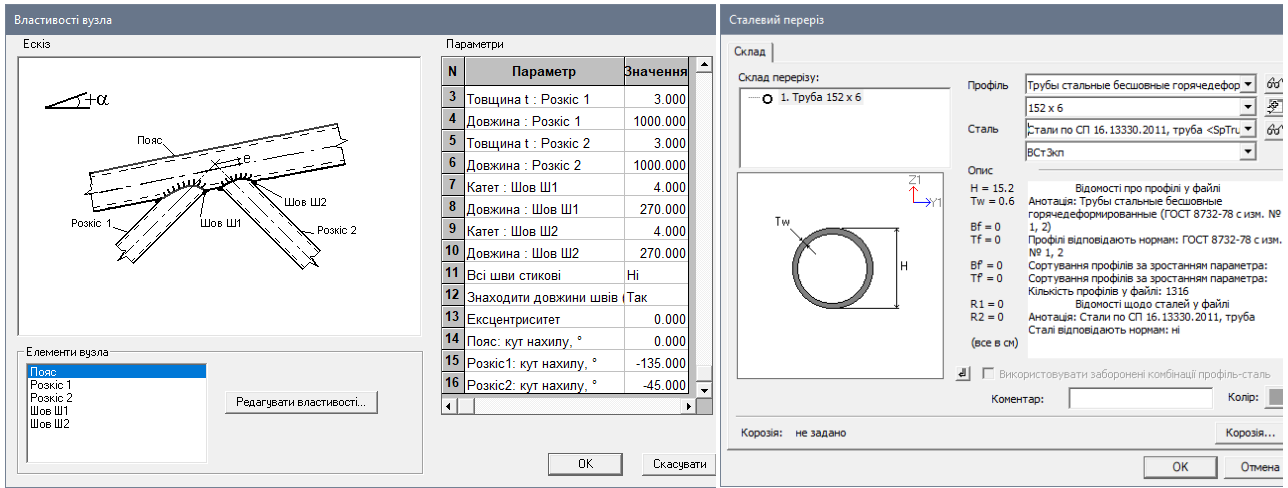


Рисунок 13.5 – Задання геометрії та перерізів

Аналіз результатів та коригування.

14. Після перевірки виявлено, що елементи не відповідають вимогам міцності.

Параметр	Властивість	Значення	Відсоток використання, %	Внутрішні зусилля				
				N, кН	M _y , кНм	Q _z , кН	M _z , кНм	Q _y , кН
Пояс	Товщина t	6.0 мм	159.8	-255.000*	0.000	0.000	0.000	0.000
	Довжина	3015.0 мм						
Розкіс 1	Товщина t	5.0 мм	100.4	120.000*	0.000	0.000	0.000	0.000
	Довжина	2121.0 мм						
Розкіс 2	Товщина t	5.0 мм	115.6	-196.000*	0.000	0.000	0.000	0.000
	Довжина	2121.0 мм						
Шов Ш1	Катет	4.0 мм	115.2	120.000*	0.000	0.000	0.000	0.000
	Довжина	231.0 мм						
Шов Ш2	Катет	4.0 мм	143.4	-196.000*	0.000	0.000	0.000	0.000
	Довжина	303.0 мм						
Всі шви стикові	--	Ні	--	--	--	--	--	--
Знаходити довжини швів (для труб)	--	Так	--	--	--	--	--	--
Ексцентриситет	--	0.0 мм	--	--	--	--	--	--
Пояс: кут нахилу, °	--	-5	--	--	--	--	--	--
Розкіс1: кут нахилу, °	--	-135	--	--	--	--	--	--
Розкіс2: кут нахилу, °	--	-44	--	--	--	--	--	--

Рисунок 13.6 – Результати перевірки параметрів вузла до коригування

15. Виконати коригування:

- пояс: $\text{Ø}152 \times 8$ мм;
- розкіс 1: $\text{Ø}63.5 \times 5.5$ мм;
- розкіс 2: $\text{Ø}73 \times 6$ мм;
- катети швів: № 1 – 5 мм, № 2 – 6 мм.

16. Повторити перевірку.

Вузол ферми 1 : Результати перевірки (СІП 16.13330.2011)								
Параметр	Властивість	Значення	Відсоток використання,%	Внутрішні зусилля				
				N, кН	M _y , кНм	Q _x , кН	M _x , кНм	Q _y , кН
Пояс	Товщина t	8.0 мм	97.6	-255.000*	0.000	0.000	0.000	0.000
	Довжина	3015.0 мм						
Розвіс 1	Товщина t	5.5 мм	90.7	120.000*	0.000	0.000	0.000	0.000
	Довжина	2121.0 мм						
Розвіс 2	Товщина t	6.0 мм	94.8	-196.000*	0.000	0.000	0.000	0.000
	Довжина	2121.0 мм						
Шов III1	Катег	5.0 мм	92.2	120.000*	0.000	0.000	0.000	0.000
	Довжина	231.0 мм						
Шов III2	Катег	6.0 мм	95.6	-196.000*	0.000	0.000	0.000	0.000
	Довжина	303.0 мм						
Всі шви стикові	--	Ні	--	--	--	--	--	--
Знаходки довжини швів (для труб)	--	Так	--	--	--	--	--	--
Ексцентриситет	--	0.0 мм	--	--	--	--	--	--
Пояс: кут нахилу, °	--	-5	--	--	--	--	--	--
Розвіс 1: кут нахилу, °	--	-135	--	--	--	--	--	--
Розвіс 2: кут нахилу, °	--	-44	--	--	--	--	--	--

Рисунок 13.7 – Результати перевірки параметрів вузла після коригування

Питання для самоперевірки

1. Які основні параметри необхідно вказати при створенні нового вузла ферми у LIRA-FEM?
2. Як впливають коефіцієнти γ_n та γ_c на результати перевірки?
3. У чому полягає процедура задання факторів ризику?
4. Які основні причини невиконання умови міцності вузла?
5. Як зміна геометрії або товщини стінки труб впливає на тримальну здатність?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 14

Розрахунок просторового каркаса на пальовій основі

Мета роботи полягає у засвоєнні методики моделювання просторових каркасів на пальових фундаментах із використанням сучасних програмних засобів розрахунку. У межах завдання передбачається опанування роботи з пружними зв'язками, що моделюють палі та їх взаємодію з ґрунтовою основою, для забезпечення коректного відображення просторової роботи системи «каркас – фундамент – основа».

Важливою складовою є навчання проведенню розрахунків та аналізу переміщень, внутрішніх зусиль у палях і елементах каркаса, що дозволяє

комплексно оцінити напружено-деформований стан будівлі та ефективність роботи фундаментної системи.

Вихідні дані

1. Однопрогонова одноповерхова будівля. Розмір прогону – 6 м, крок колон – 6 м, висота поверху – 4 м. Бічні звіси плити ростверку – 1 м.
2. Перерізи елементів:
 - балки – тавровий переріз висотою 500 мм (ширина полиці – 500 мм, товщина полиці – 200 мм, товщина стінки – 300 мм);
 - колони – прямокутний переріз розміром 400 мм × 400 мм;
 - плита покриття – товщина 200 мм;
 - плита ростверку – товщина 500 мм.
3. Конструктивні елементи: колони, ригелі, плити перекриття, фундаментна плита.
4. Матеріал: бетон класу С32/40, арматура класу А500С, палі – залізобетонні.
5. Навантаження: постійне, тимчасове, снігове, вітрове.
6. Тип пальової основи: буронабивні або забивні палі із заданими характеристиками ґрунту.

Алгоритм виконання

Створення нової задачі.

1. Задати одиниці вимірювання – метри, кН.

2. Створити просторову задачу.

Геометрична модель.

3. Ввести координати вузлів за планом і висотою.

4. Задати стрижневі елементи (колони, ригелі) та пластинчасті елементи (плити перекриття, фундаментну плиту).

5. Переконатися у коректності просторової схеми (без відокремлених вузлів).

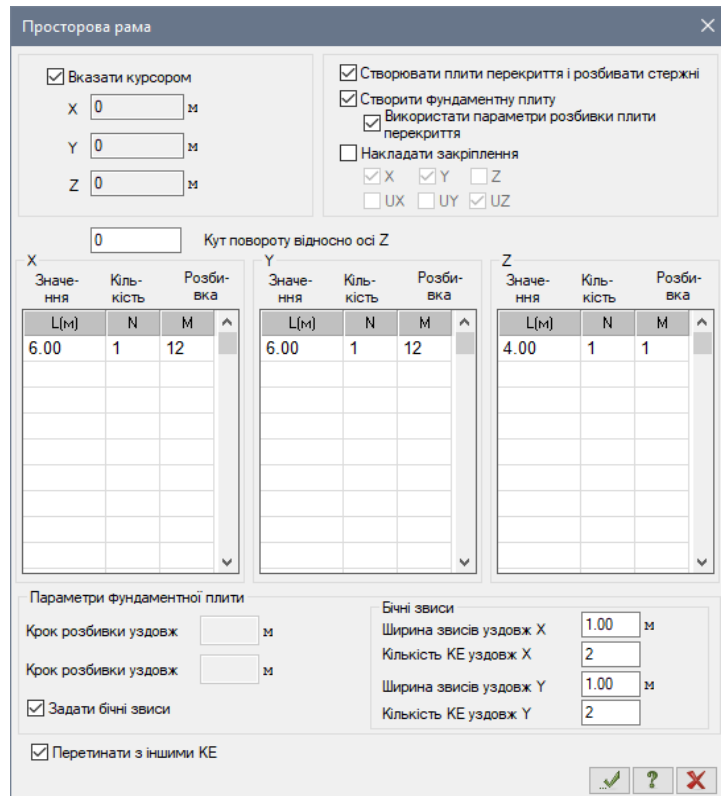


Рисунок 14.1 – Створення геометричної моделі

Призначення матеріалів та перерізів.

6. Задати фізико-механічні характеристики бетону та арматури.
7. Для фундаментної плити та пальь обрати відповідні перерізи.
8. У разі необхідності задати фізично нелінійні властивості матеріалів.

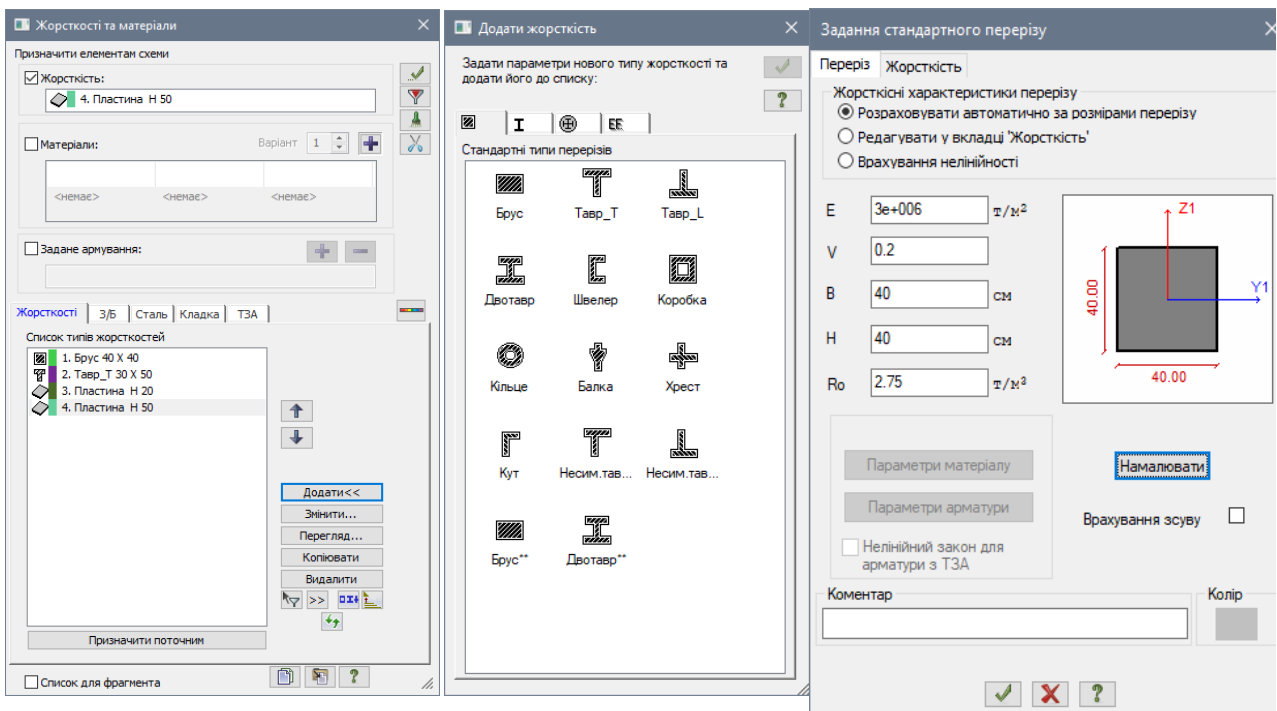


Рисунок 14.2 – Задання жорсткості та перерізів

Моделювання пальової основи.

9. Для кожної палі ввести елемент пружного зв'язку з параметрами жорсткості (коефіцієнти постелі, задані за розрахунком або з норм).

10. Розташувати палі згідно з планом фундаменту.

11. За необхідності змоделювати палі як стрижневі елементи з фіксованими вузлами в ґрунті.

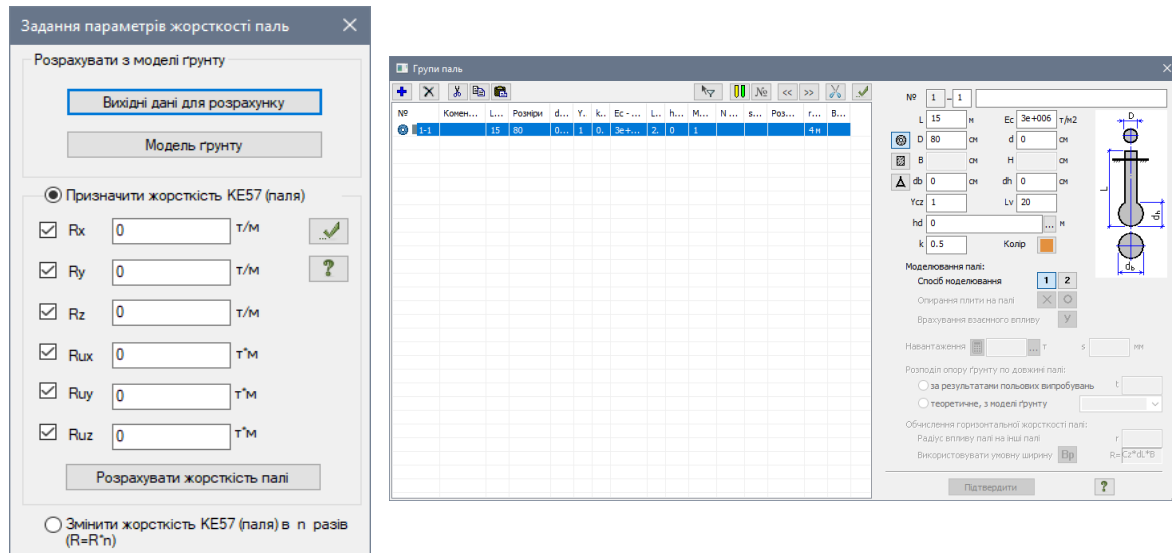


Рисунок 14.3 – Задання параметрів жорсткості паль

Граничні умови.

12. Закріпити палі в нижніх вузлах (повне защемлення або пружні умови, залежно від моделі).

13. Для верхніх вузлів паль задати жорсткий зв'язок із плитою фундаменту.

Задання навантажень.

14. Постійні: власна вага конструкцій, вага заповнення.

15. Тимчасові: експлуатаційні навантаження на перекриття.

16. Кліматичні: сніг, вітер.

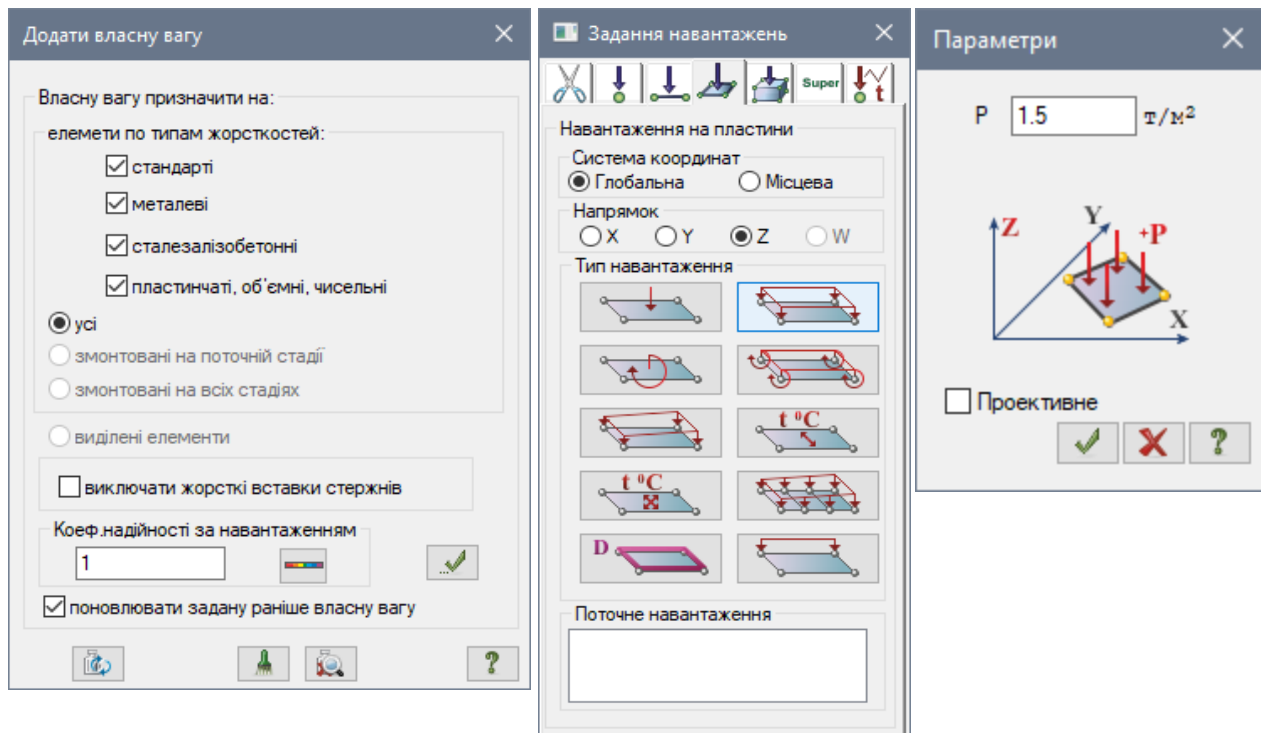


Рисунок 14.4 – Задання навантажень

Формування комбінацій навантажень.

- 17. ULS – для перевірки тримальної здатності.
- 18. SLS – для оцінки придатності конструкції.

Виконання розрахунку.

- 19. Запустити розрахунок моделі.

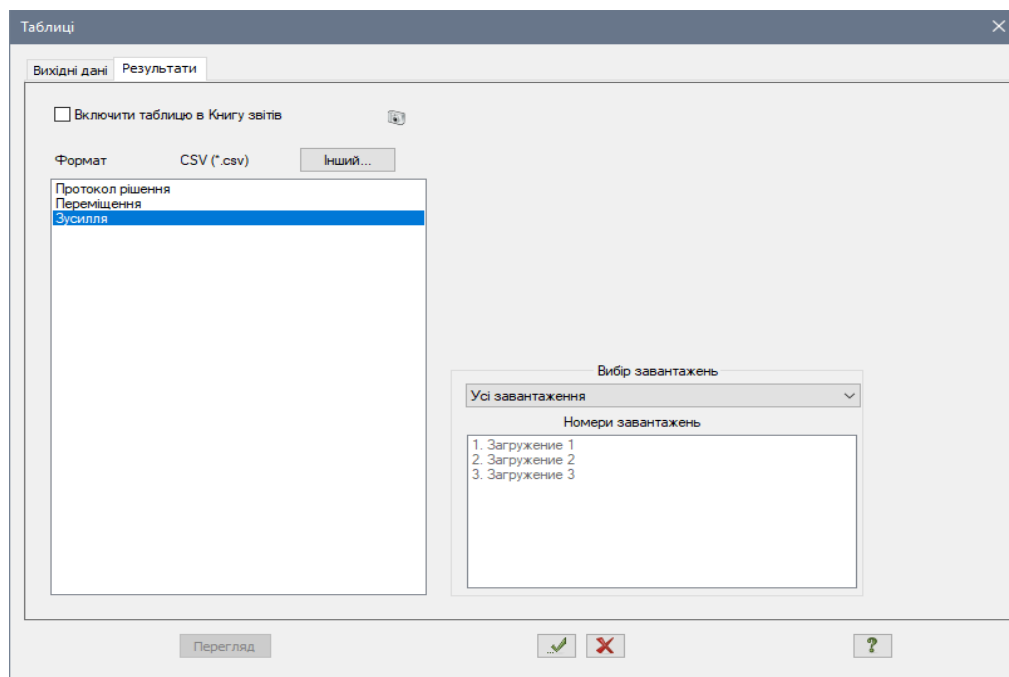


Рисунок 14.5 – Формування та перегляд таблиць результатів розрахунку

20. Отримати переміщення вузлів, зусилля у палях і конструктивних елементах.

21. Визначити максимальні зусилля в палях та порівняти з розрахунковою тримальною здатністю.

Аналіз результатів.

22. Перевірити переміщення та прогини – порівняти з допустимими нормами.

23. Проаналізувати рівномірність розподілу зусиль по палях.

24. Визначити необхідність зміни розташування або кількості паль.

Питання для самоперевірки

1. Як у моделі LIRA-FEM задається палі як пружні зв'язки?
2. Чим відрізняється моделювання палі стрижневим елементом від пружного зв'язку?
3. Які параметри визначають жорсткість палі у розрахунку?
4. Як перевірити рівномірність розподілу навантаження між палями?
5. Які комбінації навантажень використовуються для перевірки тримальної здатності та придатності?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 15

Моделювання сталобетонного перерізу

Мета роботи полягає у засвоєнні принципів створення та аналізу сталобетонних перерізів у програмному комплексі LIRA-FEM. У межах виконання завдання передбачається навчання задання сумісної роботи сталі та бетону в межах одного перерізу для коректного моделювання їх взаємодії в умовах експлуатаційних навантажень.

Додатковою метою є опанування методики перевірки тримальної здатності та жорсткості сталобетонних елементів відповідно до чинних

нормативних вимог, що дозволяє забезпечити надійність і ефективність роботи конструкцій.

Вихідні дані

1. Переріз стале залізобетонного перекриття з монолітною плитою по сталевому профільованому настилу (рис. 15.1):

- залізобетонна плита: матеріал плити – бетон С25/30; арматурні включення: ДСТУ 9130:2021, клас – А400С, Ø20 мм;
- профіль сталевий листовий гнучий з трапецієподібними гофрами: висота $h = 116$ мм, $B_1 = 187$ мм, $t = 1.2$ мм; матеріал – сталь оцинкована;
- балка: несиметричний двотавр (верхній пояс – 150×12 ; нижній пояс – 630×10 ; стінка – 320×16); матеріал – сталь прокатна.

2. Матеріали: бетон класу С32/40, сталь класу S355.

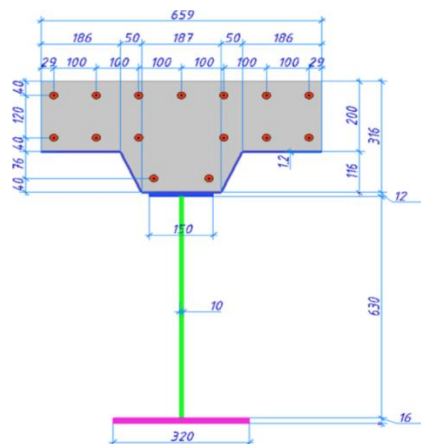


Рисунок 15.1 – Поперечний переріз стале залізобетонного перекриття

Алгоритм виконання

Створення нової задачі та перерізу.

1. Запустити модуль АРМ «Перерізи» у LIRA-FEM.
2. Обрати тип перерізу – сталебетонний.
3. Ввести основні розміри бетонної частини (висота, ширина, товщина полиць тощо).

Додавання сталевих елементів.

4. Вибрати тип сталевого профілю (двотавр, швелер, пластина).

5. Задати його положення всередині бетонної частини – координати, орієнтація.

6. Вказати клас сталі.

Призначення матеріалів.

7. Для бетону – задати модуль пружності, міцність на стиск, вагу.

8. Для сталі – модуль пружності, межу текучості, вагу.

9. Перевірити одиниці вимірювання.

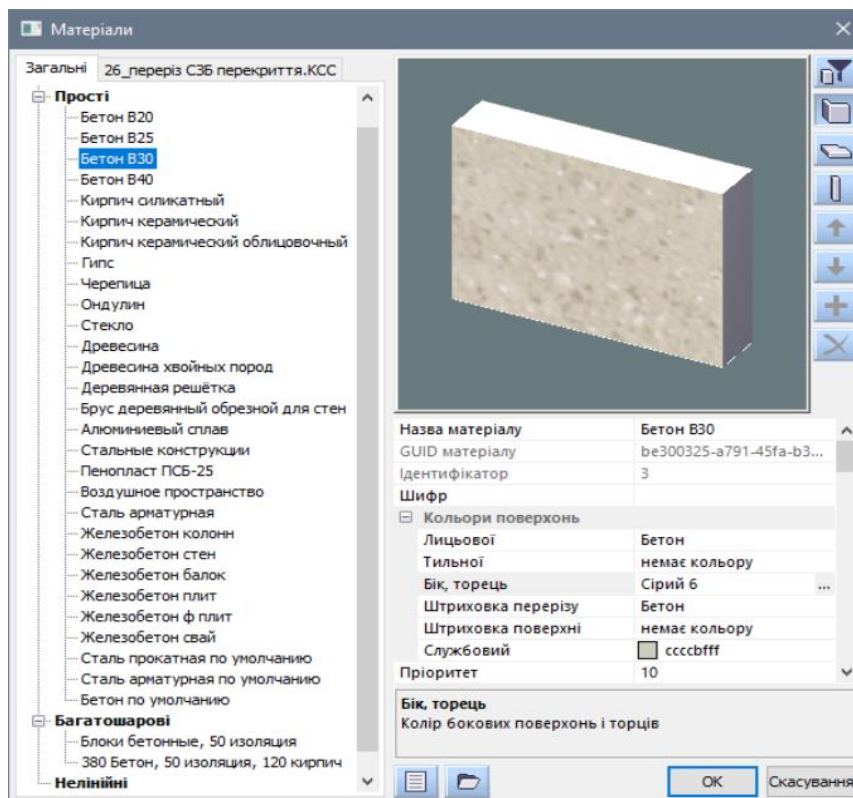


Рисунок 15.1 – Призначення матеріалів

Задання арматури (за потреби).

10. Якщо в перерізі є додаткова арматура – ввести діаметр, кількість стержнів та їх розташування.

11. Призначити клас арматури.

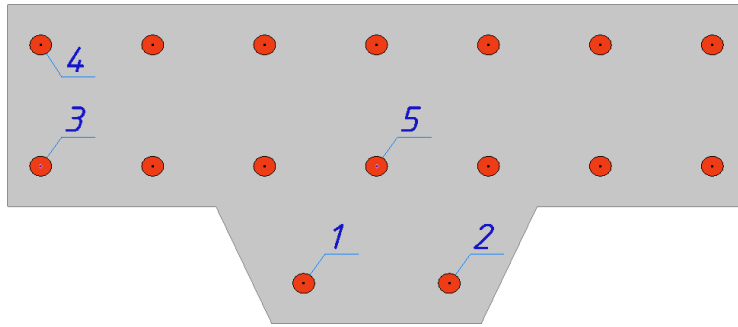


Рисунок 15.2 – Контур перерізу з арматурними включеннями

Задання розрахункових зусиль.

12. Ввести значення N , M_x , M_y , Q_x , Q_y згідно з результатами статичного розрахунку.

13. Переконатися, що знак зусиль відповідає прийнятій у програмі системі (стискання – «+», розтягнення – «-»).

Виконання перевірки.

14. Запустити розрахунок перерізу.

15. Аналізувати результати: коефіцієнти використання тримальної здатності, напруження в бетоні та сталі, прогини.

Позначення	Значення	Одиниці	Найменування
Геометричні характеристики всього перерізу			
Xo	1.008	мм	Координата x центру тяжіння в поточній системі координат
Yo	-187.222	мм	Координата y центру тяжіння в поточній системі координат
φ	0.01	°	Поворот головної осі перерізу Y1 відносно осі x поточної системи координат
Ry	314.07	мм	Радіус інерції відносно головної осі Y1
Rz	152.81	мм	Радіус інерції відносно головної осі Z1
Pext	3809.45	мм	Периметр зовнішніх контурів
Pint	0	мм	Периметр внутрішніх контурів
Ro	3.064	т/м ³	Усереднена щільність перерізу
g	0.546	тс/м	Усереднена погонна вага
Y-	70.72	мм	Ядрова відстань у від'ємному напрямку головної осі Y1
Y+	70.78	мм	Ядрова відстань в додатньому напрямку головної осі Y1
Z-	318.84	мм	Ядрова відстань у від'ємному напрямку головної осі Z1
Z+	148.39	мм	Ядрова відстань в додатньому напрямку головної осі Z1
Крутильні характеристики			
Yt	16.21	мм	Координата Y1 центру крутіння в системі координат головних осей Y1oZ1
Zt	110.87	мм	Координата Z1 центру крутіння в системі координат головних осей Y1oZ1
Зсувні характеристики			
Ys	15.73	мм	Координата Y1 центра зсуву в системі координат головних осей Y1oZ1
Zs	118.05	мм	Координата Z1 центра зсуву в системі координат головних осей Y1oZ1
Жорсткісні характеристики			
EA	9.1786e5	тс	Осьова жорсткість
EIu	90539	тс·м ²	Згинальна жорсткість відносно центральної осі U
EIV	21432	тс·м ²	Згинальна жорсткість відносно центральної осі V
EIuv	-17.23	тс·м ²	Відцентрова жорсткість відносно центральних осей UV
EIy	90539	тс·м ²	Згинальна жорсткість відносно головної осі Y1
EIZ	21432	тс·м ²	Згинальна жорсткість відносно головної осі Z1
ESy	1.1431e5	тс·м	Добуток статичного моменту напівперерізу на його модуль пружності відносно головної осі Y1
ESz	54274	тс·м	Добуток статичного моменту напівперерізу на його модуль пружності відносно головної осі Z1
GJt	4258	тс·м ²	Жорсткість на кручення - добуток модуля зсуву на крутильний момент інерції
EIw	678.569065	тс·м ⁴	Секторіальна жорсткість - добуток модуля пружності на секторіальний момент інерції
GFy	2.4006e5	тс	Зсувна жорсткість Y1 - добуток модуля зсуву на зсувну площу відносно головної осі Y1
GFz	21466	тс	Зсувна жорсткість Z1 - добуток модуля зсуву на зсувну площу відносно головної осі Z1

Рисунок 15.3 – Перегляд і аналіз характеристик перерізу

Аналіз та висновки.

16. Якщо коефіцієнти використання > 1 – змінити розміри або матеріали.
17. Проаналізувати сумісність деформацій сталі та бетону.
18. Зробити висновок про ефективність перерізу.

Питання для самоперевірки

1. Які основні відмінності роботи сталобетонних і звичайних залізобетонних елементів?
2. Як у LIRA-FEM задається сумісна робота сталі та бетону?

3. Які параметри визначають тримальну здатність сталобетонного перерізу?
4. Чому важливо перевіряти сумісність деформацій?
5. Як впливає розташування сталевих елементів у бетоні на жорсткість і міцність перерізу?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 16

Стійкість каркаса до прогресуючого обвалення

Мета роботи полягає в опануванні методики моделювання прогресуючого обвалення у просторових каркасах із використанням програмного комплексу LIRA-FEM. У межах завдання передбачається навчання застосуванню спеціальних розрахункових сценаріїв для оцінки втрати стійкості конструкції після випадкових пошкоджень окремих елементів.

Важливою складовою є розуміння впливу вилучення елементів каркаса на перерозподіл зусиль, зміну напружено-деформованого стану та загальну тримальну здатність системи, що дозволяє оцінювати надійність і безпеку будівлі в умовах аварійних ситуацій.

Вихідні дані

1. Матеріали: сталь (S355), бетон (C32/40).
2. Навантаження (характеристичні):
 - вага плит перекриття $6 \text{ м} \times 0.33 \text{ т/м}^2 = 1.98 \text{ т/м}$;
 - перегородки $6 \text{ м} \times 0.092 \text{ т/м}^2 = 0.552 \text{ т/м}$;
 - конструкція підлоги $6 \text{ м} \times 0.072 \text{ т/м}^2 = 0.432 \text{ т/м}$;
 - корисне навантаження $6 \text{ м} \times 0.15 \text{ т/м}^2 = 0.9 \text{ т/м}$;
 - вітер 0.023 т/м^2 .
3. Навантаження (граничні розрахункові):
 - вага плит перекриття $1.98 \text{ т/м} \times 1.1 = 2.18 \text{ т/м}$;
 - перегородки $0.552 \text{ т/м} \times 1.2 = 0.662 \text{ т/м}$;
 - конструкція підлоги $0.432 \text{ т/м} \times 1.3 = 0.562 \text{ т/м}$;
 - корисне навантаження $0.9 \text{ т/м} \times 1.3 = 1.17 \text{ т/м}$;

- вітер $0.023 \text{ т/м}^2 \times 1.4 = 0.032 \text{ т/м}^2$.

4. Умови пошкодження: вилучення одного або кількох елементів (колони, ригелі) у моделі.

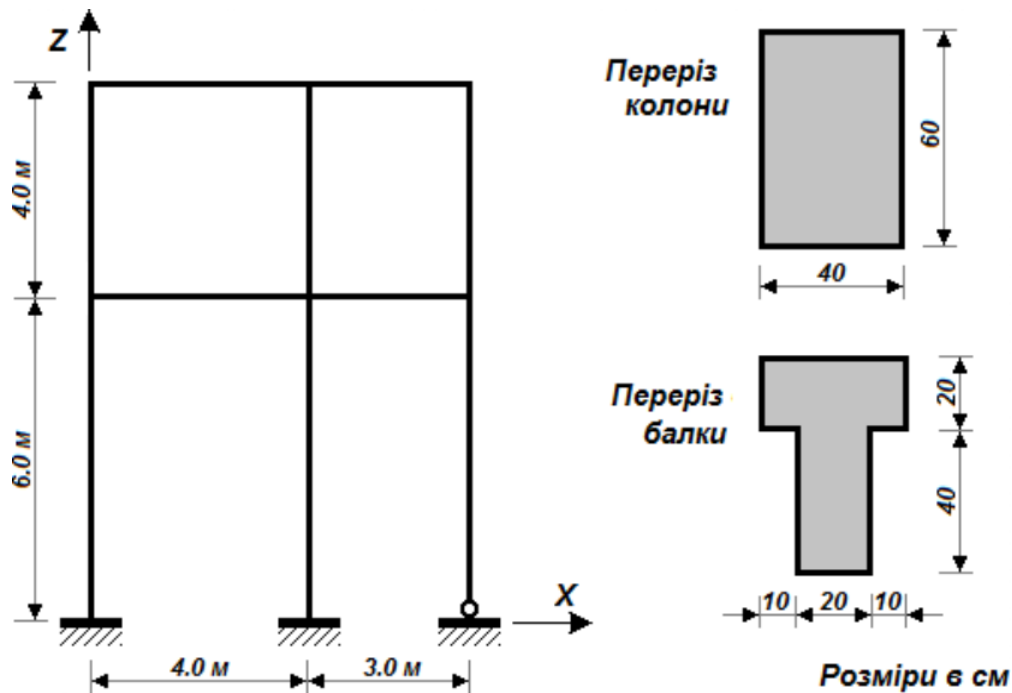


Рисунок 16.1 – Вихідні дані

Алгоритм виконання

Створення та підготовка базової моделі.

1. Запустити LIRA-FEM і створити нову просторову модель каркаса.
2. Ввести геометрію будівлі.
3. Задати жорсткі диски перекриттів (за необхідності) для коректного розподілу навантажень.



Рисунок 16.2 – Загальний вигляд рами після додавання елементів

Призначення властивостей елементів.

4. Для колон, ригелів, плит – задати перерізи та матеріали (сталь / бетон).

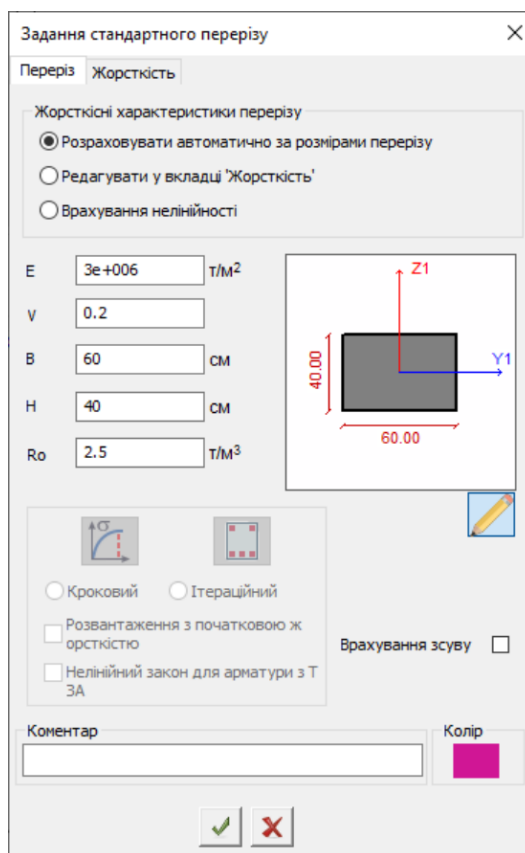


Рисунок 16.3 – Задання стандартного перерізу

5. Для кожного матеріалу вказати модуль пружності, густину, розрахункову міцність.
6. Призначити кінцеві закріплення колон (згідно з реальною конструктивною схемою).

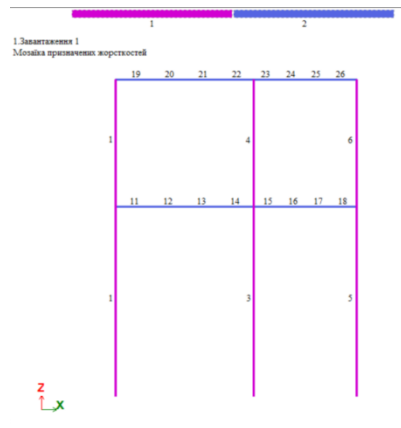


Рисунок 16.3 – Мозаїка призначених жорсткостей

Задання навантажень.

7. Автоматично врахувати власну вагу конструкції.

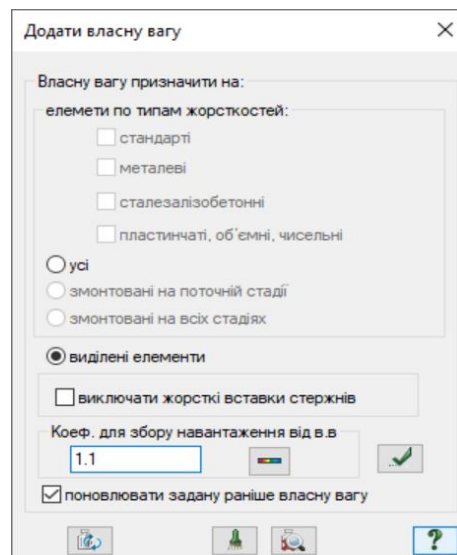


Рисунок 16.4 – Діалогове вікно «Додати власну вагу»

8. Додати постійні та тимчасові навантаження (корисне, снігове, вітрове) за нормами.
9. Створити необхідні комбінації навантажень (КН) згідно з нормами.



Рисунок 16.5 – Діалогове вікно «Задання навантажень»

Виконання розрахунку базової моделі.

10. Запустити розрахунок у пружно-лінійній постановці.
11. Перевірити переміщення, зусилля, напруження в елементах.
12. Зберегти результати як базовий стан для подальшого порівняння.

Моделювання випадкового пошкодження.

13. Визначити елемент(и), які будуть «вилучені» для моделювання аварійної ситуації (наприклад, середня колона першого поверху).
14. Видалити вибраний елемент або замінити його матеріал на «дуже м'який» (майже нульова жорсткість) для імітації руйнування.

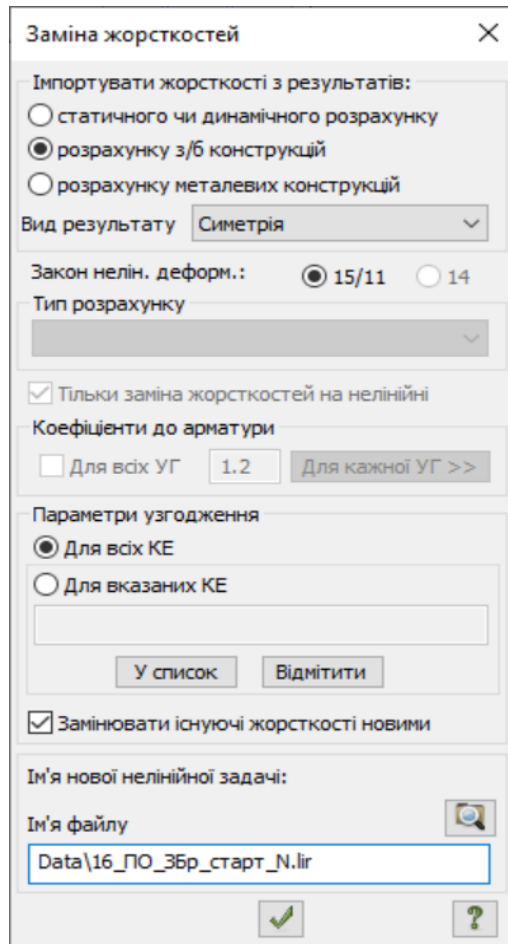


Рисунок 16.6 – Діалогове вікно «Заміна жорсткостей»

15. Переконалися, що геометрична схема залишилася коректною.

Повторний розрахунок.

16. Запустити розрахунок моделі з вилученим елементом.

17. Порівняти переміщення, зусилля та напруження з базовим станом.

18. Визначити, чи не перевищені допустимі значення прогинів і напружень.

Аналіз перерозподілу зусиль.

19. Оцінити, як змінюється робота сусідніх елементів (колон, ригелів, плит) після вилучення одного елемента.

20. Виявити елементи, які стали «критичними» після пошкодження.

21. Розглянути, чи потрібне додаткове підсилення конструкції.

Формування висновків.

22. Зробити висновок про стійкість каркаса до прогресуючого обвалення.

23. Якщо система нестійка – запропонувати заходи для підвищення стійкості (резервування тримальних елементів, додаткові зв'язки тощо).

Питання для самоперевірки

1. Що таке прогресуюче обвалення і які його основні причини?
2. Як у LIRA-FEM можна змодельовати випадкове руйнування елемента?
3. Чому важливо аналізувати перерозподіл зусиль після пошкодження?
4. Які заходи можуть підвищити стійкість конструкції до прогресуючого обвалення?
5. Як інтерпретувати результати порівняння базового і пошкодженого станів конструкції?

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Програмний комплекс ЛІРА-САПР. Приклади розрахунку і проєктування [Електрон. ресурс] : навч. посіб. – Електрон. текст. дані. – Київ : Ліра-Ленд, 2022. – 635 с. – Режим доступу: https://www.liraland.ua/download/private/lira/2023/lira_sapr_examples_ua.pdf, вільний (дата звернення: 22.08.2025). – Назва з екрана.
2. ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи. Норми проєктування : зі змінами № 1 та № 2 [Електрон. ресурс]. – Чинний від 2007–01–01. – Електрон. текст. дані. – Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2020. – 72 с. – Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3070574263435003317/2023-03-31/670e67af-b4c0-4a2f-b855a6a41520d31f.pdf, вільний (дата звернення: 22.08.2025). – Назва з екрана.
3. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення : із зміною № 1 [Електрон. ресурс]. – Чинний від 2020–06–01. – Електрон. текст. дані. – Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2020. – 71 с. – Режим доступу: https://econstruction.gov.ua/files/new_doc/3080063210573792873/2023-04-13/adb4ca1e-8595-4d35-9b22-a858d85864b4.pdf, вільний (дата звернення: 22.08.2025). – Назва з екрана.
4. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проєктування [Електрон. ресурс]. – Чинний від 2011–06–01. – Електрон. текст. дані. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с. – Режим доступу: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/5-1-0-800>, вільний (дата звернення: 22.08.2025). – Назва з екрана.
5. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проєктування : зі зміною № 1 [Електрон. ресурс] – Чинний від 2022–09–01. – Електрон. текст. дані. – Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. – 105 с. – Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3022132243112920267/2023-01-24/7ba57e35-6fb0-40fc-bf78-dfd412593a0f.pdf, вільний (дата звернення: 22.08.2025). – Назва з екрана.
6. ДБН В.2.6-160:2010. Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення : зі зміною № 1 [Електрон. ресурс]. – Чинний від 2020–06–01. – Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2020. – 54 с. – Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3200413563881522897/2023-09-26/9641a3ce-3e67-4a75-aa19-717d7f6f0764.pdf, вільний (дата звернення: 22.008.2025). – Назва з екрана.

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації
до проведення практичних занять та організації самостійної роботи
з навчальної дисципліни

**«КОМП'ЮТЕРНІ МЕТОДИ
РОЗРАХУНКУ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ»**

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна
інженерія, освітня програма «Промислове та цивільне будівництво»)*

Укладачі: **РЕЗНИК** Петро Аркадійович,
ЛУГЧЕНКО Олена Іванівна

Відповідальний за випуск *П. М. Фірсов*
Редактор *О. В. Михаленко*
Комп'ютерне верстання *П. А. Резнік*

План 2025, поз. 581М

Підп. до друку 06.02.2026. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 5,9.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Черноглазівська, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 8386 від 14.07.2025.