

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 1

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Державного університету
«Житомирська політехніка»
«__» _____ 2025 р.,
протокол № __

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ з навчальної дисципліни «Прикладні програми в будівництві»

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр»
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
освітньо-професійна програма «Промислове та цивільне будівництво»
факультет гірничої справи, природокористування та будівництва
кафедра гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т.

Рекомендовано на засіданні
кафедри гірничих технологій та
будівництва ім. проф. Бакка М.Т.
«__» _____ 2025 р.,
протокол № __

Розробники: к.т.н., доц. кафедри гірничих технологій та будівництва
ім. проф. Бакка М.Т. БАЙДА Денис

Житомир
2025

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 122 / 2</i>

УДК 624

Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Прикладні програми в будівництві» для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» у відповідності до освітньо-професійної програми «Промислове та цивільне будівництво».

Укладачі: к.т.н., доц. БАЙДА Денис – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2025. – 122 с.

Рецензенти:

к.т.н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету ПОПОВ Володимир;

к.т.н., доцент, декан факультету гірничої справи, природокористування та будівництва Державного університету «Житомирська політехніка» КОТЕНКО Володимир.

Відповідальний за випуск: завідувач кафедрою гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. – к.т.н. БАШИНСЬКИЙ Сергій.

Конспект лекцій розроблений для здобувачів вищої освіти спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» освітнього ступеня «бакалавр» та містить теоретичні відомості з навчальної дисципліни «Прикладні програми в будівництві».

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 3

ЗМІСТ

ВСТУП	6
Тема 1. Вступ та загальні відомості про прикладні програми в будівництві	7
1.1 Процес проектування будівель та споруд.	7
1.2 Склад проектної документації на будівельний об'єкт	10
1.3 Проблема автоматизації процесу проектування. Поняття системи автоматизованого проектування у будівництві (САПР), в яку входить прикладне програмне забезпечення (ПЗ) або прикладні програми.....	13
1.4 Класифікації САПР та різновиди програм, які реалізують функції САПР у будівництві.	14
1.5 Розвиток прикладних програм для інженерних розрахунків та комп'ютерного моделювання будівельних конструкцій, будівель та споруд.....	17
1.6 Сучасний стан, тенденції та перспективи розвитку інформаційних технологій у будівництві.....	18
1.6.1 Поняття інформаційного моделювання у будівництві (BIM - Building Information Modelling)	18
1.6.2 Класифікація BIM	20
1.6.3 Розвиток BIM у світі та перспективи в Україні	23
Тема 2. Теоретичні основи методу скінченних елементів (самостійна робота).....	29
2.1 Сутність методу скінченних елементів (МСЕ) та його застосування в розрахунках конструкцій будівель та споруд.	29
2.2 Основні положення МСЕ	33
2.3 Алгоритм реалізації методу скінченних елементів	36
2.4 Приклад розрахунку рами методом скінченних елементів	38
Тема 3. Структура ПК «ЛІРА-САПР» та порядок створення розрахункової моделі. Спеціалізовані програмні комплекси сімейства ЛІРА. Знайомство з ПК «ЛІРА-САПР»	45
3.1 Порядок створення розрахункової моделі.....	46
3.1.1 Виділення із об'єкта основних несучих конструкцій	46
3.1.2 Ідеалізація форми й геометричних параметрів моделі. Дискретизація розрахункової схеми на кінцеві моделі	47
3.1.3 Ідеалізація умов обпирання (опорних в'язів).....	48
3.1.4 Ідеалізація матеріалів конструкцій	50
3.1.5 Ідеалізація навантажень і впливів на об'єкт	51
3.1.6 Ідеалізація вузлових з'єднань або взаємодії елементів між собою. ...	52

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 4

3.1.7	Невизначеність розрахункової моделі	53
3.2	Загальна характеристика ПК «ЛІРА-САПР»	55
3.3	Структура ПК «ЛІРА-САПР»	56
3.3.1	Основні розрахункові модулі (МСЕ РОЗРАХУНОК).....	56
3.3.2	Допоміжні розрахункові модулі (програми).....	58
3.3.3	Конструкторські модулі	59
3.3.4	Модулі документування та розробки креслень конструкцій	60
3.3.5	Модулі для конвертації даних	60
3.4	Графічне середовище ПК «ЛІРА-САПР»	60
3.5	Знайомство з ПК «ЛІРА-САПР»	62
3.5.1	Програмний інструментарій комп'ютерних технологій розрахунку і проектування конструкцій	62
3.5.2	Підготовка до створення розрахункової схеми в ПК «ЛІРА-САПР», налаштування каталогів файлів та одиниць виміру.....	69
3.5.3	Створення нового проекту для виконання розрахунку, вибір ознаки схеми	71
3.6	Можливості та призначення спеціалізованих програмних комплексів САПФІР, МОНОМАХ-САПР.....	72
3.6.1	САПФІР (LIRA-CAD).....	72
3.6.2	МОНОМАХ-САПР (МОНОМАХ).....	74
Тема 4. Основи побудови скінчено-елементних моделей в ПК «ЛІРА-САПР».....		81
4.1	Системи координат: глобальна, місцева, локальна та спеціальна.	81
4.2	Бібліотека кінцевих елементів, їх особливості та область використання.....	82
4.3	Створення геометричної моделі об'єкту	85
4.3.1	Використання регулярних фрагментів та шаблонів.....	85
4.3.2	Введення вузлів та створення по вузлам елементів розрахункової схеми	87
4.4	Вибір компонентів розрахункової схеми.....	90
4.5	Виведення інформації про компоненти розрахункової схеми	92
4.6	Відображення характеристик розрахункової схеми.....	94
4.7	Редагування розрахункової моделі.....	95
4.8	Призначення типу елементів	98
4.9	Призначення опорних в'язей	100

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 5

4.10	Моделювання шарнірів	101
4.10.1	Моделювання шарнірів в стрижневих елементах	101
4.10.2	Моделювання шарнірів у площинних елементах	103
4.11	Призначення жорсткостей елементів	105
4.12	Задання навантажень	107
4.13	Розрахункові сполучення зусиль	111
4.14	Збереження розрахункової схеми	112
4.15	Виконання розрахунку	114
Тема 5.	Раціональне розбиття на скінченні елементи	123
Тема 6.	Характеристики жорсткості елементів розрахункової схеми	131
Тема 7.	Інструменти навантаження розрахункової моделі в ПК «ЛІРА-САПР»	132
Тема 8.	Розрахункові сполучення зусиль (РСЗ). Розрахункові сполучення навантажень (РСН)	133
Тема 9.	Розрахунок та конструювання залізобетонних конструкцій	134
Тема 10.	Розрахунок та конструювання металевих конструкцій	135
Тема 11.	Розрахунок конструкцій на пружній основі (самостійна робота) ...	136
Тема 12.	Можливості виконання розрахунків конструкцій на динамічні впливи в ПК «ЛІРА-САПР» (самостійна робота)	137
Тема 13.	Розрахунки конструкцій у нелінійній постановці	138
Тема 14.	Моделювання життєвого циклу конструкцій (самостійна робота) .	139
Тема 15.	Процес та протокол розрахунку моделі	140
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	142

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 6

ВСТУП

Сучасне будівництво не можливо уявити без застосування інформаційних та комунікаційних технологій. В останні десятиріччя ці технології дозволили значно підвищити продуктивність праці інженерів та архітекторів, збільшити їх технічні можливості щодо розробки та реалізації проектів будь-якої складності. Особливе місце серед цих технологій займають прикладні програми для вирішення інженерних задач з моделювання і розрахунків будівельних конструкцій будівель та споруд. Такі програми називають програмно-обчислювальними комплексами (ПОК) і відносять за міжнародно прийнятою термінологією до САЕ-систем (англ. Computer-aided engineering). У сучасному розумінні ці системи являють собою комплекс програм або ПОК, який є одним із елементів системи автоматизованого проектування (САПР) у будівництві. Подібні ПОК дозволяють виконувати інженерні розрахунки і моделювання роботи конструктивних систем будівель і споруд будь-якої складності. Для досягнення поставленої мети студенти повинні оволодіти теоретичними знаннями щодо принципів і технології проектування за допомогою САЕ-програм, набути вмінь і навичок із виконання інженерних розрахунків за допомогою застосування подібних програм під час автоматизованого проектування будівель та споруд. В Україні в проектній практиці широко застосовуються сучасні вітчизняні програмні обчислювальні комплекси для моделювання і розрахунків будівельних конструкцій будівель і споруд, насамперед такі як ЛІРА-САПР і SCAD Office. Тому майбутні фахівці для здійснення успішної роботи в сфері будівництва повинні володіти необхідними сучасними знаннями, вміннями та навичками з даної дисципліни.

В конспекті лекцій наведені теоретичні відомості з курсу дисципліни «Прикладні програми в будівництві» та призначені для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», які навчаються за освітньо-професійною програмою «Промислове і цивільне будівництво».

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 7

Тема 1. Вступ та загальні відомості про прикладні програми в будівництві

1. Процес проектування будівель та споруд.
2. Склад проектно-кошторисної документації на будівельний об'єкт.
3. Проблема автоматизації процесу проектування. Поняття системи автоматизованого проектування у будівництві (САПР), в яку входить прикладне програмне забезпечення (ПЗ) або прикладні програми.
4. Класифікації САПР та різновиди програм, які реалізують функції САПР у будівництві.
5. Розвиток прикладних програм для інженерних розрахунків та комп'ютерного моделювання будівельних конструкцій, будівель та споруд.
6. Сучасний стан, тенденції та перспективи розвитку інформаційних технологій у будівництві. 5.1. Поняття інформаційного моделювання у будівництві (BIM - Building Information Modelling). 5.2. Класифікація BIM. 5.3. Розвиток BIM у світі та перспективи в Україні.

1.1 Процес проектування будівель та споруд.

Створення будівель та споруд починається з розробки проектно-кошторисної документації. Рівень її виконання значною мірою впливає на скорочення строків створення та освоєння виробів, зниження трудомісткості їх виробництва, підвищення надійності та якості.

Розвиток обчислювальної техніки, розповсюдження персональних комп'ютерів і графічних дисплеїв як технічних засобів відображення графічної інформації привели до появи засобів генерації графічних зображень і автоматизованого виконання креслень – комп'ютерної графіки.

Комп'ютерна графіка – сукупність методів і способів перетворення за допомогою комп'ютера даних у графічне зображення і графічного зображення у дані.

Застосування комп'ютерної графіки та САПР дозволяє більшу частину рутинної роботи з проектування передати комп'ютеру і цим самим вивільнити час інженера-конструктора для творчої діяльності, суттєво підвищуючи при цьому якість результатів та скорочуючи строки проектування.

Проектування технічного об'єкту – це створення, перетворення і представлення в зрозумілій формі образу цього ще не існуючого об'єкту на основі виконання комплексу робіт дослідницького, розрахункового і конструкторського характеру. Схема процесу інженерного проектування показана на рисунку 1.1.

Образ об'єкту або його складових частин може створюватися в уяві людини в результаті творчого процесу або генеруватися у відповідності з деякими алгоритмами в процесі взаємодії людини і комп'ютера. У будь-якому випадку інженерне проектування починається за наявності вираженої потреби суспільства в деяких технічних об'єктах, якими можуть бути об'єкти будівництва, промислові вироби або процеси.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 8



Рисунок 1.1 – Процес інженерного проєктування

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 9

В будівництві етапи розробки технічного завдання на проектування та технічної пропозиції здійснюються в рамках передпроектних робіт. Основний цикл проектних робіт включає стадії проектування: ескізний проект, проект (технічне проектування), та робоча документація.

Передпроектними називають роботи, які можуть виконуватись до початку основного циклу робіт з проектування для визначення принципових об'ємно-просторових та містобудівних рішень:

- розроблення попередніх концептуальних архітектурних пропозицій (форескізи);
- розроблення пропозицій щодо розміщення об'єктів будівництва на земельних ділянках (обґрунтування місця розташування, необхідної території та умов будівництва);
- опрацювання технологічних та інженерних характеристик об'єкта;
- складання завдання на виконання інженерних вишукувань;
- обстеження технічного стану та/або обміри існуючих об'єктів, які підлягають реконструкції, капітальному ремонту, та розташованих в зоні впливу будівництва з метою підготовки висновку та/або рекомендацій про можливість виконання робіт;
- збір даних та створення цифрової інформаційної моделі існуючого об'єкта на базі даних інженерно-геодезичних вишукувань, обстеження конструкцій та інженерних систем чи обробки існуючої документації;
- інші види робіт, необхідні для початку процесу проектування.

Вихідними даними до початку основного циклу проектування є:

- містобудівні умови та обмеження забудови земельної ділянки;
- технічні умови;
- завдання на проектування.

Містобудівні умови та обмеження забудови земельної ділянки – документ, що містить комплекс планувальних та архітектурних вимог до проектування і будівництва щодо поверховості та щільності забудови земельної ділянки, відступів будинків і споруд від червоних ліній, меж земельної ділянки, її благоустрою та озеленення, інші вимоги до об'єктів будівництва, встановлені законодавством та містобудівною документацією.

Містобудівні умови та обмеження надаються відповідними уповноваженими органами містобудування та архітектури на підставі містобудівної документації на місцевому рівні на безоплатній основі за заявою замовника.

Технічні умови - це комплекс умов та вимог до інженерного забезпечення об'єкта будівництва, які мають відповідати його розрахунковим параметрам щодо водопостачання (з урахуванням потреб забезпечення пожежогасіння), тепло-, електро- і газопостачання, водовідведення, зовнішнього освітлення, відведення зливових вод та електронних комунікацій.

Завдання на проектування (ТЗ) – це документ який визначає обґрунтовані вимоги замовника до планувальних, архітектурних, інженерних і технологічних рішень об'єкта будівництва, його основних параметрів, вартості та організації його будівництва і складається з урахуванням технічних умов, містобудівних умов та обмежень.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 10

На підставі вихідних даних та завдання на проектування виконується основний цикл проектних робіт, що за змістом може включати декілька стадій.

Результатом проектування, як правило, служить повний комплект документації, що містить достатні відомості для виготовлення об'єкту в заданих умовах.

Зміст технічних завдань на проектування включає в себе:

1. Призначення об'єкту.
2. Умови експлуатації. Разом з якісними характеристиками (представленими у вербальній формі) є числові параметри, для яких вказані області допустимих значень (температура довкілля, зовнішні сили, навантаження і т.п.).
3. Вимоги до вихідних параметрів, тобто до величин, що характеризують властивості об'єкту, які цікавлять споживача.

1.2 Склад проектної документації на будівельний об'єкт

Проектна документація – затверджені текстові та графічні матеріали, якими визначаються містобудівні, об'ємно-планувальні, архітектурні, конструктивні, технічні, технологічні вирішення, а також кошториси об'єктів будівництва.

Склад та зміст проектно-кошторисної документації повинен відповідати вимогам ДБН А.2.2-3:2014 «склад та зміст проектно-кошторисної документації на будівництво»



Рисунок 1.2 – Стадії проектування цивільних об'єктів

Ескізний проект. Ескізний проект є попередньою стадією проектування, розробляється для визначення попередніх містобудівних, архітектурних, художніх та функціональних рішень об'єкта, техніко-економічних показників.

На цій стадії проводиться посадка будівлі на ділянку із урахуванням навколишньої забудови: протипожежних та побутових розривів, розташування інженерних мереж, орієнтації будівлі по сторонах світу.

Розробляються схематичні планувальні рішення, визначаються основні функціональні зони та зовнішній вигляд майбутньої будівлі.

Ескізний проект виконується у вигляді окремого тому проектно-кошторисної документації у такому складі:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 11

- Вихідні дані
- Пояснювальна записка
- Попередні техніко-економічні показники
- Ситуаційна схема
- Схема генплану
- Плани поверхів
- Фасади
- Перспективи та фотомонтажі із урахуванням навколишньої забудови
- Схематичний розріз.

Проект (стадія «П»). Проект є узгоджувальною стадією проектування. Розробляється для визначення основних містобудівних, художніх, технічних, технологічних, інженерних рішень об'єкта, основних техніко-економічних показників та подається у лаконічній формі без деталізації. Проект може складатися з багатьох томів (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Приклад складу проектної документації на стадії «Проект» для багатоповерхового житлового будинку

Номер тому	Позначення	Найменування	Примітки
1	2	3	4
1	15176-ЗП, 15176-ГП, 15176-АР, 15176-ТЛ, 15176-ОВ, 15176-ВК, 15176-ЕТР, 15176-СЗ, 15176-ПС, 15176-АЕ	ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ. ГЕНЕРАЛЬНИЙ ПЛАН. АРХІТЕКТУРНО-ПЛАНУВАЛЬНІ РІШЕННЯ. ІНЖЕНЕРНІ РІШЕННЯ	
2.1		ТОПОГРАФО-ГЕОДЕЗИЧНІ ВИШУКУВАННЯ	Надає замовник
2.2	15176-ІВ	ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНІ ВИШУКУВАННЯ	
3	15176-КД	КОШТОРИСНА ДОКУМЕНТАЦІЯ	
4	15176-ОБ	ОРГАНІЗАЦІЯ БУДІВНИЦТВА	
5	ТОВ «ГЕРВІН»	КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ	
6	ТОВ «ЕКО»	ОЦІНКА ВПЛИВУ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ (ОВНС)	
7		ЗОВНІШНІ МЕРЕЖІ ВОДОПРОВОДУ, КАНАЛІЗАЦІЇ	Надає замовник
8		ЗОВНІШНІ МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	Надає замовник
9		ЗОВНІШНІ МЕРЕЖІ ТЕЛЕФОНІЗАЦІЇ ТА РАДІОФІКАЦІЇ	Надає замовник
10		ЗОВНІШНІ МЕРЕЖІ ГАЗОПОСТАЧАННЯ	Надає замовник

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 12

11		ВНУТРІШНЄ ГАЗОПОСТАЧАННЯ	Надає замовник
----	--	--------------------------	----------------

Проектна документація на стадії «проект» для відносно нескладних цивільних об'єктів має містити такі дані:

- Вихідні дані
- Загальна пояснювальна записка з описом рішень, прийнятих у проекті
- Техніко-економічні показники
- Генеральний план:
- Схема організації рельєфу
- План благоустрою та озеленення
- Схема транспортно-пішохідного руху (при необхідності)
- Зведений план інженерних мереж (при необхідності)
- Архітектурно-будівельні рішення:
- Фасади
- Поверхові плани
- План покрівлі
- Розрізи
- Вузли огороджуючих конструкцій
- Рішення із інженерного забезпечення будівлі:
- принципів схеми улаштування інженерного обладнання (холодного та гарячого водопостачання, каналізації, опалення, вентиляції, кондиціонування повітря, електроустаткування, автоматизації інженерного обладнання, пило- та димовидалення, сміттєвидалення і т.п.).
- Спеціальні розділи проекту (проект організації будівництва, оцінка впливу на навколишнє середовище, кошторисна документація тощо) виконуються за потребою в залежності від об'єкта.

На цій стадії проектування виконуються теплотехнічні розрахунки огороджуючих конструкцій із урахуванням вимог енергозбереження.

Робоча документація для будівництва (стадія «Р»). Робоча документація для будівництва розробляється для виконання будівельно-монтажних робіт і визначення кошторисної вартості будівництва.

Також робоча документація містить детальні опрацювання усієї будівлі: розробку рішень по улаштуванню вузлів, декоративних елементів, усунення "містків холоду", специфікації виробів і матеріалів, креслення на виготовлення нестандартних елементів та багато іншого.

Розробляється робоча документація для будівництва на підставі затвердженої попередньої стадії проектування.

Робочий проект (стадія «РП»). Робочий проект будівництва є інтегрованою стадією проектування, яка фактично об'єднує на цьому етапі стадію "П" та робочі креслення.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 13

1.3 Проблема автоматизації процесу проектування. Поняття системи автоматизованого проектування у будівництві (САПР), в яку входить прикладне програмне забезпечення (ПЗ) або прикладні програми.

Проектування, при якому усі проектні рішення або їх частину отримують шляхом взаємодії людини і комп'ютера, називають **автоматизованим**, на відмінність від ручного (без використання комп'ютера) або автоматичного (без участі людини на проміжних етапах).

Система, що реалізує автоматизоване проектування, є **системою автоматизованого проектування (САПР)**. Автоматичне проектування можливе лише в окремих часткових випадках для порівняно нескладних об'єктів. На сьогодні переважаючим є автоматизоване проектування.

Однією з ключових причин впровадження автоматизованих процесів є прагнення підвищити продуктивність праці. Процес проектування є складним та включає багато етапів, на яких приймається багато рішень. Ці рішення в процесі проектування поступово удосконалюються, що призводить до необхідності внесення постійних змін в проектну документацію. До появи персональних комп'ютерів всі ці процеси під час проектування виконувалися вручну (рис. 1.3). Для цього в проектних інститутах був спеціальний штат креслярів. Тривалість розробки проектів в рази перевищувала сучасні стандарти. Великою часткою забезпечення необхідних обсягів будівництва здійснювалися за типовими проектами. Тому гостро стояла проблема автоматизації процесу проектування.

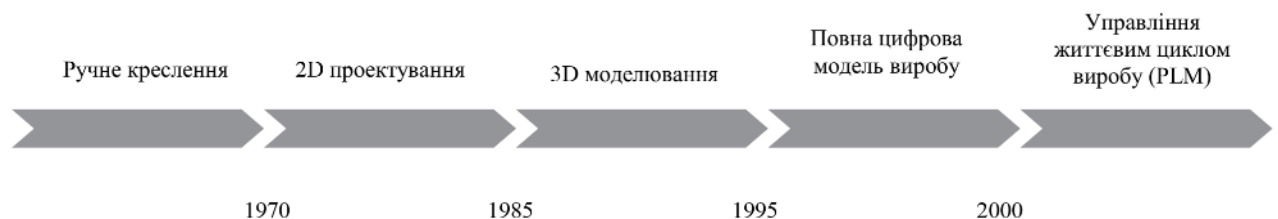


Рисунок 1.3 – Еволюція автоматизації інструментів проектування [6]

Можливість автоматизації була забезпечена науково-технічною революцією, яка відбувалася з середини 50-х років 20-го сторіччя з появою персональних комп'ютерів.

В наш час подальша автоматизація необхідна для підтримання постійної конкурентоздатності на ринку ринку України, так і за її межами. Окрім цього ускладнення конструкцій виробів, ріст вимог до їх якості і надійності, ускладнення умов експлуатації, необхідність скорочення термінів розробки нових виробів або вдосконалення вже існуючих вимагають прийняття складних рішень в мінімальні терміни. Ці вимоги неможливо забезпечити без застосування сучасних залосів автоматизованого проектування.

Системою автоматизованого проектування (САПР) називають комп'ютеризовану систему (апаратне забезпечення та програмне забезпечення), яке здатне автоматизувати повністю або частково будь-який з етапів проектування (або здатне автоматизувати проектування на всіх його етапах). Кінцевим результатом

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 14

роботи САПР є комплект конструкторської документації (технічної інформації), що відповідає етапам проектування. САПР реалізується на базі спеціального програмного забезпечення, автоматизованих банків даних, широкого набору периферійних пристроїв.

1.4 Класифікації САПР та різновиди програм, які реалізують функції САПР у будівництві.

Загалом процес архітектурно-будівельного проектування містить такі складові процеси: архітектурне планування, інженерні розрахунки, конструювання будівельних конструкцій та оформлення проектної документації

За своєю функціональністю САПР поділяються на кілька основних категорій:

1. САПР для архітектурного планування, конструювання та оформлення проектної документації. Такі САПР призначені безпосередньо для розробки проектної документації. До складу таких САПР входять модулі, призначені для створення та візуалізації тривимірних математичних моделей, оформлення відповідних креслень та текстової конструкторської документації. Англійська назва таких САПР – **CAD (Computer Aided Design)**, тобто, САПР, створені для дизайну (розробки) за допомогою комп'ютера. Загальновідомим прикладом такої САПР є програмний пакет AutoCAD.

2. САПР для інженерних розрахунків та комп'ютерного моделювання роботи будівельних конструкцій. Такі САПР призначені для етапу виконання моделювання та інженерних розрахунків будівельних конструкцій. Цей тип САПР є найбільш складним і найбільш затребуваним в проектуванні, оскільки виконує функції вирішення задач узгодження фізичних властивостей об'єктів (майбутніх виробів) шляхом вирішення систем математичних рівнянь, що описують геометричні та фізичні властивості об'єктів (виробів). Англійська назва таких САПР – **CAE (Computer Aided Engineering)**, тобто, комп'ютеризовані системи інжинірингу, або інженерного аналізу. Найчастіше CAE-системи використовують тривимірні моделі, створені в CAD-системах, додаючи до геометричної моделі властивості матеріалів, фізичні властивості середовищ та граничні умови, необхідні для вирішення систем рівнянь математичної моделі об'єкта (виробу). Існують як мультифізичні CAE-системи, в яких можна досліджувати одну й ту саму геометричну тривимірну модель в математичних моделях різних фізичних законів (наприклад, ANSYS, COMSOL), так і вузькоспеціалізовані, розраховані на вирішення лише одного (або невеликої кількості) фізичних задач по відношенню до однієї геометричної моделі (наприклад, FEMM).

3. САПР технологічних процесів. Такі САПР призначені для розробки, створення та дослідження технологічних процесів. В звичайному будівництві вони поки не застосовуються. Для створення технологічного процесу виготовлення виробу використовують математичні моделі, одержані в інших типах САПР, або у відповідних модулях програмного пакету САПР, якщо вони присутні. Англійська назва таких САПР – **CAPP (Computer Automated Process Planning)**, або комп'ютеризоване

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 122 / 15</i>

автоматизоване планування процесів. Відомим прикладом САПР, що містить модуль САРР, є програмний пакет САТІА.

4. САПР автоматизації виготовлення. Такі САПР призначені для створення на основі математичних моделей тривимірних об'єктів (виробів) коду програмного керування для автоматизованого обладнання, призначеного для виготовлення виробів з заготовок (верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК)). Англomовна назва таких САПР – **САМ (Computer Aided Manufacturing)**, тобто, виготовлення за допомогою комп'ютера. З розповсюдженням технології 3D-друку такі системи (або модулі САПР) стають дуже затребуваними. САМ-системи базуються на тривимірних моделях, створених у САD-системах, тому, як правило, сучасні САD-системи містять САМ-модулі. Загальновідомим програмним пакетом, що реалізує САМ-модуль, є SolidWorks.

Системи автоматизованого проектування потребують значних обчислювальних потужностей, тому ряд програмних пакетів САПР дозволяє їх застосування як на персональних комп'ютерах, так і у мережевих об'єднаннях робочих станцій та серверів, на суперкомп'ютерах та в хмарних сервісах, що може значно підвищувати ефективність їх роботи і скорочувати час проектування.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 16

Таблиця 1.2 – Найбільш розповсюджені САПР

Тип програм	Приклади відомих програмних продуктів
CAD	<p>AutoCAD (1982) – дво- і тривимірна система автоматизованого проектування і креслення розроблена компанією Autodesk;</p> <p>Autodesk Revit (1997) – програма створена Revit Technologies Inc. і придбана в 2002 році Autodesk, що дозволяє проектувати параметричні елементи моделювання та малювання з реалізацією технології BIM;</p> <p>Allplan (1984) – САПР, яка створена Nemetschek Group, повністю реалізує технологію BIM;</p> <p>ArchiCAD (1984) – графічний програмний пакет САПР BIM (Building Information Modeling) для архітекторів, створений угорською компанією Graphisoft;</p> <p>ZWCAD (1998) – 2-х і 3-х вимірна система автоматизованого проектування і креслення компанії ZWSOFT (ZWCAD Software Co., Ltd);</p> <p>Autodesk Advance Steel – це програмне забезпечення для 3D-моделювання для деталей, виготовлення та будівництва зі сталі;</p>
CAE	<p>LIRA-FEM (1988) – Багатофункціональний програмний комплекс (ЛІРА-САПР) реалізує технологію інформаційного моделювання будинків (BIM) і орієнтований для проектування і розрахунку будівельних і машинобудівних конструкцій різного призначення ПК-Лира-САПР;</p> <p>SCAD Office (1997) – Інтегрована система міцнісного аналізу та проектування сталевих і залізобетонних конструкцій;</p> <p>SOFiSTiK (1987) – пакет високоспеціалізованих програмних рішень для структурного аналізу під час проектування будівель та споруд різного призначення (мостів, тунелів, будівель) з реалізацією технології BIM</p>

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 17

1.5 Розвиток прикладних програм для інженерних розрахунків та комп'ютерного моделювання будівельних конструкцій, будівель та споруд.

Перші прикладні програми для розрахунку будівельних конструкцій були розроблені в Україні в середині 60-х років під керівництвом О.С. Городецького. Це були програми Експрес та МІРАЖ для розрахунку будівельних конструкцій на ЕОМ серії БЕСМ, а також ЕОМ "М-20" і "Мінськ-22" (рис. 1.4). Ці розробки поклали початок цілому напрямку – створенню промислових програм масового застосування в галузі будівництва. Поступово відбувався одночасний процес удосконалення прикладних програм з розвитком методів програмування та комп'ютерної техніки.

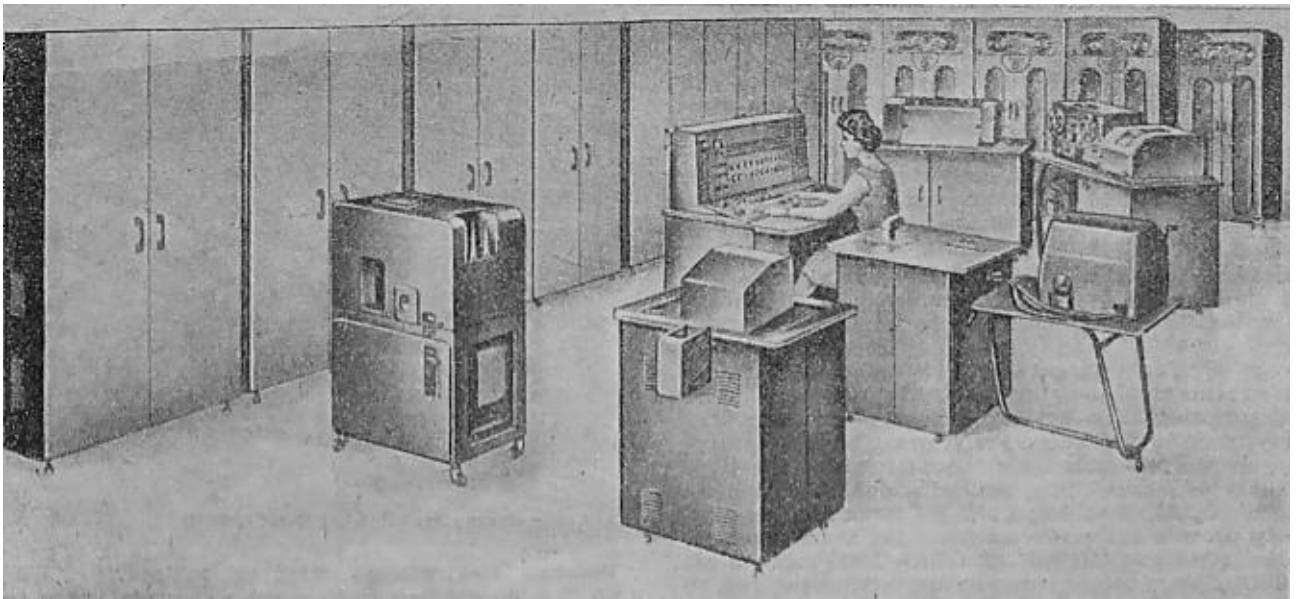


Рисунок 1.4 – Загальний вигляд ЕОМ «Мінськ-22» (1966 рік)

Розвиток програм для інженерного аналізу в Україні суттєво не поступався від таких процесів в інших країнах. Наприклад Перша комерційна версія програмного забезпечення Ansys була позначена як версія 2.0 і була випущена в 1971 році. У той час програмне забезпечення складалося з коробок перфокарт, і програму зазвичай запускали протягом ночі, щоб отримати результати наступного ранку [7].

В 1988 році була створена програма ЛІРА-ПК для перших персональних комп'ютерів АТ-286. Ця програма вже мала графічні пре- і постпроцесори - провісники сучасних графічних середовищ.

З подальшим розширенням можливостей персональних комп'ютерів розширювалися і можливості ПК «ЛІРА» – реалізація рішення нелінійних задач, розробка систем для конструювання, зняття різних обчислювальних обмежень.

В 1995 році ПК «ЛІРА» був розроблений під новою операційною системою Windows. З того часу практично кожні 2-3 роки виходили нові покращені версії. На даний час групою компаній розробників Lira Land продовжується удосконалення та розширення програмного комплексу LIRA-FEM (ЛІРА-САПР), який на даний час реалізує технологію інформаційного моделювання будинків (ВІМ) і орієнтований для проектування і розрахунку будівельних і машинобудівних конструкцій різного призначення. Цей програмний комплекс інтегрується з іншими продуктами та

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 18

реалізуються додаткові САПР, які мають найменування LIRA-CAD (САПФІР-3D), ЕСПІ, МОНОМАХ.

З 1997 року групою українських розробників поставляється аналогічний програмний комплекс «SCAD Office», який постійно вдосконалюється. За функціоналом два українських комплекси SCAD Office та LIRA-CAD є подібними.

1.6 Сучасний стан, тенденції та перспективи розвитку інформаційних технологій у будівництві

1.6.1 Поняття інформаційного моделювання у будівництві (BIM - Building Information Modelling)

Сучасний розвиток інформаційних технологій ознаменувався появою принципово нового підходу в архітектурно-будівельному проектуванні, що полягає у створенні комп'ютерної моделі нової будівлі, яка охоплює усі відомості про майбутній об'єкт – Building Information Model (BIM). Поняття «Інформаційної моделі будівлі» було вперше запропоновано професором Технологічного інституту Джорджії Чаком Істманом (Chuck Eastman) в 1975 році в журналі Американського Інституту Архітекторів (AIA) під робочою назвою «Building Description System» (Система опису будівлі).

В кінці 1970-х – початку 1980-х ця концепція розвивалася паралельно в Європі і США, причому в США найчастіше вживався термін «Building Product Model», а в Європі (особливо у Фінляндії) – «Product Information Model». При цьому слово Product підкреслювало першочергову орієнтацію уваги дослідників на об'єкт проектування, а не на процес. Об'єднання цих двох назв і привело до народження «Building Information Model».

Паралельно в розробці підходів до інформаційного моделювання будівель європейцями в середині 1980-х застосовувалися німецький термін «Bauintformatik» і голландський «Gebouwmodel», які в перекладі також відповідали англійському «Building Model» або «Building Information Model». Ці концептуальні підходи супроводжувалися напрацюванням єдиного наповнення використовуваних понять, що в результаті і привело в 1992 році до появи в науковій літературі терміну «Building Information Model» у його нинішньому змісті.

Трохи раніше, в 1986 році, англієць Роберт Ейш (Robert Aish), у той час творець програми RUCAPS, потім протягом тривалого періоду співробітник «Bentley Systems», який нещодавно перейшов у «Autodesk», у своїй статті вперше використав термін «Building Modeling» в його нинішньому розумінні як інформаційного моделювання будинків. Тоді він уперше сформулював основні принципи такого інформаційного підходу в проектуванні: тривимірне моделювання; автоматичне отримання креслень; інтелектуальна параметризація об'єктів; відповідні об'єктові бази даних; розподіл процесу проектування по тимчасових етапах і т. ін.

Роберт Ейш проілюстрував новий підхід в проектуванні: прикладом успішного застосування комплексу моделювання будинків в ПК RUCAPS є проект реконструкції «Терміналу 3» лондонського аеропорту «Хітроу». Як видно, цей досвід 25-річної давності – перший випадок використання технології BIM у світовій проектно-будівельній практиці.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 19

Приблизно з 2002 року завдяки зусиллям багатьох авторів і ентузіастів (Френк Гері – розробка BIM-комплексу «Digital Project», Роберт Ейш, Уолтер П. Мур) нового підходу в проектуванні, концепцію «Building Information Model» ввели у вжиток і провідні розробники програмного забезпечення, зробивши це поняття одним з ключових у своїй термінології.

На даний момент в світовій практиці проектування BIM-технології виступають наступниками CAD-систем і являють собою найбільш прогресивні принципи розробки проектної документації та інформаційно-графічного супроводу будівельних інвестиційних проектів (рис. 1.5).

Інформаційне моделювання будівлі (BIM) – це підхід до проектування, зведення, оснащення, забезпечення відповідальної експлуатації і ремонту будівлі (до управління життєвим циклом об'єкта), який полягає в накопиченні і комплексному обробленні в процесі проектування всієї архітектурно-конструкторської, технологічної, економічної та іншої інформації про будівлю зі всіма її взаємозв'язками і залежностями, коли будівля і об'єкти її життєзабезпечення розглядаються як єдина система (рис. 1.5).

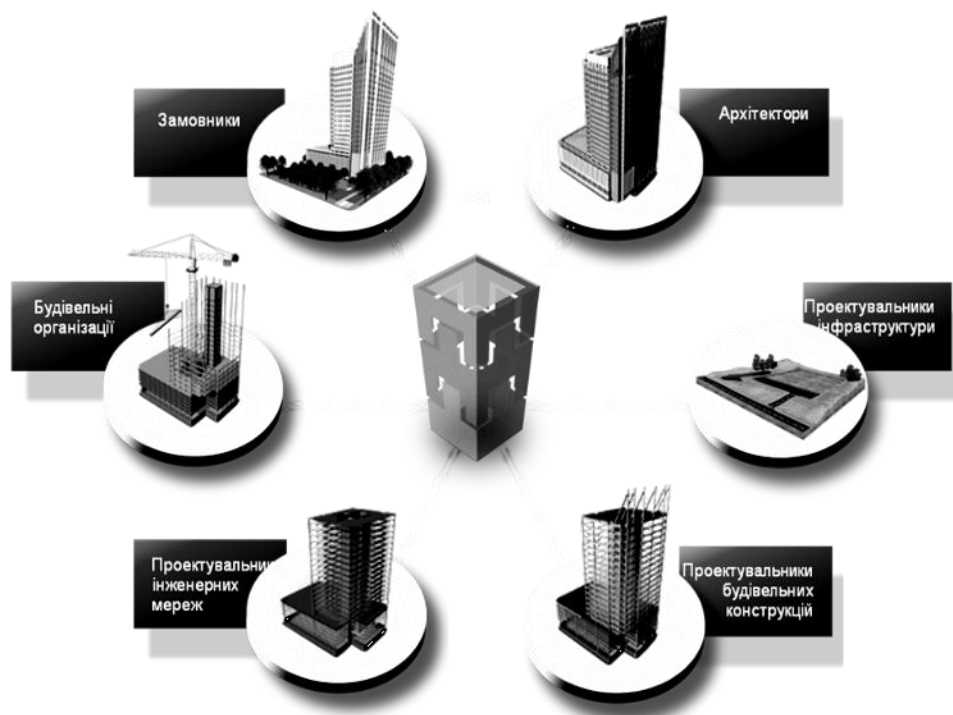


Рисунок 1.5 – Учасники будівельного інвестиційного проекту

BIM-моделювання базується на розробці тривимірних моделей будівель або інших будівельних об'єктів як інформаційних баз даних, в яких кожному елементу моделі присвоєно додаткові атрибути. Особливість такого підходу полягає в тому, що будівельний об'єкт проектується фактично як єдина система в одній числовій моделі. І зміна будь-якого з його параметрів спричиняє за собою автоматичну зміну решти пов'язаних з ним параметрів і об'єктів, аж до креслень, візуалізації, специфікацій і календарного графіка виконання будівельно-монтажних робіт.

BIM має дві головні переваги порівняно з CAD:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 20

– моделі і об'єкти управління BIM є не просто графічні об'єкти, це інформація, що дозволяє автоматично створювати: креслення і звіти, аналіз проекту, модель динамічного графіка виконання робіт, режим експлуатації об'єктів, а також надає необмежені можливості для ухвалення найоптимальнішого рішення з урахуванням всіх наявних та передбачуваних даних;

– BIM підтримує розподілені групи, тому такий підхід надає можливість ефективно і спільно використовувати цю інформацію впродовж всього життєвого циклу будівлі, що виключає необхідність повторного введення даних, помилки при їх передаванні і перетворенні.

1.6.2 Класифікація BIM

Інформаційне моделювання будівлі – це комплексний підхід до зведення, оснащення, забезпечення експлуатації та ремонту будівлі, який передбачає збирання та комплексну обробку в процесі проектування всієї архітектурно-конструкторської, технологічної, фінансової та іншої інформації про будівлю з усіма її взаємозв'язками та залежностями. В інформаційному моделюванні будівля і все, що до неї відноситься, розглядається як єдиний об'єкт. Кожен елементарний модуль, об'єкт будівлі є просторовою інформаційною моделлю, яка пов'язана із базою знань, і у якій кожному елементу можна привласнити додаткові атрибути. Такі ознаки та переваги органічно випливають із глобальних відмінностей знань від інформації – їх композитивність, ієрархічність, процедуральність та описовість. Будівельний об'єкт відтоді проектується фактично як єдине ціле і зміна будь-якого його параметра тягне за собою автоматичну зміну інших, пов'язаних з ним параметрів і об'єктів, зміни креслень, візуалізацій, специфікацій, графіка будівництва тощо на всіх етапах життєвого циклу (рис. 1.6).

Компанія Autodesk визначає такі особливості BIM: добра координація, узгодженість та взаємозв'язок, піддатливість розрахункам та аналізу, наявність геометричного прив'язування, придатність до комп'ютерного використання та можливість необхідних оновлень.

Числова інформація щодо існуючого або запланованого об'єкта у BIM може використовуватися для:

- прийняття конкретних проектних рішень;
- створення високоякісної проектної документації;
- передбачення експлуатаційних якостей об'єкта;
- розроблення кошторисів та будівельних планів;
- замовлення та виготовлення матеріалів, конструкцій та обладнання;
- управління зведенням будівлі та її експлуатацією, а також засобів технічного оснащення протягом усього життєвого циклу;
- управління будівлею як об'єктом комерційної діяльності;
- проектування та реконструкції або ремонту будівлі, її знесення та утилізації тощо.

Застосування інформаційної моделі будівлі істотно полегшує роботу з об'єктом і має ряд переваг порівняно з класичними методами проектування. Насамперед, BIM дозволяє у віртуальному режимі розробити, пов'язати разом та узгодити створювані різними фахівцями та організаціями компоненти, системи майбутньої споруди, заздалегідь перевірити їх життєздатність,

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 21

функціональність і експлуатаційні якості. BIM дає змогу створити модель, у якій можуть паралельно працювати архітектори, конструктори, інженери та інші фахівці, залучені до проекту (рис. 1.6).



РЕСУРС: WEF, 2016

Рисунок 1.6 – Технології BIM в рамках життєвого циклу об'єкту будівництва [8]

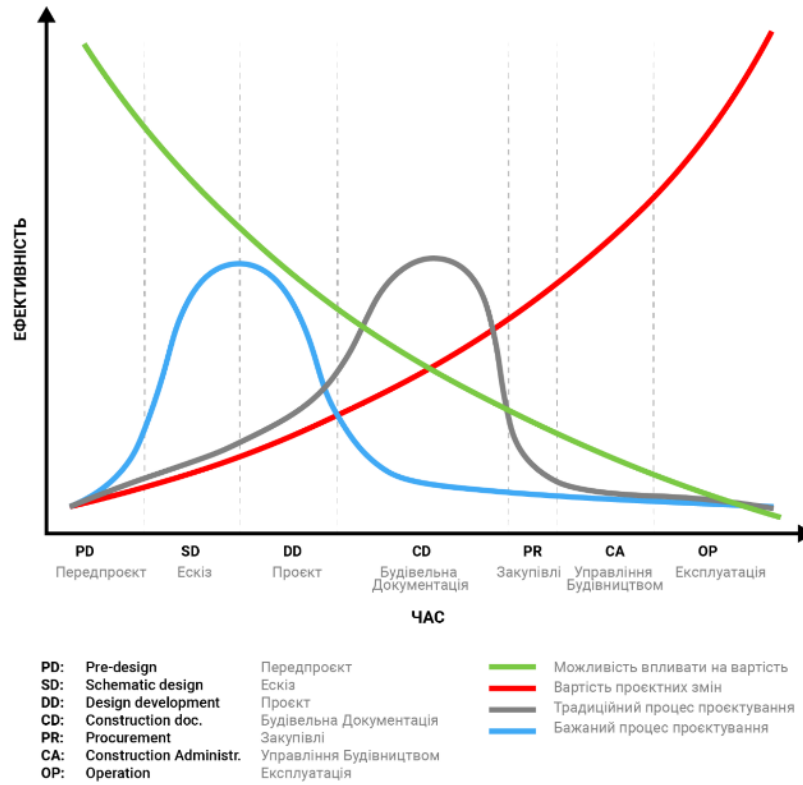
Середовище BIM підтримує функції спільної роботи впродовж усього життєвого циклу будівлі без ризику неузгодженості або втрати даних, а також унеможливорює помилки при їх передачі та перетворенні. Прийняття зважених рішень на ранніх етапах існування об'єкта заздалегідь дозволяє заощадити, адже відомо, що ціна внесення змін у проект зростає експоненціально із часом від початку робіт (рис. 1.7).

Таким чином, основними перевагами BIM є:

- значне скорочення часу проектування для типових, регулярних об'єктів, а також для внесення змін у проектну документацію;
- упередження конфліктів між системами та підсистемами будівлі і окремими елементами;
- детальне опрацювання збільшує прогнозованість техніко-економічних показників і зменшення операційних витрат;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 22

- виявлення взаємозв'язків між елементами будівлі, функціональністю;
- здатність до накопичення предметних знань;
- можливість дослідження та оптимізації експлуатаційних показників;
- компактність проєктованих систем, можливість значного ускладнення їх функції та форми.



РЕСУРС: Patrick MacLeamy AIA / HOK

Рисунок 1.7 – Еволюція сучасних процесів життєвого циклу об'єкта будівництва [8]

Наприклад, при створенні складного за формою і внутрішнім оснащенням нового корпусу Музею мистецтв у Денвері (США) була використана спеціально розроблена для цього об'єкта інформаційна модель [21]. Тільки організаційне застосування BIM для взаємодії субпідрядників і оптимізації графіка робіт дозволило скоротити термін будівництва на 14 місяців, що призвело до економії приблизно 400 тис. доларів при кошторисній вартості об'єкта в 70 млн. доларів (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – BIM сталевих каркасу та фасад Музею мистецтв у Денвері, США, арх. бюро D. Libeskind, 2006 р.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 23

Сучасне інформаційне моделювання - Building Information Modeling – нерозривно поєднане із управлінням ефективністю (Building Performance Management) та життєвим циклом будівлі (Building Lifecycle anagement). BIM дає змогу не тільки полегшити виготовлення, прискорити монтаж конструкцій, а й прослідкувати ефективність інвестицій, акумулювати якісні та кількісні дані, що застосовуються у різних сферах за схемою Продукт – Процеси – Ресурси.

1.6.3 Розвиток BIM у світі та перспективи в Україні

Сучасний напрямок розвитку будівельної галузі рухається до об'єднаної парадигми архітектурної та конструктивної форми - алгоритмічної архітектури. Висока точність BIM-моделей з урахуванням технологічних вимог виготовлення дає можливість отримувати нові конструктивні та архітектурні форми (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Фрагмент BIM-моделі каркаса та реалізований проект стадіону Bird's Nest у Пекіні (КНР), 2008 р. Арх. бюро Херцог та де Мерон

Наразі всі провідні розробники будівельних САПР - Autodesk, Nemetschek, Graphisoft та ін. - підтримують у своїх продуктах технологію BIM. Для сумісності різних програм був розроблений спеціальний формат обміну даними - IFC. Початково запроваджений для комплексів Autodesk Revit та Tekla, IFC поступово став буфером обміну повних даних без втрати найціннішого - інформаційного наповнення.

BIM є сумою технологій, наслідком еволюції систем імітаційного моделювання. Це відповідь на зростаючу складність функції та підсистем її обслуговування у будівлях, на вимоги сучасності до форми конструкцій як з архітектурної, так і конструктивної точки зору. Сучасні BIM укрупнюють підсистеми будівлі в один супероб'єкт, що вже реалізовано у деяких комплексах. Вочевидь укрупнення і взаємоінтеграція BIM не може залишитися у межах будівлі. Наразі системи BIM кожної споруди органічно виходять на рівень інтеграції у міське середовище. Це зумовлює перехід BIM технологій у 4D та SD-системи. 4D вже широко застосовується у локальних BIM, дозволяючи моделювати монтаж елементів каркасу та огороження. SD-системи мають на увазі накопичення якісних даних BIM. Таким чином, сучасні BIM-системи є частиною інформаційних систем (I-Model), які накопичують і несуть

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 24

інформацію щодо явищ природи, з якими ми взаємодіємо, соціально-економічну історію життя людей.

Архітектори та будівельники уже давно можуть створювати свої проекти, використовуючи програми 3D- моделювання та візуалізації. Проте тепер вони можуть відчувати, як це - знаходитись всередині свого майбутнього творіння. Для цього їм потрібно одягнути окуляри віртуальної реальності та озирнутись навколо себе на 360 градусів. Ба навіть більше, їх колеги (також в окулярах) можуть разом з ними "відвідати" цю архітектурну модель і виконати зміни в проект у режимі реального часу. При цьому вони можуть знаходитись на іншому кінці світу. Таким є захоплюючий світ сучасного віртуального будівництва. Це справді кардинальні інновації для галузі, яка традиційно була зорієнтована на будматеріали, а не на комп'ютерні програми. Інформаційне моделювання будівель виходить на якісно новий рівень. У новій версії свого програмного продукту Revizto компанія Vizerra з Сан-Франциско розширює вже існуючі функції інформаційного моделювання. Спираючись на технології 3D-ігор і хмарні технології, Revizto об'єднує різноманітні архітектурні простори та виробничі потоки у єдину наочну модель, всередині якої можна пересуватись. Інтерактивний тривимірний робочий простір дозволяє користувачам "відвідати" об'єкти своїх розробок, паралельно виправляючи помилки чи вносячи зміни. Наразі Revizto підтримує 3D-окуляри HTC Vive та Oculus VR. За допомогою трекара, вбудованого у Revizto, члени проектної групи можуть працювати в режимі реального часу та розподіляти виробничі завдання. Як стверджують представники компанії Vizerra, такий підхід допомагає клієнтам економити до 40% оплачуваного часу, адже тепер помилки, такі як, наприклад, нестача освітлення чи незручне розташування опорних колон, легко виправити ще до початку будівництва. Тому що доведено, що понад 30% загального бюджету проекту витрачається на виправлення помилок, непомітних на етапі розробки. Величезні кошти витрачаються даремно через застарілі стандарти.

Абсолютно новий підхід у даній розробці доводить, що навіть у найсерйозніших галузях є місце для ігрових технологій, які фундаментально змінюють методи координації та співробітництва учасників проекту. Представники Vizerra стверджують, що у програмі Revizto на даний час працює понад 60 тисяч клієнтів у 150 країнах світу, серед яких – всесвітньо відомі архітектурні та будівельні компанії, такі як Foster & Partners і Perkins & Will. Інші ключові гравці цього ринку - це компанії AutoCAD, Revit і Vectorworks Architect. Прогнозують, що до 2022 року світові продажі у цій галузі складуть майже 12 мільярдів доларів [27]. Крупні будівельні об'єкти можуть бути складними та дорогими, тому дуже важливо вести якісне врахування робочого часу співробітників, витрати матеріалів і процесу будівництва. Зарплата співробітників – це найбільша стаття витрат, її найпростіше систематизувати. Бездротовий зв'язок, смартфони та планшети змінили правила гри, вони заклали необхідний технологічний фундамент для розробки програм для будівельної галузі. У минулому виконроби зазвичай вели облік кількості відпрацьованих робітниками годин у записній книжці, далі переносили ці дані у таблиці і, за допомогою стартапа у галузі аналізу даних Rhubix [27]. Одноименний мобільний додаток дозволяє робітникам вести облік робочого часу на смартфоні, автоматично передаючи ці звіти на затвердження виконробам. За допомогою GPS виконроби можуть відслідковувати, де саме знаходились робітники у

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 25

той чи інший час. Крім урахування робочого часу, програма Rhumbix дозволяє зберігати у режимі реального часу актуальні прайс-листи та інформацію про наявність будівельних матеріалів. Це дозволяє своєчасно фіксувати та усувати затримки в роботі. Підрядники також можуть відправляти туди свої розрахунки. Це важливо, тому що 15% матеріалів, які були доставлені на будмайданчики, за даними Британської ради з екологічного будівництва, в результаті виявляються на звалищах. У США будівельне сміття складає майже 40% усіх твердих відходів. Для того, щоб реалізація великого будівельного проекту пройшла гладко, необхідно, щоб усі учасники процесу працювали злагоджено. В аналоговому світі це було практично неможливо, адже помилки часто допускаються тоді, коли виконробі не мають доступу до потрібної інформації у потрібний час.

Впровадження BIM-технологій у світі відбувається зростаючими темпами, причому нерідко - за державної підтримки. В Україні також спостерігається пошук інтересу до інформаційного моделювання будівельних систем, однак цей процес притаманний лише окремим інтегрованим підприємствам або компаніям із іноземними інвестиціями. BIM активно застосовується у будівельній галузі України, де очевидна його ефективність: будівництво великих торговельно-розважальних центрів (наприклад Ocean Plaza, Республіка у Києві тощо, рис. 1.10), мультифункціональних об'єктів зі складною внутрішньою інфраструктурою (наприклад, укриття над ЧАЕС).



Рисунок 1.10 – Фасад та візуалізація BIM-моделі найбільшого в Україні ТРЦ «Республіка» у м. Києві (арх. бюро «Архіматика», 2014 р.)

При цьому основними бар'єрами щодо впровадження BIM в Україні є:

- висока вартість програмних комплексів BIM порівняно із вартістю проектних послуг;
- рентабельність тільки для великих, типових або закордонних проектів;
- неврегульованість нормативної бази щодо статусу інформаційного моделювання та його впровадження у процес будівництва на всіх етапах;
- недосконале законодавство, яке допускає виробництво конструкцій некваліфікованими учасниками;
- невизначеність розподілу відповідальності та права інтелектуальної власності;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 26

- неготовність інвесторів додатково вкладати у інформаційні моделі, що можуть бути використані не тільки при будівництві, але і при експлуатації об'єктів;
- інерційність та традиційність будівельної галузі, недостатнє розуміння переваг BIM;
- сумісність між різними програмними продуктами, вироблення єдиних стандартів із передачі даних;
- інерційність будівельної галузі щодо впровадження BIM, неготовність виконавців проектування; асиметричність ризиків та винагород у будівництві;
- відсутність стандартизованих бізнес- та контракт моделей у будівництві, до яких міг би бути прив'язаний наскрізний процес BIM.

У той же час можна позначити чинники, що в сучасних умовах стимулюють впровадження BIM в Україні:

- орієнтація проектування на зовнішні західні ринки, для яких BIM є природним;
- імплементація європейських будівельних норм, що органічні для BIM комплексів;
- зростання вартості енергоносіїв, що змушує девелоперів та власників переходити на інформаційні технології проектування, будівництва та експлуатації з високим рівнем прогнозування та контролю;
- впровадження енергоощадних програм та реформ, що спонукає державу виступати ефективним оощадним власником;
- очікування закордонних інвестицій та програм і необхідність дієвого контролю за їх виконанням.

Органічно конструктивно орієнтовані BIM насамперед набули застосування у галузі проектування сталевих конструкцій, що мають наскрізний інтегрований ланцюжок проектування, виробництва і монтажу.

Історично склалося так, що проектування сталевих конструкцій в Україні та СНД складається з двох розділів: КМ (конструкції металеві) і КМД (конструкції металеві деталювальні). BIM-технологія дозволяє моделювати об'єкти будь-якої складності, без поділу процесу на КМ і КМД. Повні інформаційні моделі будівель створюються довше, ніж звичайні креслення КМ і КМД, але дозволяють отримати всю проектну документацію на об'єкт.

Висока геометрична точність конструкцій, що отримується за допомогою BIM, і можливість передачі даних у САМ-системи (у виробниче устаткування) значно підвищують технологічність виробництва та скорочують час монтажу, а також дають можливість реалізувати складні архітектурні форми, мінімізують терміни на розроблення проекту, а також внесення до нього змін.

Із метою популяризації BIM-технології в Україні на початку 2014 р. Український Центр Сталевого Будівництва уклав партнерську угоду із компанією Tekla, що спеціалізується на розробленні програмного забезпечення архітектурного, інженерного і будівельного призначення. В рамках укладеної угоди сторони домовилися спільно здійснювати просування одностадійного проектування та BIM-моделювання на ринку України з метою підвищення ефективності сталевих будівництва. Подальшими перспективними кроками щодо розвитку BIM в Україні мають бути такі:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 27

- сучасні стандарти повинні містити опис та закріпити статус інформаційної моделі;

- реалізація впровадження BIM на державному рівні, спеціальні програми нормативної адаптації BIM комплексів та розвитку власного спеціалізованого програмного забезпечення;

- запуск пілотних проектів із розроблення інформаційних моделей типових об'єктів та оцифрування існуючих будівель та систем;

- відкриття геоінформаційних BIM бази даних міст, що також є елементом стійкого розвитку міського середовища та електронної демократії.

Досвід свідчить, що для переходу компаній на BIM потрібні поетапні зміни, що відбуваються відповідно до концепції (насамперед виконання малих, типових об'єктів), у виокремленій частині персоналу (команда BIM). Такий підхід за умови однорідності та поступовості виконання роботи здатний призвести до зростання продуктивності із часом.

Тотальний перехід на BIM у майбутньому неминучий. Але слід розуміти, що він можливий лише за умови зміни технологій та організації процесу проектування. Для активного застосування BIM-технологій в Україні необхідно, перш за все, провадити роз'яснювальну роботу, змінювати підхід замовників і проектувальників будівельних об'єктів, при цьому ефективним замовником має бути держава.

BIM виходить за межі проектування і нерозривно застосовується для виробництва, експлуатації, діагностики будівель, слугує інформаційним кластером наповнення відомостями щодо взаємодії між системами будівлі, моделей їх деградації у реальних умовах, даних щодо ергономіки, екології при експлуатації та утилізації - так утворюється Цифрове Місто. Джерелами наповнення при цьому виступають автоматизовані системи моніторингу із стаціонарними датчиками отримання інформації у реальному часі, а також люди, які є кінцевими експлуатантами будівлі та мають датчики у мобільних пристроях. Неминуча інтеграція BIM із іншими глобальними інформаційними інструментами, такими як соціальні мережі, GPS, системами моніторингу даних щодо навантажень та впливів на будівлю, її взаємодії із середовищем. Таким чином, BIM-будівля з усіма підсистемами дає змогу управляти та коригувати її стан як цілісного об'єкта, накопичувати якісні та кількісні дані, що формують базу знань для прийняття рішень для наступних споруд.

Детальна інформаційна модель будівлі дозволяє оптимізувати її параметри, виявляє чутливість до змін умов та параметрів, викриває усі їх взаємозалежності між собою. При спорудженні та експлуатації будівлі інформаційна модель у режимі реального часу акумулює історію появи відхилень станів елементів системи, їх усунення тощо. Застосування інтелектуальних інструментів виконання робіт та інтеграція із системами доповненої реальності мінімізує різницю між віртуальною та фактичною моделями, дозволяє вчасно виявляти позапланові ситуації та пропонувати шляхи реагування. Накопичений безцінний досвід може бути застосований для планування програми обслуговування та ремонтів, складання моделей деградації елементів систем як для конкретної будівлі, так і для аналогів. BIM дозволяють формувати економіку стійкого розвитку, записувати та творити історію нашої цивілізації.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 28

Запитання для самоконтролю

1. Що таке проектування?
2. Що називають технічним завданням?
3. Що називають математичною моделлю реального об'єкта (явища, процесу)?
4. З яких етапів складається процес проектування?
5. Якому етапу проектування відповідає науково-дослідна робота?
6. Якому етапу проектування відповідає дослідно-конструкторська робота?
7. Навіщо призначений етап випробувань виробу?
8. Дайте визначення терміну «система автоматизованого проектування».
9. Який тип САПР призначений для автоматизації процесів виготовлення виробу?
10. Який тип САПР призначений для автоматизації наукових досліджень?

Список використаних джерел

1. Основи автоматизації проектування в будівництві: конспект лекцій. Укладач : Сорочак А.П. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. 120 с.
2. Закон України від 17.02.2011 № 3038-VI" Про регулювання містобудівної діяльності". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/3038-17>.
3. ДБН А.2.2-3:2014. Склад та зміст проектної документації на будівництво із Зміною № 1 та Зміною № 2: [Актуалізований текст в останній редакції із внесеними змінами. Чинний від 2022-07-01]. Київ: Мінрегіон України, 2022. 33 с. URL: https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3022061165539755805/2023-01-24/e1b8ce85-2a40-4095-a380-9e5d9c637912.pdf.
4. Системи автоматизованого проектування: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; автори: К.С. Барандич, О.О. Подолян, М.М. Гладський. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 97 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/178b106e-773e-4d58-abec-e031cdde998a/content>.
5. Основи автоматики та автоматизації: навч. посіб. / Є. П. Пістун, І. Д. Стасюк; Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів, 2014. 333 с.
6. Трач Р.В. Інформаційне моделювання у будівництві (BIM): Сутність, етапи становлення та перспективи розвитку. Глобальні та національні проблеми економіки. 2017. Випуск 16. С. 490-495.
7. Lee, H.-H. (2017). Finite Element Simulations with Ansys Workbench 17. SDC Publications. p. 50. ISBN 978-1-63057-088-0. Retrieved June 9, 2017.
8. Концепція впровадження BIM – Будівельного інформаційного моделювання в Україні. 2019. Проект міжнародної технічної допомоги ЄС «Допомога організації влади України в удосконаленні менеджменту циклом інфраструктурного проекту» / Поддубни Андре, Афанасьєв Дмитро (НТУУ «КПІ») та інші. 2019. 115 с.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 29

Тема 2. Теоретичні основи методу скінченних елементів (самостійна робота)

1. Сутність методу скінченних елементів (МСЕ) та його застосування в розрахунках конструкцій будівель та споруд.
2. Основні положення МСЕ.
3. Алгоритм реалізації методу скінченних елементів.
4. Приклад розрахунку рами методом скінченних елементів.

2.1 Сутність методу скінченних елементів (МСЕ) та його застосування в розрахунках конструкцій будівель та споруд.

Напружено-деформований стан (НДС) будівельних конструкцій можна визначити на основі двох рівноцінних напрямків: локального та інтегрального.

Перший базується на розгляді рівнянь будівельної механіки, це рівняння статички, рівняння нерозривності, фізичні та геометричні рівняння. Рівняння локального напрямку подані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Види рівнянь локального методу будівельної механіки

Вид рівнянь	Матричний запис	Запис з використанням обумовленості про підсумовування Ейнштейна
Статичні (рівняння рівноваги)	$ A * \{S\} = \{F\}$	$\sigma_{ij,j} + f_i = 0$ де $ A $ – матриця умов рівноваги; $\{S\}$ – вектор шуканих зусиль; $f_i, \{F\}$ – вектор зовнішніх навантажень.
Геометричні рівняння нерозривності	$\{\varepsilon\} = B * \{\Delta\}$	$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}),$ де $\{\varepsilon\}$ – вектор деформацій; $\{\Delta\}$ – вектор переміщень; $ B $ – матриця градієнтів, похідна від матриці форми; $u_{i,j}, u_{j,i}$ – похідні від переміщень.
Фізичні рівняння	$\{\varepsilon\} = D * \{S\}$	$\sigma_{ij} = 2 \cdot G(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij}),$ де σ_{ij} – тензор напружень; ε_{ij} – тензор деформації; $ D $ – матриця піддатливості; $ K = D ^{-1}$ – матриця жорсткості; δ_{ij} – дельта Кронекера.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 30

Другий напрямок – базується на варіаційному численні, основним поняттям якого є енергія. Енергетичний (термодинамічний) метод вивчення явищ природи розглядає зміни в системі як виділення чи поглинання енергії, перетворення одних видів енергії в інші. Цей метод встановлює загальний напрямок процесів, визначає кінцевий стан, але не дозволяє розглянути протікання процесу.

Енергія – це найбільш загальна кількісна характеристика руху. Внутрішня енергія системи – кількісна форма всіх форм руху, що проявляються при взаємодії внутрішніх елементів системи, утворюючих структуру даного рівня.

В результаті для розв’язання крайових задач із визначення НДС будівельних конструкцій потрібно розв’язувати систему із 15 диференціальних рівнянь в частинних похідних з конкретними граничними умовами.

Ця система крайових задач може бути розв’язана числовими методами, оскільки аналітичних розв’язань існує дуже мало:

- методом скінченних різниць (МСР);
- методом скінченних елементів (МСЕ);
- методом граничних елементів (МГЕ).

Проектування будівельних конструкцій (збірних та монолітних) являє собою комплекс розрахунків і графічних робіт із виготовлення транспортування та експлуатації. В основі сучасних програмних комплексів таких як ЛІРА–САПР, SCAD, Robot тощо, покладений метод скінченних елементів (МСЕ), який робить ці програмні комплекси універсальним інструментом для розрахунків складних споруд із взаємною ув’язкою в конструктивній схемі всіх елементів. МСЕ є числовим, тобто наближеним методом математичної фізики і для його використання необхідно знати основні положення даного методу.

Класичні методи розрахунку споруд орієнтовані на виконання розрахунків вручну. Цим пояснюється введення різноманітних спрощуючих гіпотез, розробка різних методів, що дозволяють окремо розв’язувати статичні та кінематичні рівняння статично невизначуваних задач тощо. Широке розповсюдження обчислювальної техніки дозволило застосовувати універсальні методи розрахунку, коли головне значення має складання універсального алгоритму розрахунку, а кількість обчислень відходить на другий план. Такі універсальні методи є чисельними і дозволяють з достатньою точністю моделювати роботу конструктивних систем будь-якої складності. Одним із таких методів є метод скінченних елементів (МСЕ, або англійською Finite element method (FEM)).

Пояснимо наближено суть цього методу. Фізично елементи конструктивних систем є неперервними фізичними тілами, які об’єднані між собою конструктивними з’єднаннями. Елементи цієї системи можна представити у вигляді сукупності елементів нескінченно малих розмірів. При такому підході для розрахунку методами будівельної механіки статично невизначених систем необхідно скласти диференціальні рівняння. Такі розрахунки практично доцільно виконувати для простих конструктивних систем.

За методом скінченних елементів конструктивну систему можна розкласти на елементи скінченних розмірів, для яких в будівельній механіці розроблені точні рішення. У такому разі ці елементи будуть пов’язані між собою в скінченній кількості точок, що називаються *вузлами*. В стрижневих системах поєднання скінченних елементів у єдину систему здійснюється шляхом складання рівнянь рівноваги для вузлів, до яких прикладаються реакції взаємодії скінченних елементів. Ці реакції

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 31

відповідають внутрішнім напруженням, що діють у місцях стиковки скінченних елементів з вузлами з врахуванням зосереджених силових дій, що безпосередньо діють на ці вузли. При цьому кінці стержнів, які примикають до будь-якого вузла, переміщуються разом з цим вузлом, що забезпечує нерозривність деформацій стержневої системи. Таким чином задача про рівновагу конструктивної схеми зводиться до задачі рівноваги скінченної кількості вузлів, що з'єднують елементи між собою. Ця задача описується скінченною кількістю алгебраїчних рівнянь. Оскільки кожен з елементів розраховується точно, то для сукупності вузлів такий підхід дає достатньо точний розрахунок, а задача розв'язку конструктивної системи приводиться до задачі лінійної алгебри.

Метод скінченних елементів (МСЕ) виник з потребою розв'язування складних задач пружності та структурного аналізу в авіабудуванні, космічній, автомобільній та будівельній галузях. Метод скінченних елементів дозволяє розраховувати та моделювати роботу конструктивних систем будь-якої складності.

На першому етапі розрахунку виконують компонування розрахункової схеми. Розрахункову модель споруд компонують із стержнів, пластин, оболонок (завдяки їх вивченості це дає можливість передбачати їх поведінку). Спрощене, ідеалізоване зображення реальної системи, що присутнє в розрахунку замість самої системи – це розрахункова схема.

Вона складається із:

- геометричної схеми елементів конструкції (стержень, пластина, оболонка, масивне тіло);
- прикладеного навантаження (розподіленого, зосередженого);
- опорних закріплень (в'язів з землею, шарнірних чи жорстких);
- модельного середовища (усереднені фізико-механічні показники, які характеризують модельне середовище і для нього вже можна застосовувати математичний аналіз).

При переході від реального матеріалу до його модельного середовища використовують гіпотези суцільності та однорідності.

Розрахункова схема відрізняється від самої споруди вилученням несуттєвих особливостей. Етап вибору розрахункової схеми найважливіший. До методів схематизації відносяться: ідеалізація матеріалу у вигляді суцільного однорідного середовища; подання елементів будівлі у вигляді набору стандартних ідеалізованих елементів – стержнів, пластин чи оболонок, поєднаних вузлами; ідеалізація форми зовнішніх сил.

На другому етапі для розрахунку за методом скінченних елементів слід виконати розбивку розрахункової схеми на скінченні елементи, тобто перейти від розрахункової схеми до дискретної моделі, яка буде складатися з скінченних елементів та вузлів. Стержневі скінченні елементи мають являти собою прямолінійні стержні постійної жорсткості, на яких може бути розташоване рівномірно розподілене зовнішнє навантаження. Криволінійні стержні апроксимуються декількома прямолінійними елементами. Аналогічно апроксимуються стержні, що мають змінну жорсткість, або ті, до яких прикладено нерівномірно розподілене навантаження. Така схема споруди називається її дискретною або скінченноелементною моделлю (СЕМ). Вузлами дискретної моделі вважають точки (рис. 2.1):

- поєднання двох або понад окремих стержнів;
- ступінчастої зміни жорсткості стержнів;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 32

- прикладення зосереджених зовнішніх сил або моментів;
- ступінчастої зміни інтенсивності розподіленого навантаження;
- опорні вузли.

Сучасні програмні комплекси включають бібліотеки скінченних елементів, які складаються із стрижневих елементів, пластинчастих (плит та оболонок) та об'ємних кінцевих елементів. На рисунку 2.2 наведений приклад дискретизації будівлі з використанням стрижневих та пластинчастих скінченних елементів.

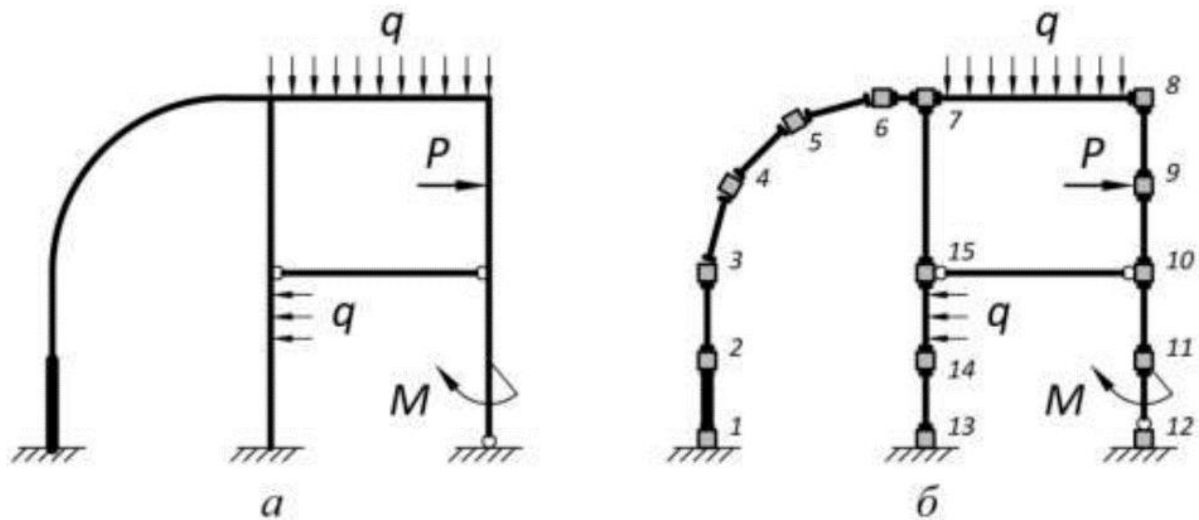


Рисунок 2.1 – Перехід від неперервної (континуальної) розрахункової схеми (а) до дискретної розрахункової моделі (б)

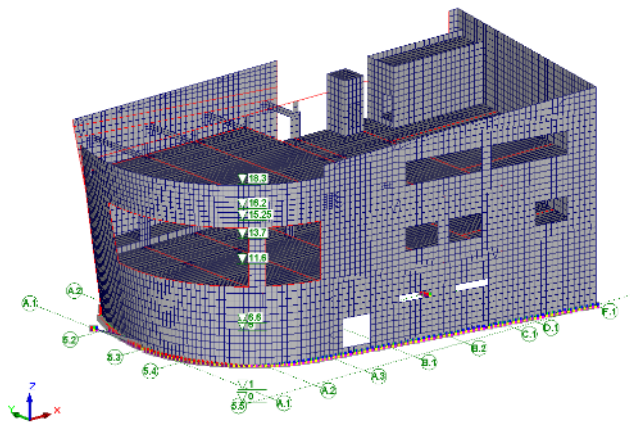


Рисунок 2.2 – Приклад створення скінченно-елементної моделі (СЕМ) будівлі (а) з використанням стрижневих та плитних скінченних елементів:
а – СЕМ будівлі;
б – архітектурна модель будівлі;
в – вид будівлі в процесі будівництва

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 33

Далі будемо розглядати для спрощення метод скінченних елементів для стрижневих конструктивних систем.

Для визначення взаємного розташування вузлів, їх кінематичних і статичних характеристик вводиться **загальна** для всього об'єкта система декартових координат xOy , яка називається **загальною** або **глобальною**. Безпосередньо з кожним стержнем пов'язується його власна система координат $x'O'y'$, якою зручно користуватися для аналізу напружено-деформованого стану стержня. Така система координат називається **місцевою** або **локальною**. Початок локальної системи координат пов'язується з тим вузлом, що має менший номер. Цю точку називають початком стержня, а точку, яка розташована на протилежному кінці стержня – його кінцем. Вісь x' спрямовують вздовж стержня від його початку до кінця, а вісь y' – перпендикулярно до стержня, причому прямий кут відкладається від осі x' проти руху годинникової стрілки (рис. 2.3). На рисунку початок стержня позначено літерою i , а кінець – літерою j . Такі позначення будуть застосовуватися надалі. Довжина стержня обчислюється через координати вузлів на початку та на кінці за формулою:

$$l = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2},$$

де x_i, x_j, y_i, y_j – координати відповідних вузлів у глобальній системі координат.

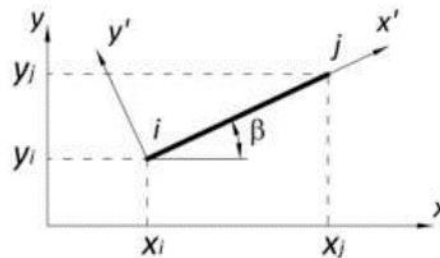


Рисунок 2.3 – Позначення координат вузлів скінченного елемента у глобальній та локальній системах координат

Тригонометричні функції кута повороту β локальної системи координат стержня відносно глобальної системи координат усієї дискретної моделі можуть бути обчислені за формулами:

$$\sin \beta = \frac{y_j - y_i}{l}; \quad \cos \beta = \frac{x_j - x_i}{l}.$$

2.2 Основні положення МСЕ

Для отримання розв'язку задачі необхідно:

- визначити фізичні дані про матеріали споруди;
- підібрати розрахункову схему, яка має бути адекватною до споруди;
- вибрати математичну модель – сукупність рівнянь, алгоритмів та їх розв'язків за програмами.

Метод скінченних елементів є варіаційним, оскільки його основні розрахункові рівняння можуть бути отримані безпосередньо із варіаційного принципу Лагранжа.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 34

Тобто, із множини кінематично-допустимих системою переміщень, що відповідають заданим граничним умовам, ті, які задовольняють вимоги рівноваги, надають потенційній енергії системи стаціонарного значення. В стані стійкої рівноваги величина виразу потенційної енергії системи (функціонал) мінімальна.

На варіаційних методах базується більшість сучасних наближених числових методів, які отримали широке розповсюдження завдяки сучасним ЕОМ. Варіаційні методи мають багато характеристик, найважливіші з них: велика загальність, універсальність, в силу чого наявні широкі можливості для застосування; інваріантність форми подання рівнянь руху; логічна послідовність. В варіаційних методах загальною характеристикою є енергія системи, робота зовнішніх та внутрішніх сил.

На понятті енергії оснований багато методів механіки суцільних середовищ, доцільність цих методів базується на тому, що енергія являє собою добре вивчену інваріантну величину і тому не залежить від системи координат.

При застосуванні інтегрального напрямку потрібно знаходити мінімум та максимум функціоналів. В основі розрахункових рівнянь МСЕ лежить класичний варіаційний принцип Лагранжа. Повна потенційна енергія тривимірної системи:

$$\Pi = U - W = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma \varepsilon d\Omega - \int_{\Omega} p u d\Omega = \int_a^b F(x, y, y') dx = \frac{EI}{2} \int_a^b (y'')^2 dx - q \int_a^b y dx, \quad (2.1)$$

де U – потенціал деформацій, W – потенціал зовнішніх сил, де перша складова – робота внутрішніх сил; друга складова з від'ємним знаком – робота зовнішніх сил.

Невідомі ступені вільності системи (фізичний зміст яких – лінійні та кутові переміщення) визначаються з умови мінімуму функціоналу повної потенціальної енергії системи

$$\frac{\partial}{\partial q_i} \Pi(q) = \frac{\partial}{\partial q_i} U(q) - \frac{\partial}{\partial q_i} W(q) = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.2)$$

Після диференціювання за кожним ступенем вільності системи отримуємо систему визначальних алгебраїчних рівнянь, яка в математичному вигляді записується так:

$$|K| \cdot \{q\} = \{P\}, \quad (2.3)$$

де $|K|$ – матриця жорсткості системи; $\{q\}$ – вектор ступенів вільності системи; $\{P\}$ – вектор зовнішніх сил системи.

Дискретизація досліджуваної системи скінченними елементами приводить до виразу:

$$\Pi = \sum_{\kappa=1}^m \Pi_{\kappa} = \sum_{\kappa=1}^m U_{\kappa} - \sum_{\kappa=1}^m W_{\kappa}. \quad (2.4)$$

А визначальні алгебраїчні рівняння записуються:

$$\frac{\partial}{\partial q_i} \sum_{r=1}^n \Pi_r(q_i) = \frac{\partial}{\partial q_i} \sum_{r=1}^n U_r(q_i) - \frac{\partial}{\partial q_i} \sum_{r=1}^n W_r(q_i) = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.5)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 35

звідки:

$$\frac{\partial}{\partial q_r} U(q_r) = |K_r| \cdot \{q\}_r, \quad \frac{\partial}{\partial q_r} W(q_r) = \{P\}_r. \quad (2.6)$$

З принципу можливих переміщень елемент матриці жорсткості r -го скінченного елемента:

$$k_{ij,r} = \int_{\Omega} \sigma_i \varepsilon_j d\Omega. \quad (2.7)$$

Переміщення по області r -го скінченного елемента:

$$u_r = \sum_{i=1}^n q_i \cdot f_i. \quad (2.8)$$

Апроксимувальному поліному розподілу переміщень f_i відповідає q -й ступінь вільності. Компоненти НДС r -го скінченного елемента:

$$\{\varepsilon\}_r = |D|_r \cdot |u|_r \cdot \{q\}_r, \quad \{\sigma\}_r = |E|_r \cdot |u|_r \cdot \{\varepsilon\}_r, \quad \{R\}_r = |k|_r \cdot |u|_r \cdot \{q\}_r, \quad (2.9)$$

де $|u|_r$ – матриця апроксимувальних функцій переміщень r -го скінченного елемента; $\{R\}_r$ – вектор зовнішніх навантажень.

Інтегральний напрямок опирається на екстремальні принципи, з яких можна отримати розв'язки задач статки, динаміки, стійкості, тобто він є універсальним.

Задачі на пошук мінімуму та максимуму функціоналів – це варіаційні задачі, а набувають функціонали стандартного значення, коли швидкість змінення їх в точці дорівнює нулю, тобто дорівнює нулю перша похідна функціоналу.

Умови, коли функціонали набувають стаціонарного значення, називаються екстремумами. Нехай на площині маємо 2 зафіксовані точки А та В (рис. 2.4). Проведемо через них криву $y(x)$ та $\bar{y}(x)$, які відрізняються на нескінченно малу величину, названу Лагранжем варіацією.

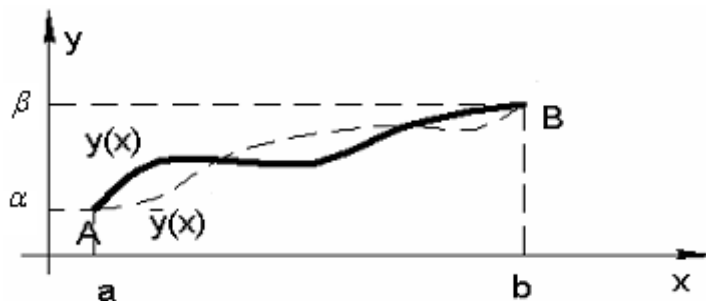


Рисунок 2.4 – До поняття варіації функції

$$\delta y = \varepsilon \cdot \phi(x) = y(x) - \bar{y}(x). \quad (2.10)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 36

Символ δu запропонований Лагранжем, щоб підкреслити його віртуальний характер. Варіювання означає нескінченно малу зміну функції при фіксованому значенні x . При цьому $\delta x = 0$ (що фіксується, та не варіюється). Як відомо, варіювання подібно диференціюванню і при звичайному аналізі функції виконується за тими ж правилами, але не пов'язане з дійсною зміною незалежної змінної. Це свого роду математичний експеримент над сукупністю змінних.

Більшість методів розв'язання варіаційної задачі ґрунтується на використанні необхідних умов екстремуму функції, якими є диференційні рівняння плюс граничні умови. Так Ейлер та Лагранж запропонували шукати екстремальні значення функціоналів, перейшовши до розв'язання крайової задачі

$$\frac{\partial F}{\partial u} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{u}} \right) = 0, \quad x \in [ab], \quad (2.11)$$

де u – невідома шукана функція; F – повна потенційна енергія одиниці довжини системи – тобто робота зовнішніх і внутрішніх сил системи при переході її із деформованого стану в початковий недеформований; ε – нескінченно мала величина; $\phi(x)$ задовольняє умови неперервності та диференційованості.

Оскільки розв'язання крайової задачі (2.11) в більшості практичних випадків приводить до значних математичних ускладнень, варіаційні методи замість розв'язку диференційних рівнянь в частинних похідних розв'язують деяку задачу мінімізації, в якій згідно з методом Рітца шукана функція апроксимується найкраще підібраним аналітичним виразом потрібної базисної функції, яка б задовольняла кінематичні граничні умови і близько апроксимувала дійсний обрис осі чи поверхні. При цьому розрахунковим диференціальним рівнянням координатна функція може не задовольняти. Точність методу Рітца в основному залежить від того, наскільки точно вибрані для апроксимації базисні функції відповідають дійсній деформованій осі чи поверхні.

Виявляється, що функція (екстремаль), яка забезпечує мінімум виразу повної потенційної енергії роботи (функціоналу) є в той же час розв'язанням вихідного диференційного рівняння в частинних похідних (2.11).

2.3 Алгоритм реалізації методу скінченних елементів

Наступним є етап опису скінченно-елементної моделі будівлі у формі, придатній до розрахунку. Компоновці скінченно-елементної моделі споруди із «елементарних частинок» відповідає набір СЕ – із бібліотеки скінченних елементів конкретного програмного комплексу.

Всі СЕ та вузли розрахункової схеми нумеруються через необхідність робити на них посилання. Розв'язування проводиться енергетичним методом з використанням варіаційного обчислення.

Розв'язати задачу в варіаційній постановці – це значить знайти таку систему переміщень, яка доставить мінімум функціоналу повної потенціальної енергії системи.

Як прийнято в варіаційних методах, шукані функції переміщень наближено подають в вигляді набору компонентів (в вигляді координатних функцій):

$$u = \sum_1^n q_i \cdot f_i, \quad (2.12)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 37

де f_i – попередньо вибрані апроксимувальні функції (їх ще називають координатними функціями); q_i – невідомі коефіцієнти (ступені вільності, фізичний зміст яких – вузлові, лінійні чи кутові переміщення).

В результаті введення такого роду апроксимації функціонал повної потенціальної енергії системи стає скінченно-вимірною функцією із ступенями вільності q_i ($i = 1, 2, 3 \dots n$). Ступені вільності визначаються із умови мінімуму функціонала повної потенційної енергії, тобто варіаційного рівняння Лагранжа

$$\delta \dot{I} = \delta(U - W) = 0, \quad (2.13)$$

де $U = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma \varepsilon d\Omega$ – робота внутрішніх сил (потенційна енергія деформації) в області Ω ; W – робота зовнішніх сил (потенціал зовнішніх сил); σ, ε – напруження та деформації.

Умова мінімуму функціонала:

$$\frac{\partial}{\partial q_i} \Pi(q) = \frac{\partial}{\partial q_i} U(q) - \frac{\partial}{\partial q_i} W(q) = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (2.14)$$

Після диференціювання функції багатьох змінних отримується система алгебраїчних рівнянь

$$\frac{\partial}{\partial q_i} U(q_1) + \frac{\partial}{\partial q_i} U(q_2) + \dots + \frac{\partial}{\partial q_i} U(q_n) = \frac{\partial}{\partial q_i} W(q_i). \quad (2.15)$$

Елементи правої частини (2.15) по суті є вузловими навантаженнями (реактивними зусиллями), тобто навантаженнями, до яких прикладено місцеві навантаження, розподілені по області системи,

$$R_i = P_i = \frac{\partial}{\partial q_i} W(q_i). \quad (2.16)$$

Лівою частиною (2.15) буде добуток $|k| \cdot \{q\}$. Тоді:

$$|k| \cdot \{q\} = \{R\} \quad (2.17)$$

буде розрахунковим рівнянням МСЕ. В фізичному змісті його можна трактувати як рівняння рівноваги. Елементи матриці жорсткості $|k_{ij}|$ – це зусилля, що виникають у напрямку i -го ступеня вільності від j -го одиничного переміщення за умови, що всі решта ($i \neq j$) ступені вільності $q_i = 0$.

Як відомо, серцевиною математики є алгоритми, а решта – зручні поняття, доведення теорем про їх властивості. Алгоритмом розв'язування задач за МСЕ є така послідовність:

- побудова функціонала;
- дискретизація системи на СЕ і вибір координат функції;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 38

- побудова матриці жорсткості $|k_{ij}|$ та зведення місцевого навантаження до вузлового для кожного СЕ;
- побудова канонічних рівнянь;
- розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь;
- визначення компонентів НДС по області СЕ.

2.4 Приклад розрахунку рами методом скінченних елементів

На прикладі, взятому із практики реального проектування, відслідковано всі етапи інформаційних технологій розрахунку конструкцій: аналіз прийнятих конструктивних рішень, компоновка адекватних розрахункових схем, скінченно-елементне моделювання, реалізація обчислень в середовищах сучасних програмних комплексів, візуалізація результатів. Послідовність дій при визначенні НДС розрахункової схеми за МСЕ розглянемо на прикладі плоскої рами на рис. 2.5.

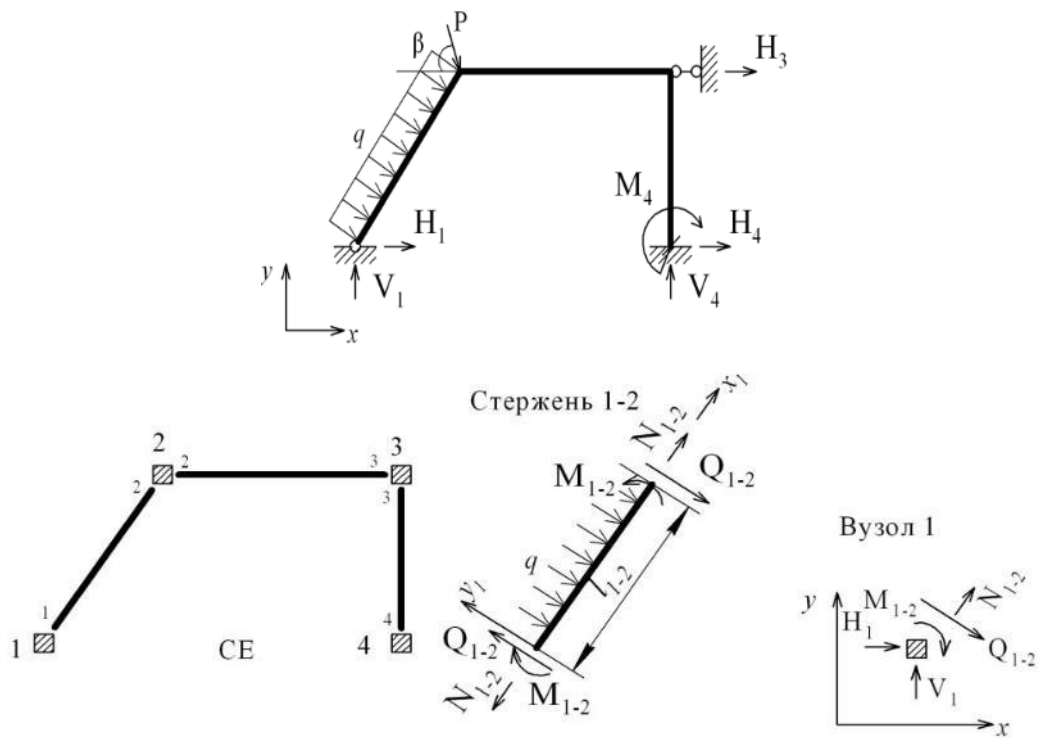


Рисунок 2.5 – Скінченно-елементна модель плоскої рами

Взаємодію системи з довкіллям подають, зазвичай, у вигляді навантажень або впливів, прикладених до вузлів системи (вузлових навантажень) чи до внутрішніх точок її скінченного елемента (місцевих навантажень). Місцеві навантаження можуть бути силами чи моментами, зосередженими чи розподіленими по стержнях, площинах чи об'ємах, інколи завантаження системи подається у вигляді температурних впливів на СЕ або заданими зміщеннями у вузлах, тобто ці впливи подаються не як силові, а як кінематичні фактори. При розв'язанні задач необхідно шукати такі сполучення зовнішніх впливів (РСЗ), що призводять до найбільш небажаних наслідків.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 39

Для мінімізації похибки, що залежить від послідовності нумерації вузлів, доцільно проводити цю нумерацію, починаючи із найбільш піддатливої частини конструкції, поступово переміщуючись до місць її закріплення.

Проста двовимірна задача є зручною відправною точкою для подальших викладень, оскільки вона дозволяє проілюструвати всю послідовність дій для конкретного числового прикладу. В тривимірному випадку об'єм обчислень вельми великий, він значно зростає. Вхідну інформацію щодо об'єкта, який розраховується, можна розділити на три типи:

1 – геометрична (топологічна інформація про координати вузлів, системи і зв'язок між вузлами);

2 – фізична інформація (жорсткість поперечних перетинів);

3 – завантаження системи (вектор $\{F\}$ зовнішніх навантажень).

Потрібно визначити:

– зусилля у всіх стержнях (вектор $\{S\}$);

– переміщення усіх вузлів системи (вектор $\{\Delta\}$).

Отже, відомі – $\{F\}$, невідомі – $\{s\}$, $\{\Delta\}$.

Для розв'язання задачі потрібно побудувати:

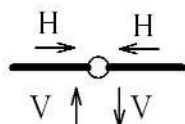
– матрицю умов рівноваги $|A|$ (матрицю форми);

– матрицю піддатливості $|D|$ та обернену до неї матрицю жорсткості $|K| = |D|^{-1}$.

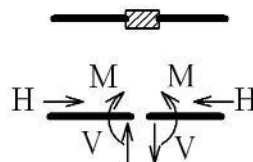
Компонування рівнянь рівноваги. Рівняння рівноваги: $|K| \cdot \{s\} = \{F\}$. Стержнева система складається із скінченних елементів: стержнів та вузлів. Сукупність рівнянь рівноваги, складених для кожного стержня і вузла може розглядатись як система умов рівноваги усієї стержневої системи.

Рівняння рівноваги для вузлів доцільно записувати, використовуючи загальну систему координат усієї системи. При складанні цих рівнянь рівноваги для стержнів виявляється зручним обирати для кожного стержня свою власну систему координат – місцеву або локальну x' ; y' ; початок системи координат установлювати у вузлі з меншим номером. Види вузлів, з'єднання декількох стержнів та реакції, що в них виникають, подано на рис. 2.6.

Шарнірне з'єднання
двох стержнів



Проста
припайка



Муфта

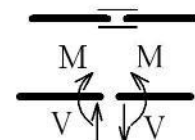


Рисунок 2.6 – Види з'єднань стержнів у вузлах

З умов рівноваги стержня 1-2 (рис. 2.5):

$$\sum F_{x1} = 0 \Rightarrow -N_{1-2} + N_{2-1} = 0;$$

$$\sum F_{y1} = 0 \Rightarrow Q_{1-2} - Q_{2-1} - q \cdot l_{1-2} = 0$$

$$\sum M_1 = 0 \Rightarrow -Q_{2-1} \cdot l_{1-2} + M_{1-2} - M_{2-1} + \frac{q \cdot l_{1-2}^2}{2} = 0;$$

Вузол 1

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow H_1 + N_{1-2} \cdot \cos \alpha + Q_{1-2} \cdot \sin \alpha = 0;$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 40

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow V_1 + N_{1-2} \cdot \sin \alpha - Q_{1-2} \cdot \cos \alpha = 0;$$

$$\sum M_1 = 0 \Rightarrow -M_{1-2} = 0.$$

Далі: вузол 2, стержень 2-3, вузол 3, стержень 3-4, вузол 4.

Коефіцієнти перед невідомими із складених умов рівноваги записуємо в таблицю 2.1, в якій компонується матриця умов рівноваги $|A|$ та вектор зовнішнього навантаження $\{B\}$.

Компонування геометричних рівнянь. Внаслідок виникнення внутрішніх зусиль стержні деформуються, а вузли переміщуються. Проте стержні не відокремлюються один від одного. Тобто стержні деформуються сумісно і узгоджено, залежно від переміщень їх кінців, які являють собою вузли стержневої системи.

Таблиця 2.2 – Компонування матриці форми $|A|$ та вектора зовнішнього навантаження $\{B\}$ для 24 невідомих схеми рами на рис. 2.5

N 1-2	Q 1-2	M 1-2	N 2-1	Q 2-1	M 2-1	V1	H1	N 2-3	Q 2-3	M 2-3	N 3-2	Q 3-2	M 2-3	V4	Вільні члени (вектор зовнішнього навантаж. F)
-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$q \cdot l_{1-2}$
0	0	1	0	l_{1-2}	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-(q \cdot l_{1-2})/2$
$\cos \alpha$	$\sin \alpha$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
...

Рівняння рівноваги в матричному вигляді:

$$|A| \cdot \{S\} = \{F\}; \quad (2.18)$$

$(m \times k)$

де m – число умов рівноваги; k – число невідомих внутрішніх зусиль;

$\{S\} = \{N_{1-2}, Q_{1-2}, M_{1-2}, N_{2-1}, Q_{2-1}, M_{2-1}, V_1, H_c, N_{2-3}, \dots\}^T$ – вектор шуканих невідомих;

$\{F\} = \{0, q \cdot l_{1-2}, -q \cdot l_{1-2} / 2, 0, \dots\}^T$ – вектор зовнішнього навантаження.

Коли $m = k$ – маємо статично визначену задачу;

$k > m$ – задача статично не визначена;

$k < m$ – задача геометрично змінна.

В загальному вигляді матриця умов рівноваги матиме вигляд:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 41

$$A = \begin{matrix} m \downarrow & \rightarrow k \\ \begin{matrix} (m \times k) \\ A = \end{matrix} & \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & l_{1-2} & \dots \\ \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \dots \end{vmatrix} \end{matrix} \cdot \quad (2.19)$$

Аналітичні залежності між деформаціями стержнів і переміщеннями їх кінців називають геометричними рівняннями:

$$\{\varepsilon\} = |\hat{A}| \cdot \{\Delta\}, \quad (2.20)$$

де $\{\Delta\}$ – вектор переміщень вузлів, $\{\Delta\} = [\{\Delta\}_1, \{\Delta\}_2, \dots, \{\Delta\}_m]^T$; $|B|$ – матричний лінійний диференціальний оператор, за допомогою якого вектор $\{\varepsilon\}$ виражається через вектор переміщень $\{u\}$. В методі скінченних елементів $|B|$ називається матрицею градієнтів (це матриця похідних від матриці форми).

Розглянемо стержень на рис. 2.7.

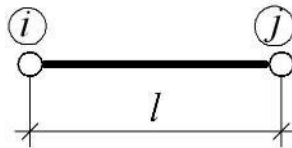


Рисунок 2.7 – Одновимірний скінченний елемент

Кожний вузол "i" має три компоненти:

$\Delta x_i, \Delta y_i$ – поступальні переміщення в напрямку x, y та кут повертання φ_i .

$$\{\Delta_i\} = \{\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \varphi_i\}^T. \quad (2.21)$$

Вектор $\{\varepsilon\}$ характеризує деформацію стержнів. В кожному стержні $\{\varepsilon\}_e = \{\varphi_i, \varphi_j, \Delta l\}$. Для визначення $|B|$ можна скористатись принципом можливих переміщень (сума робіт зовнішніх і внутрішніх сил для будь-яких можливих переміщень дорівнює нулю, коли система в рівновазі) $A+U=0$, звідси $|B| = |A|^{-1}$.

Між статичними та геометричними рівняннями існує певний зв'язок. Передусім, використовуючи матрицю рівноваги $|A|$ однієї категорії, можна записати рівняння іншої категорії. Це набагато полегшує складання геометричних рівнянь, оскільки геометричні дослідження споруд становлять чималі труднощі, а складання рівнянь рівноваги здійснюється порівняно просто. Тобто, між рівняннями рівноваги та геометричними існує правило подвійності – умовам однієї системи відповідають змінні іншої системи і навпаки.

Далі виконується компонування фізичних рівнянь:

$$|D| \cdot \{S\} = \{\varepsilon\}. \quad (2.22)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 42

Розрахункова стержнева схема складається із вузлів, які з'єднані між собою лінійними СЕ, що називаються стержнями. У лінійно-деформованих об'єктах між вузловими реакціями і вузловими переміщеннями, що їх зумовлюють, існує лінійна залежність (2.17) $R = K \cdot \Delta$, де K – матриця жорсткості (матриця пружності), що визначає лінійний зв'язок між векторами напружень σ та векторами деформацій ε , $\sigma = k \cdot \varepsilon$ (закон Гука), де k – це вузлова реакція, що викликана вузловим переміщенням $\Delta = 1$, за умови що всі інші переміщення дорівнюють нулю.

Розглянемо навантажений стержень i - j рис. 2.8.

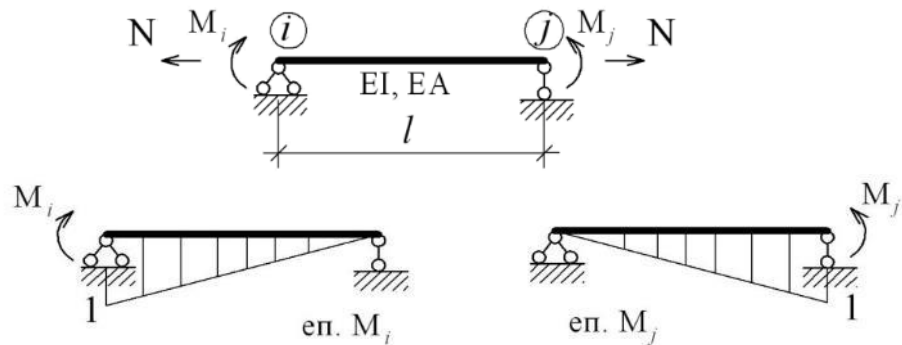


Рисунок 2.8 – До побудови матриці піддатливості для стержневого СЕ

Для знаходження K_{ij} потрібно почергово надавати одиничні переміщення вузлам дискретної моделі і знаходити сили, які при цьому передаватимуться на вузли. Матриця жорсткості K є оберненою до матриці піддатливості D .

Деформацію стержня $\{\varepsilon\}$ характеризує три компоненти: $\varphi_i, \varphi_j, \Delta l$, які можна визначити:

$$\left. \begin{aligned} \Delta l &= N \frac{l}{EA} \\ \varphi_i &= \delta_{ii} M_i + \delta_{ij} M_j \\ \varphi_j &= \delta_{ji} M_i + \delta_{jj} M_j \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Переміщення δ_{ij} можна знайти за відомими формулами Максвелла-Мора

$$\begin{aligned} \delta_{ii} &= \int_0^l \frac{\overline{M}_i^2 dx}{EI} = \frac{1}{EI} \cdot \frac{1}{2} \cdot l \cdot 1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 = \frac{l}{3EI}; \\ \delta_{ij} &= \int_0^l \frac{\overline{M}_i \overline{M}_j dx}{EI} = \frac{1}{EI} \cdot \frac{1}{2} \cdot l \cdot 1 \cdot \frac{1}{3} = \frac{l}{6EI}; \\ \delta_{jj} &= \int_0^l \frac{\overline{M}_j^2 dx}{EI} = \frac{1}{EI} \cdot \frac{1}{2} \cdot l \cdot 1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 = \frac{l}{3EI}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Систему (2.23) можна подати в матричному вигляді:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 43

$$\begin{pmatrix} \frac{l}{3EI} & \frac{l}{6EI} & 0 \\ \frac{l}{6EI} & \frac{l}{3EI} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l}{EA} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_i \\ M_j \\ N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_i \\ \varphi_j \\ \Delta l \end{pmatrix}; |d|_e \cdot \{s\}_e = \{\varepsilon\}_e, \quad (2.25)$$

де $\{\varepsilon\}_e = \{\varphi_i, \varphi_j, \Delta l\}^T$ – вектор деформацій стержня; $\{s\}_e = \{M_i, M_j, N\}^T$ – вектор кінцевих зусиль; $|d|_e$ – матриця піддатливості закону Гука стержня "e". Таким чином, для одного стержня матриця піддатливості має вигляд:

$$|d|_e = \begin{pmatrix} \frac{l}{3EI} & \frac{l}{6EI} & 0 \\ \frac{l}{6EI} & \frac{l}{3EI} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l}{EA} \end{pmatrix}. \quad (2.26)$$

Коли знехтувати поздовжніми деформаціями Δl

$$|d|_e = \frac{l}{6EI} \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

Якщо стержнів в системі "n"

$$|D| \cdot \{s\} = \{\varepsilon\}, \quad (2.28)$$

де $\{\varepsilon\} = [\{\varepsilon\}_1, \{\varepsilon\}_2, \dots, \{\varepsilon\}_n]$.

Запитання для самоконтролю

1. В чому полягає суть основної ідеї локального та інтегрального методів визначення НДС будівельних конструкцій?
2. Чи опирається інтегральний напрямок пошуку НДС системи на експериментальні принципи?
3. Що слугує функціоналом в задачах варіаційного обчислення?
4. Чи являє собою проектування будівельних конструкцій комплекс розрахункових і графічних робіт?
5. Чи є основним принципом МСЕ таке твердження: поведінку складного суцільного середовища можна апроксимувати сумарною поведінкою складових елементів цього середовища?
6. Чи буде таке твердження варіаційним принципом Лагранжа: із множини кінематично допустимих системою переміщень, які відповідають заданим граничним умовам, ті що задовольняють умови рівноваги, надають потенціальній енергії системи стаціонарне значення. В стані стійкої рівноваги величина виразу потенційної енергії системи мінімальна?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 122 / 44</i>

7. Чи залежить величина енергії від вибору системи координат, чи це інваріантна величина?

8. Що являють собою коефіцієнти матриці жорсткості системи?

9. Чи можуть відноситися стержні, пластини, оболонки до скінченних елементів розрахункової схеми?

Список використаних джерел

1. Системи автоматизованого проектування в будівництві : навчальний посібник / [А. С. Моргун, В. М. Андрухов, М. М. Сорока, І. М. Меть.]. Вінниця: ВНТУ, 2015. 129 с.

2. Основи автоматизації проектування в будівництві: конспект лекцій. Укладач: Сорочак А.П. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. 120 с.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 45

Тема 3. Структура ПК «ЛІРА-САПР» та порядок створення розрахункової моделі. Спеціалізовані програмні комплекси сімейства ЛІРА. Знайомство з ПК «ЛІРА-САПР»

1. Порядок створення розрахункової моделі.
2. Загальна характеристика ПК «ЛІРА-САПР».
3. Структура ПК «ЛІРА-САПР».
4. Графічне середовище ПК «ЛІРА-САПР».
5. Можливості та призначення спеціалізованих програмних комплексів МОНОМАХ-САПР, САПФІР.
6. Знайомство з ПК «ЛІРА-САПР». 6.1. Програмний інструментарій комп'ютерних технологій розрахунку і проектування конструкцій. 6.2. Підготовка до створення розрахункової схеми в ПК «ЛІРА-САПР», налаштування каталогів розташування файлів та одиниць виміру 6.3. Створення нового проекту для виконання розрахунку, вибір ознаки схеми.

Загалом комп'ютерний розрахунок конструкції передбачає виконання таких етапів [1]:

- вибір програмного забезпечення для реалізації розрахунку;
- створення моделі;
- перевірка моделі;
- розрахунок;
- верифікація результатів.

Верифікація включає перевірку відповідності розрахункової моделі реальній конструкції, пошук і виправлення помилок.

Найбільш відповідальним етапом комп'ютерного розрахунку є етап створення розрахункової моделі. Помилки на цьому етапі призводять викривлення результатів і необхідність виконання додаткової роботи із усунення помилок. Окрім цього від етапу створення моделі залежить точність результатів розрахунку і як наслідок техніко-економічні показники конструкцій. Розглянемо детально, які питання вирішуються на цьому етапі.

Об'єктом розрахунку може бути несучий елемент або конструкція (конструктивна система), які входять в склад будівлі та споруди.

Конструктивна система – несучі елементи будівлі або цивільних інженерних споруд і спосіб, яким дані елементи функціонують разом.

Конструкція – упорядкована комбінація поєднаних між собою частин (елементів), які витримують певні дії та виконуватимуть якусь певну призначену функцію.

Несуча конструкція (основна конструкція) – виготовлена згідно з проектними рішеннями складена конструкція, яка складається із сполучених між собою конструктивних елементів та розрахована на забезпечення механічної міцності і стійкості будівель та споруд.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 46

3.1 Порядок створення розрахункової моделі

Розрахункова схема або комп'ютерна модель – це ідеалізований об'єкт, позбавлений неістотних для результатів розрахунку ознак реальної конструкції.

Процес створення ідеалізованого об'єкту називають **ідеалізацією**. Відповідно створення розрахункової моделі передбачає поступову ідеалізацію реальної конструкції. В нашому випадку ідеалізація дозволяє через абстрагування його реальних властивостей значно спростити модель реальної конструкції для можливості створення його моделі за допомогою математичних методів.

Створення комп'ютерної моделі реального об'єкта (конструкції, конструктивної системи будівлі або споруди) передбачає послідовне виконання кроків (етапів ідеалізації). Розглянемо далі ці кроки.

3.1.1 Виділення із об'єкта основних несучих конструкцій

Цей етап включає усвідомлення та оцінювання призначення, взаємозв'язків, особливостей роботи та влаштування елементів об'єкта. Під час процесу проектування архітектор та головний конструктор обирають у відповідності до завдання на проектування основну конструктивну систему об'єкта (рис. 3.1, 3.2) і попередньо, керуючись досвідом проектування, призначають основні розміри елементів конструкцій. Таким чином вирішуються попередні архітектурно-планувальні та конструктивні рішення об'єкта. Сформовані архітектурно-планувальні рішення є основою для створення розрахункової комп'ютерної моделі об'єкта та виконання розрахунків його основних будівельних конструкцій.



Рисунок 3.1 – Елементи основних несучих конструкцій каркасної будівлі із збірних залізобетонних конструкцій

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 47



Рисунок 3.2 – Елементи основних несучих конструкцій будівлі з несучими цегляними стінами

3.1.2 Ідеалізація форми й геометричних параметрів моделі. Дискретизація розрахункової схеми на кінцеві моделі

Цей крок також називають *створенням геометричної моделі або геометричним моделюванням*. На цьому етапі основні елементи конструктивної системи ідеалізуються простими геометричними елементами конструкцій, які показані на рисунку 3.3.

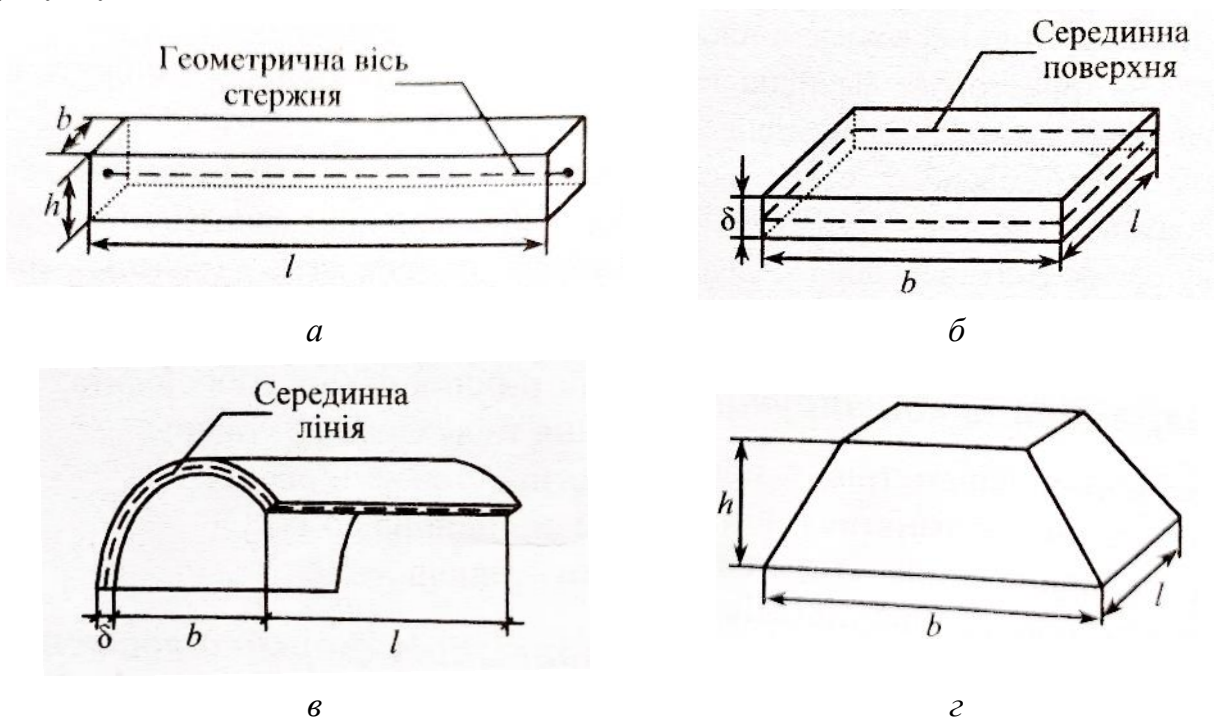


Рисунок 3.3 – Геометричні схеми елементів конструкції:
а – стержень; б – пластина; в – оболонка; г – масивне тіло

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 48

Стержень – тіло, довжина якого набагато більша від розмірів поперечного перерізу, тобто $l \gg h, b$.

Пластина – тіло, товщина якого набагато менша від довжини й висоти, тобто $\delta \ll b, l$.

Оболонка – тіло, товщина якого менша від довжини й висоти, але серединна лінія вигнута, тобто оболонка – це вигнута пластина.

Масивне тіло – тіло, у якого всі розміри одного порядку, тобто $h \sim b \sim l$.

Поперечний переріз – переріз, що лежить у площині, яка ортогональна геометричній осі.

Після визначення геометричної моделі в програмного комплексу з використанням МСЕ цю модель слід розбити на кінцеві елементи (див. п. 2.1). Такий підхід дозволяє виконувати чисельний розрахунок складних конструктивних систем. Складність таких систем визначається кількістю елементів, їх геометричною формою та необхідністю врахування навантажень. Від ступеню дискретизації елементів розрахункової системи залежить достовірність та точність розрахунку.

3.1.3 Ідеалізація умов обпирання (опорних в'язів)

В природі не існує ні «ідеальних шарнірів», ні «абсолютно жорстких» з'єднань елементів. Проектувальник сам повинен прийняти рішення про те, як ідеалізувати опорні в'язі, щоб максимально достовірно змоделювати їх справжню роботу. Разом з цим сучасні програмні комплекси окрім опорних в'язів, що виключають відповідні переміщення, також дозволяють моделювати в'язі кінцевої жорсткості (пружна опора або закріплення). У такому разі для їх моделювання необхідно мати характеристики жорсткості (піддатливості).

На рисунку 3.4 представлені стандартні типи опорних в'язів для плоских стрижневих систем. На рисунках 3.5 і 3.6 показані найпростіші приклади конструктивних рішень реальних конструкцій та їх розрахункових схем.

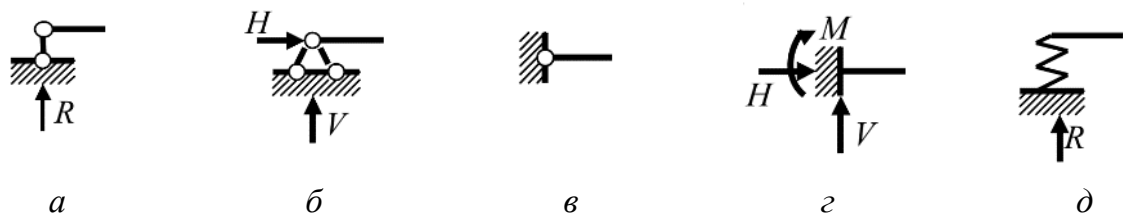


Рисунок 3.4 – Типи найбільш поширених опорних в'язей стрижневих систем: *a* – шарнірно-рухома опора; *б, в* – шарнірно-нерухома опора (для балочної і рамної конструкції); *г* – закладення («жорстка опора»); *д* – пружна опора

Характеристика розповсюджених типів опорних в'язів стрижневих плоских систем:

- *шарнірно-рухома опора* (див. рис. 3.4 *a*): дає змогу здійснювати переміщення по горизонталі й поворот, але не дає здійснювати переміщення по вертикалі;

- *шарнірно-нерухома опора* (див. рис. 3.4 *б, в*): не дає можливості здійснювати переміщення по вертикалі й горизонталі, але допускає поворот;

- *закладення або жорстке закріплення* (див. рис. 3.4 *г*): не допускає будь-яких переміщень і повороту в площині;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 49

- пружна опора або піддатлива (див. рис. 3.4 д): допускає переміщення, на які накладені пружні в'язі, пропорційно діючим в них силам в залежності від заданих характеристик жорсткості цих в'язів.

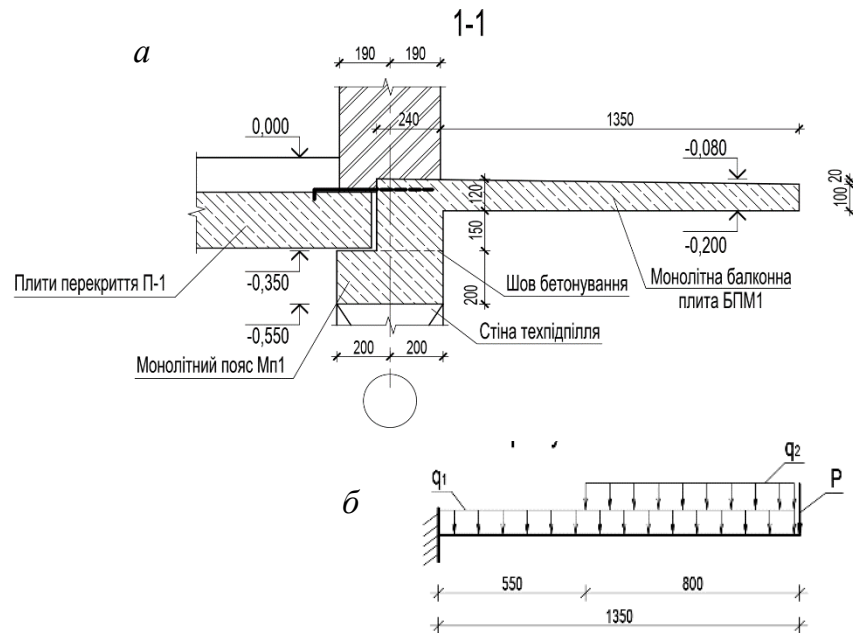


Рисунок 3.5 – Приклад конструктивного рішення монтажу балконної плити (а) та її розрахункова схема (б)

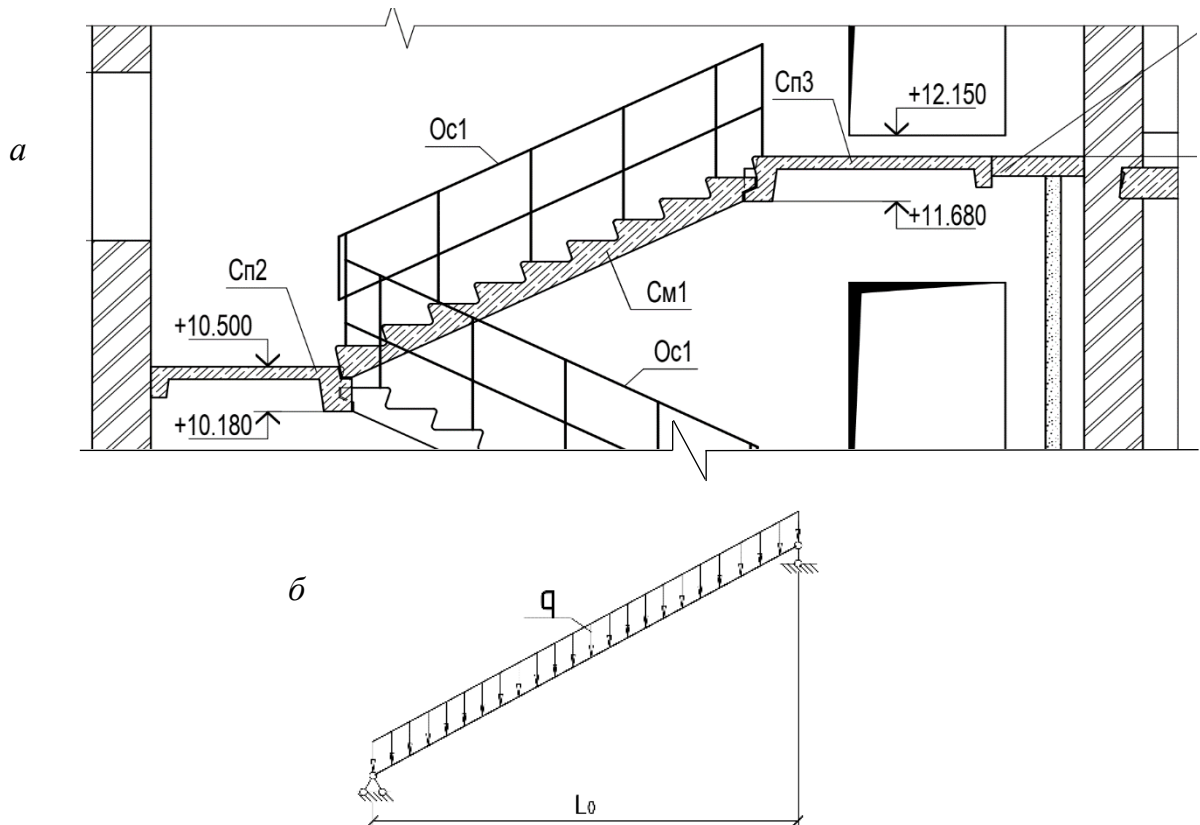


Рисунок 3.6 – Приклад конструктивного рішення монтажу сходового маршу (а) та його розрахункова схема (б)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 50

3.1.4 Ідеалізація матеріалів конструкцій

Ідеалізація матеріалів конструкцій включає призначення розрахункових фізико-механічних характеристик матеріалів та математичних залежностей їх роботи під навантаженням. Як правило, матеріал вважають суцільним однорідним твердим тілом та надають йому пружних властивостей.

Значення параметрів, що характеризують властивості матеріалу (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, межа плинності тощо) приймають за довідковими або експериментальними значеннями та вважають однаковими в межах доволі великих частин споруди (або по всій споруді).

Відносно пружним матеріалом можна вважати тільки сталь, яка працює до фізичної або умовної границі плинності без суттєвих пластичних деформацій. Причому під час дії експлуатаційних навантажень сталеві конструкції працюють в зоні пружності. Це дозволяє за допомогою програмних комплексів достовірно визначати деформації сталевих конструкцій і загалом вирішувати більшість задач з високою достовірністю.

Проте всі кам'яні конструкційні матеріали як бетон, цегляна кладка володіють пружно-пластичними властивостями (рис. 3.7). Вже на початковому етапі навантаження, коли напруження перевищують 30 % від розрахункового опору виникають суттєві пластичні деформації. Пластичні деформації кам'яних матеріалів суттєво впливають на перерозподіл зусиль між елементами моделі та загальні переміщення її вузлів.

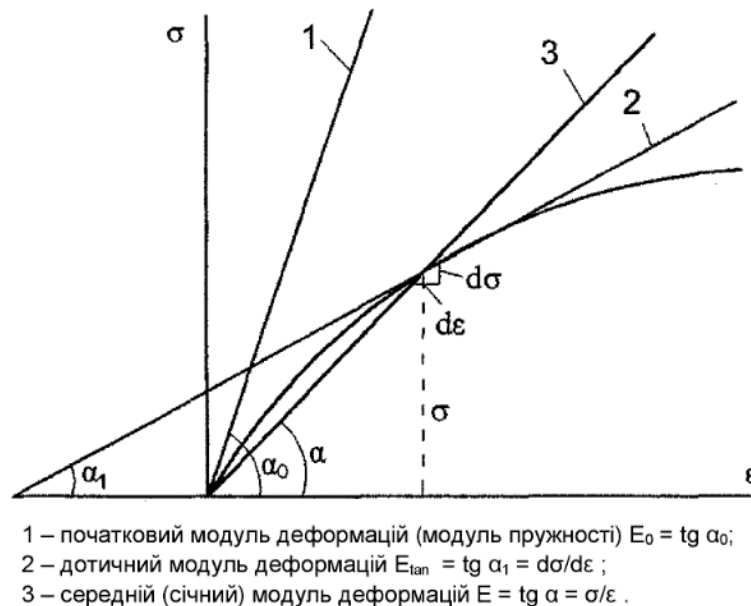


Рисунок 3.7 – Характерна діаграма деформування пружно-пластичного матеріалу

В процесі комп'ютерного моделювання конструкції інженер має враховувати нелінійні властивості кам'яних матеріалів. Нормативні документи з проектування залізобетонних і кам'яних конструкцій містять відповідні практичні рекомендації. Для розв'язання більшості задач спрощено ці властивості також можна враховувати умовно вважаючи матеріал лінійно деформованим (умовно пружним). У такому разі слід в програмі замість модуля пружності вводити для елементів схеми в залежності від їх напруженого стану значення середнього модуля деформацій (див. рис. 3.7).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 51

Застосування такого підходу вимагає від інженера високої кваліфікації, досвіду та розуміння особливостей роботи конструкцій з «нелінійних» матеріалів.

3.1.5 Ідеалізація навантажень і вплив на об'єкт

Важливим чинником є ідеалізація навантажень, що діють на конструкції за різних режимів роботи. Взагалі навантаження є однією з найменш вивчених компонентів будівлі або споруди. Вони мають велику мінливість у часі й просторі, і ті розрахункові схеми, якими оперувала та оперує проектна практика, досить умовні. Деякі з моделей навантаження, які традиційно використовуються при складанні комп'ютерних моделей (рівномірно розподілене навантаження, зосереджена сила, імпульсивний вплив, гармонійна осциляція), є також певними припущеннями (рис. 3.8, 3.9).

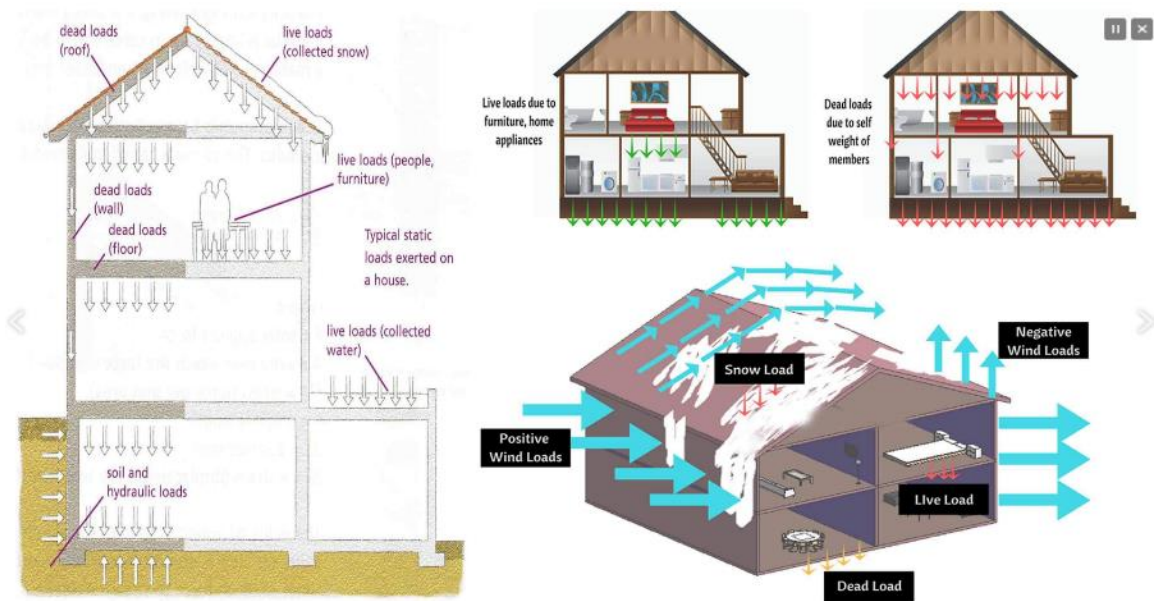


Рисунок 3.8 – Основні типи навантажень та їх умовне наближене представлення

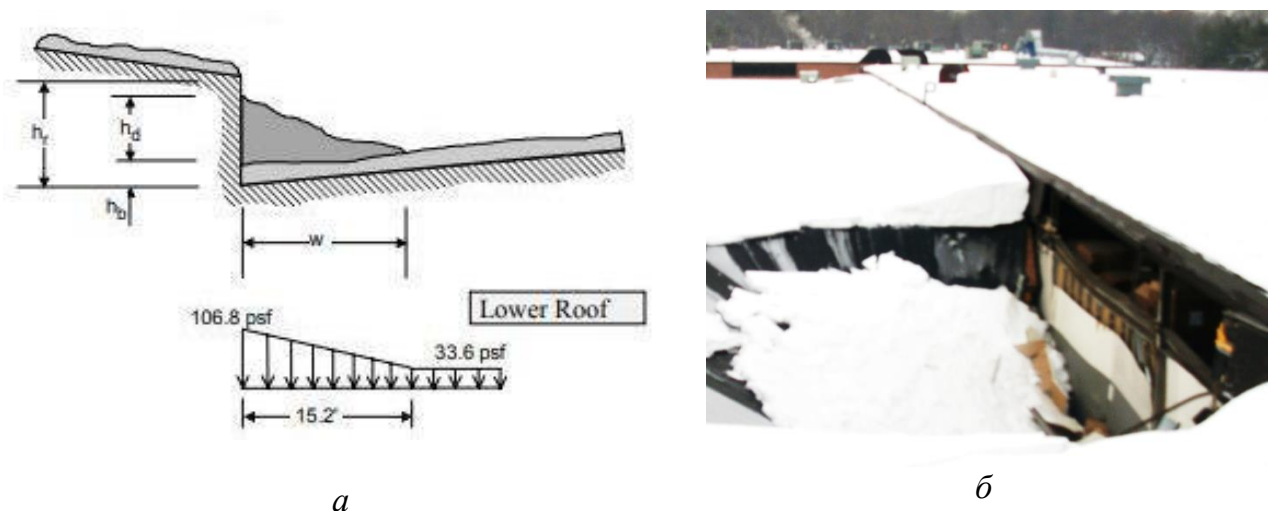
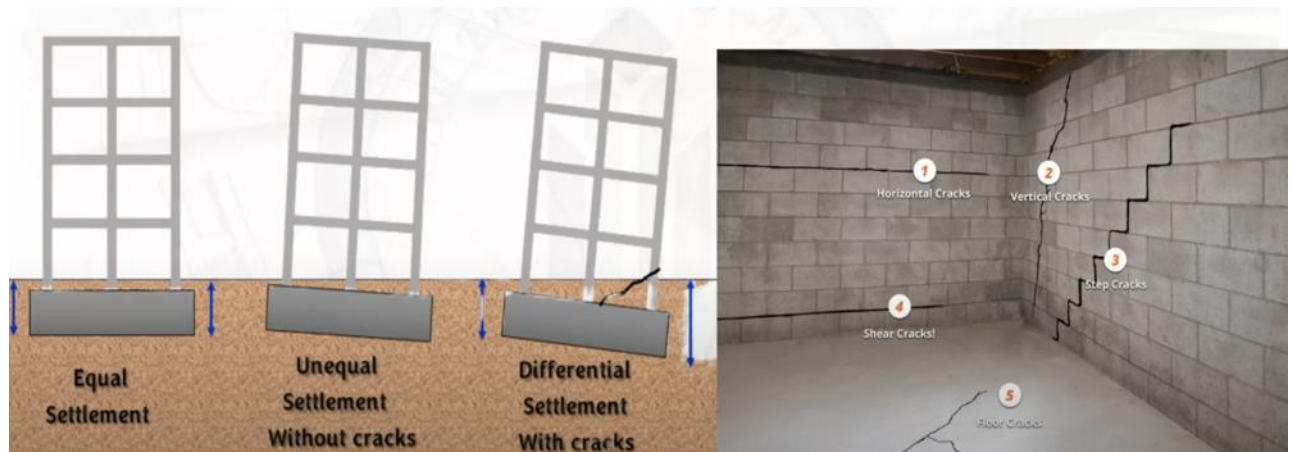


Рисунок 3.9 – Приклад реальної та розрахункової моделі снігового навантаження на покриття будівлі (а) і можливих наслідків через помилки у його врахуванні (б)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 52

Поняття навантаження є зручним способом опису взаємодії конструкції з навколишнім середовищем, але це – не єдина форма такої взаємодії. Часто необхідно описати не силову, а кінематичну взаємодію, коли зовнішні відносно розрахункової моделі пристрої, обмежують переміщення або повороти окремих точок чи нав'язують їй свої переміщення. Такі умови в комп'ютерній моделі накладають за допомогою в'язів кінцевої жорсткості (пружних опор). Наприклад, сучасні норми рекомендують виконувати моделювання роботи основних несучих конструкцій будівель та споруд сумісно з основою. Основа в такому разі, як правило, розглядається як лінійно-деформоване тіло. Тоді моделювання сумісної роботи конструкцій будівлі з основою в більшості випадків виконують шляхом накладення пружних в'язів до елементів фундаментів, які відповідають жорсткості ґрунтової основи. Це дозволяє враховувати неоднорідність ґрунтової основи і пов'язані з цим вплив нерівномірних деформацій на напружено-деформований стан конструкцій будівлі (рис. 3.10).



a

б

Рисунок 3.10 – Схеми деформацій будівлі через осідання ґрунтової основи (а) та утворення тріщин в конструкціях внаслідок нехтування цими деформаціями (б)

3.1.6 Ідеалізація вузлових з'єднань або взаємодії елементів між собою.

Як і у випадку опорних в'язей з'єднання елементів між собою також не відповідають «ідеальним» випадкам. Наприклад закріплення балкона у стіні в розрахунку вважається жорстким (див. рис. 3.5), а фактично опорна балка балкона контактує в закладенні з цегляною кладкою, в якій виникають додаткові напруження. Тобто відбуваються деформації, через ці деформації балкон в місці закладення повертається на певний кут. Проте фактично ідеалізація вузла закладення в стіну балкона не призводить до суттєвої похибки у розрахунках. Зокрема, додатковий прогин балкона є незначним і вкладається в межі допустимої похибки обчислень.

Шарнірних з'єднань елементів конструкцій також в природні не існує. Найбільш простим прикладом є ідеалізація вузлів у фермах. Візуально та фактично вузол ферми далеко не є шарнірним (рис. 3.11). Проте використання припущення про шарнірні з'єднання вузлів ферми дозволяє обґрунтовано розраховувати подібні стрижневі конструкції.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 53

Припущення про можливість моделювання жорсткого або шарнірного з'єднання елементів обґрунтовані науковими дослідженнями на основі експериментальних випробувань. Результати цих досліджень імплементовані в інженерні методи розрахунку та нормативні документи. В процесі проектування конструкцій ці рекомендації є обов'язковими. Будь-які відхилення від усталеної проектної практики слід допускати з обережністю та піддавати обов'язковій перевірці достовірності таких кроків.

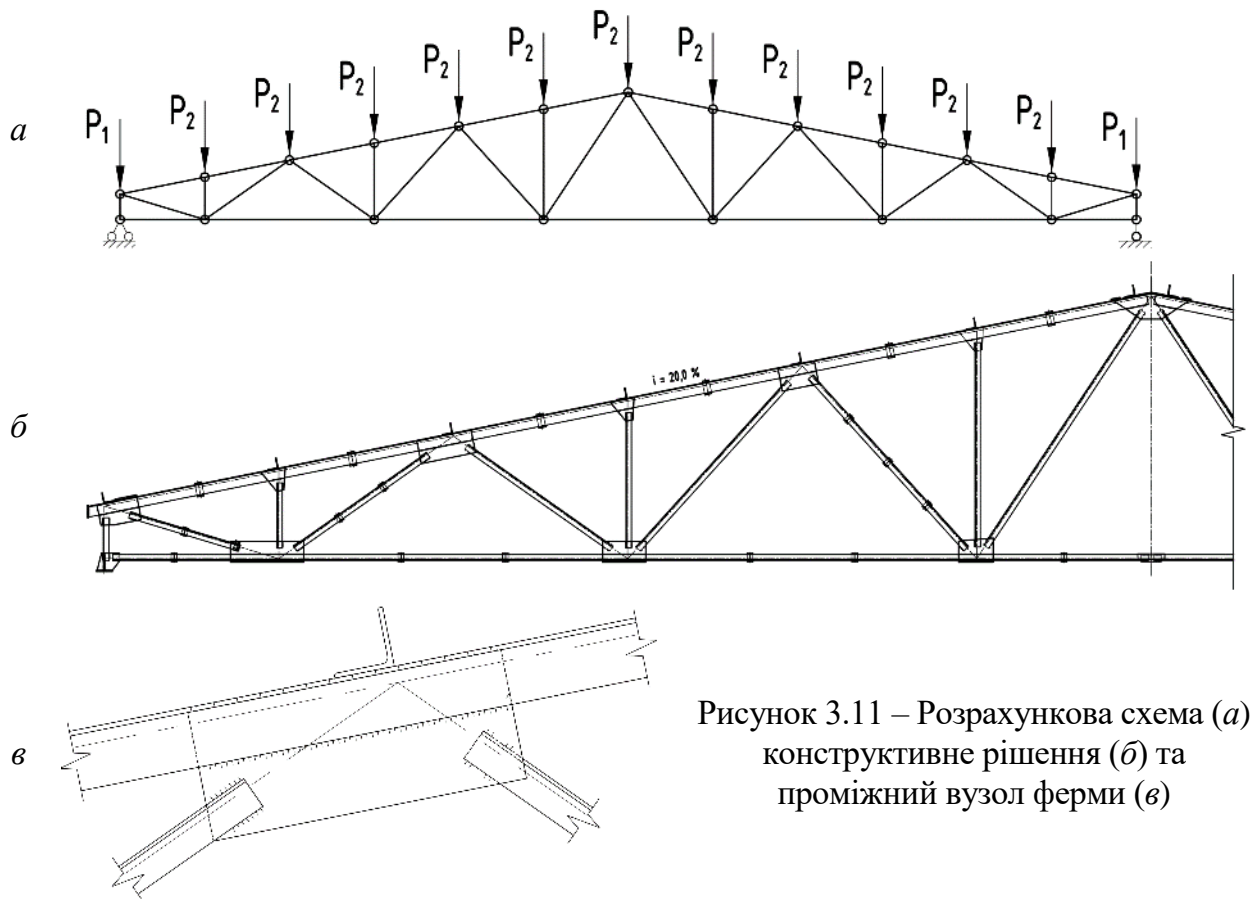


Рисунок 3.11 – Розрахункова схема (а) конструктивне рішення (б) та проміжний вузол ферми (в)

3.1.7 Невизначеність розрахункової моделі

Ідеалізація розрахункової моделі і неможливість зробити її абсолютно адекватною реальній конструкції створюють ситуацію деякої **невизначеності**, і саме в умовах такої невизначеності доводиться приймати проектні рішення.

Невизначеність породжується як недоступністю всієї необхідної інформації (наприклад, нам принципово невідомі всі можливі в майбутньому режими роботи конструкції), так і її неповнотою (ми не можемо точно знати фізико-механічні властивості в будь-якій точці конструкції). Недоступність деяких видів інформації і її неповнота є принциповими моментами, їх неможливо повністю виключити, і наскільки б детально ми не вивчали поставлену проблему, ми не можемо ніколи сказати, що в розрахунковій моделі враховано все.

Проте не лише недоступність і неповнота даних породжують ситуацію невизначеності. Є ще і їх неоднозначність, тобто можливість різних трактувань одних

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 54

і тих же чинників, а це вимагає оцінки наявних альтернатив. Відомі класичні підходи до невизначеності, які зводяться до наступних варіантів ухвалення рішень:

- використання теорії ймовірності, коли в основі рішення, що приймається, знаходиться об'єктивний попередній досвід;
- використання експертних оцінок, тобто ухвалення рішень на основі суб'єктивного досвіду експерта чи колективу експертів;
- мінімаксна оцінка, коли приймається найкраще рішення з числа можливих, в припущенні можливого найгіршого варіанту розвитку подій.

Всі ці варіанти застосовуються окремо чи спільно і направлені на оцінку правдоподібності розрахункової моделі. Є й інші чинники, що визначають приблизність розрахункової моделі і призводять до виникнення помилок, спотворень і протиріч.

Це, по-перше, *помилки апроксимації*, що виникають або за рахунок приблизності наших знань, або за рахунок їх навмисного загрублення. До такого роду помилок можна віднести використання спрощених математичних описів – вибір поліномів відносно невеликого степеню для опису поля переміщень в методі кінцевих елементів і т. п. Сюди ж відносяться помилки від неузгодженості наукових теорій і гіпотез, використаних для описів різних деталей однієї і тієї ж розрахункової схеми.

По-друге, тут слід згадати наближеність майже всіх параметрів моделі, що задаються, пов'язану з реально існуючими допусками на розміри, вагу та інші вимірювані величини.

З ростом потужності обчислювальних засобів та деталізації моделей основні затрати часу при створенні та розрахунку задачі (рис. 3.12) припадають на етап аналізу результатів.

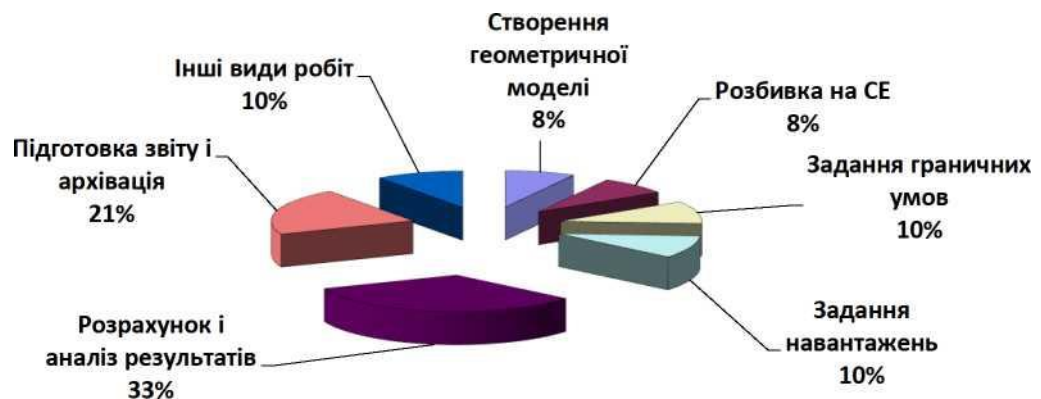


Рисунок 3.12 – Розподіл затрат часу на створення та розрахунок моделі

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 55

3.2 Загальна характеристика ПК «ЛІРА-САПР»

Програмний комплекс ЛІРА-САПР – це багатофункціональний програмний комплекс для інженерного аналізу та проектування конструкцій різного призначення. ПК «ЛІРА-САПР» заснований на використанні методу скінчених елементів (МСЕ) у формі переміщень, признаного в світі основним інструментом чисельного аналізу міцності та стійкості будівельних конструкцій. Програмний комплекс є *промисловим*, тобто універсальним і призначений для широкого застосування в проектних та науково-дослідницьких організаціях.

ПК «ЛІРА-САПР» успішно застосовується в розрахунках об'єктів будівництва, машинобудування, мостобудування, атомної енергетики, нафтовидобувної промисловості і в багатьох інших сферах, де актуальні методи будівельної механіки.

Програмні комплекси сімейства ЛІРА мають більш ніж 50-річну історію створення, розвитку і використання в наукових дослідженнях і практиці проектування конструкцій. Вони безперервно удосконалюються і пристосовуються до нових операційних систем і графічних середовищ.

Окрім загального розрахунку моделі об'єкту на всі можливі види статичних навантажень, температурних, деформаційних і динамічних дій (вітер з врахуванням пульсації, сейсмічні дії і т. п.), ПК «ЛІРА-САПР» автоматизує ряд процесів проектування: визначення розрахункових сполучень навантажень і зусиль, підбір і перевірка перерізів сталевих і залізобетонних конструкцій з формуванням ескізів робочих креслень колон і балок.

ПК «ЛІРА-САПР» дозволяє досліджувати загальну стійкість моделі, що розраховується, перевірити міцність перерізів елементів по різних теоріях руйнувань, надає можливість проводити розрахунки об'єктів з врахуванням фізичної і геометричної нелінійностей, моделювати процес зведення споруди з врахуванням монтажу і демонтажу елементів.

Багатофункціональність та універсальність ПК «ЛІРА-САПР» забезпечується через сучасний користувацький інтерфейс комплексу завдяки наявності таких функцій:

- візуалізація розрахункової схеми на всіх етапах її синтезу й аналізу, можливість зручної навігації за схемою, фрагментацією, обертанням, зміною ракурсу;
- наявність численних та багатоваріантних прийомів створення моделі (параметризація, копіювання, фільтри, маркери, функція скасувати-повернути, масштабування, багатовіконний режим, одиниці виміру, багатомовність тощо);
- діагностика помилок;
- наявність контекстних підказок, що пропонують користувачеві можливі рішення в різних нестандартних ситуаціях;
- ідентифікація проходження завдання в процесорі;
- наявність чисельних прийомів аналізу результатів (побудова ізополів, ізоліній напружень, переміщень, зусиль, анімація коливань, побудова деформованих схем, цифрова та колірна індикація елементів і їх атрибутів, регульований масштаб зображення);
- наявність розвинутої системи документування результатів розрахунку розроблених моделей;
- наявність докладної документації для користувачів, розгорнутих інструкції і навчальних прикладів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 56

Можливості інженерного аналізу та інтеграції ПК «ЛІРА-САПР» з іншими програмами автоматизованого проектування будуть розглянуті в наступних темах.

3.3 Структура ПК «ЛІРА-САПР»

ПК «ЛІРА-САПР» (остання назва LIRA-FEM) складається з декількох взаємозв'язаних інформаційних систем. Організація взаємозв'язків між цими системами забезпечує максимальну технологічність роботи з комплексом від створення розрахункової моделі до конструювання елементів (рис. 3.13).

Основною графічною системою є система **ВІЗОР-САПР**, єдине графічне середовище, яке має у своєму розпорядженні великий набір можливостей і функцій для формування адекватних скінченно-елементних і суперелементних моделей розраховуваних об'єктів. **ВІЗОР-САПР** дає можливість зробити докладне візуальне обстеження створених моделей і їх коригування, описати фізико-механічні властивості матеріалів. У цьому середовищі задаються в'язі, різноманітні навантаження, характеристики різних динамічних дій, а також призначаються взаємозв'язки між різними завантаженнями з метою визначення їх найнебезпечніших поєднань.

До складу ПК «ЛІРА-САПР» розробники відносять зовнішній архітектурний редактор (препроцесор) **САПФІР-КОНСТРУКЦІЇ**, який реалізує ланцюжок:

АРХІТЕКТУРНА МОДЕЛЬ – АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ – РОЗРАХУНКОВА СХЕМА.

На основі цього редактору користувач має можливість задавати вихідну інформацію, оперуючи конструктивними елементами – плита, діафрагма, колона, сходи, пандус та ін.

3.3.1 Основні розрахункові модулі (МСЕ РОЗРАХУНОК)

Для розрахунку створеної моделі може бути обраний відповідний **розрахунковий модуль**. Розрахункові модулі іноді називають процесорами маючи на увазі, що вони виконують виділені процеси в комп'ютерній програмі. До складу ПК «ЛІРА-САПР» входить кілька розрахункових модулів. Усі вони призначені для визначення НДС конструкції на основі методу скінченних елементів у переміщеннях. Розрахункові модулі реалізують сучасні вдосконалені методи розв'язання систем рівнянь, що мають високу швидкодію і допомагають розв'язувати системи з великою кількістю невідомих.

ЛІНІЙНИЙ МОДУЛЬ призначений для розв'язування задач, що описують роботу матеріалу конструкцій у лінійно-пружній постановці.

НЕЛІНІЙНИЙ МОДУЛЬ дає змогу розв'язувати задачі, зв'язані з фізичною нелінійністю матеріалу в межах нелінійної теорії пружності й у пружно-пластичній постановці (бетон, залізобетон, сталобетон, метал, ґрунт). Розв'язують такі задачі кроковим і кроково-ітераційним методами. Нелінійний модуль допомагає розв'язувати задачі, пов'язані з геометричною нелінійністю (ванти, великопрогінні покриття, мембрани), а також і з конструктивною нелінійністю (контактні задачі, односторонні в'язі, тертя). До складу бібліотеки нелінійних скінченних елементів входять також елементи, що дають можливість одночасно враховувати фізичну та геометричну нелінійності. При розрахунках нелінійних задач кроковим методом крок навантаження з урахуванням його історії вибирається автоматично.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Витуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 57

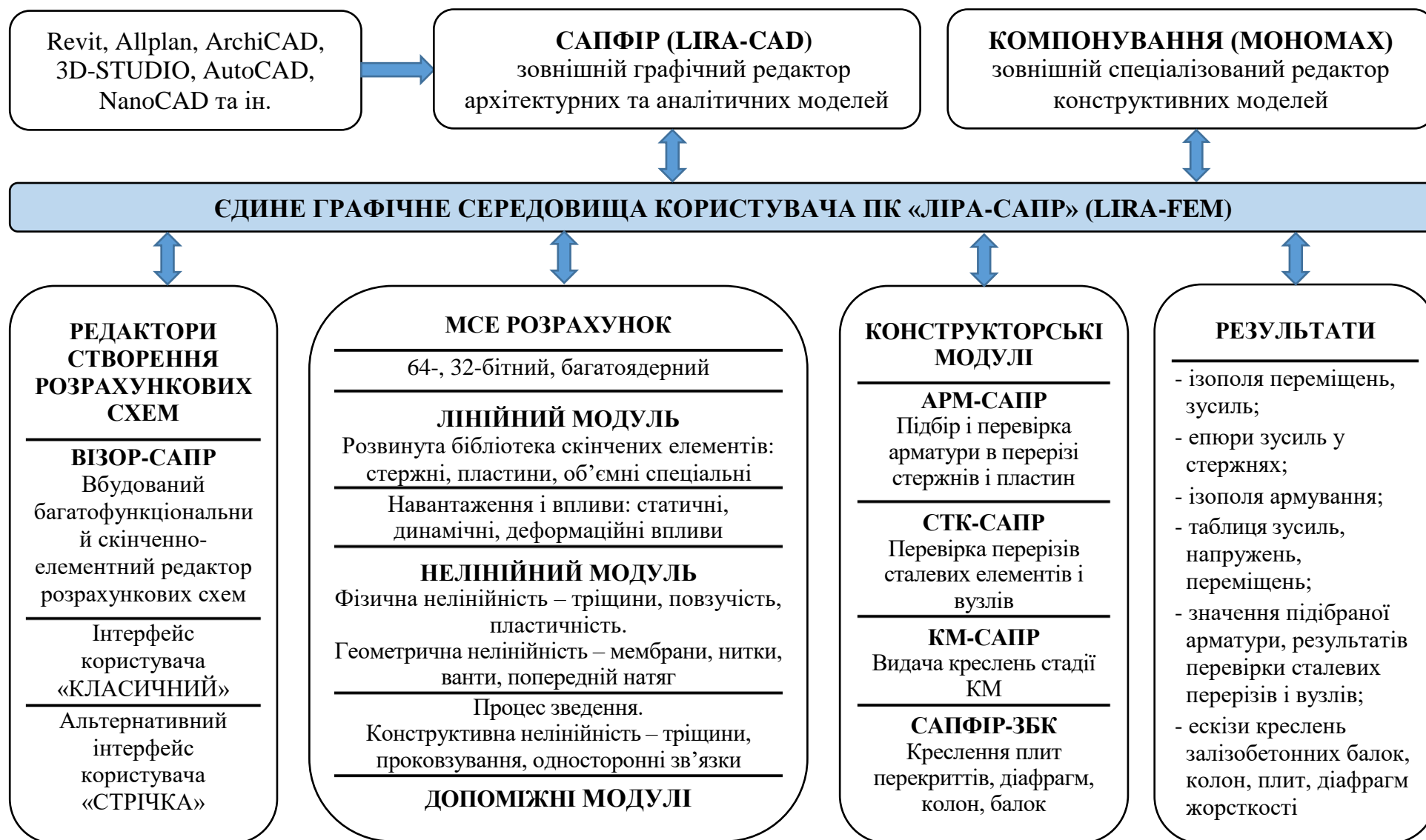


Рисунок 3.13 – Структура та схема роботи ПК «ЛІРА-САПР» із зовнішніми редакторами

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 58

Розрахункові модулі містять велику бібліотеку скінченних елементів (БСЕ), яка дає змогу створювати адекватні розрахункові моделі майже без обмежень для опису реальних властивостей об'єктів, що розраховуються. При цьому можливі завдання лінійних та нелінійних законів деформування матеріалів, урахування геометричної нелінійності зі знаходженням форми від початку змінюваних систем, а також урахування конструктивної нелінійності. Допускається наявність абсолютно жорстких вставок як у стержневих, так і у пластинчастих скінченних елементах. Реалізовано закони деформування різних класів залізобетону

3.3.2 Допоміжні розрахункові модулі (програми)

Допоміжні розрахункові модулі або підсистеми (РС-САПР, КС-САПР, КТС-САПР, ГРУНТ, РСЗ, РСН, СТІЙКІСТЬ, ЛІТЕРА, ФРАГМЕНТ, МЕТЕОР тощо) забезпечують можливість підготовки масиву спеціалізованих вихідних даних для основного розрахунку та виконання подальших досліджень розрахункової моделі за результатами розрахунку.

Допоміжні модулі для підготовки вихідних даних:

РС-САПР – редактор металевих сортаментів. Система є інструментарієм для створення нових і редагування існуючих сортаментних баз прокатних і зварних профілів. Разом з системою надається широкий набір існуючих нормативних баз профілів і сталей країн СНГ, Європи та США.

КС-САПР і КТС-САПР (конструктори стандартних і тонкостінних перерізів) – програмні модулі, що являють собою спеціалізовані графічні середовища для формування перерізів довільної конфігурації. Ці модулі дозволяють виконувати обчислення осьових, згинальних, крутильних і зсувних характеристик перерізу. Крім того забезпечують обчислення секторіальних характеристик перерізів, координат центру ваги, вигину й крутіння, моменти опору, форми ядру перерізу. За наявності зусиль у заданому перерізі за результатами обчислень відображається картина розподілу поточних, головних і еквівалентних напружень, що відповідають різним теоріям міцності, а також епюри векторіальних характеристик.

ГРУНТ – реалізує побудову тривимірної моделі ґрунтового масиву за даними інженерно-геологічних вишукувань (положення і характеристики свердловин), а також визначення коефіцієнтів постелі в кожній точці проекрованої фундаментної плити.

МІСТ – дає можливість побудування поверхні і лінії впливу в мостових спорудах від рухомого навантаження.

ДИНАМІКА-плюс – реалізує метод прямого інтегрування рівнянь руху за часом, що дає можливість проводити комп'ютерне моделювання вимушених коливань фізично та геометрично нелінійних систем.

МОНТАЖ-плюс – реалізує моделювання роботи споруди в процесі зведення з багаторазовою зміною розрахункової схеми. Ця система допомагає також здійснювати комп'ютерне моделювання зведення висотних будівель із монолітного залізобетону з урахуванням змін жорсткості та міцності бетону, викликаних тимчасовим заморожуванням укладеної суміші й іншими факторами.

Допоміжні модулі для виконання поглибленого інженерного аналізу результатів розрахунку:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 59

Підсистема **РСЗ** (Розрахункові сполучення зусиль) дає змогу зробити вибір найнебезпечніших сполучень зусиль за критерієм екстремальних напружень у відповідності до нормативних вимог багатьох країн.

Підсистема **РСН** (Розрахункові сполучення навантажень) допомагає визначити переміщення, зусилля й напруження від стандартних і довільних лінійних комбінацій навантажень. Як стандартні лінійні комбінації розуміють комбінації (поєднання), встановлені нормативними документами.

Підсистема **СТІЙКІСТЬ** дає можливість виконати перевірку загальної стійкості споруди з визначенням коефіцієнту запасу і форми втрати стійкості.

Підсистема **ЛІТЕРА** реалізує обчислення головних і еквівалентних напружень за різними теоріями міцності.

Підсистема **ФРАГМЕНТ** дає змогу визначити сили впливу одного фрагмента споруди, яка розраховується, на інший як навантаження. Зокрема, можуть бути визначені навантаження, що передаються наземною частиною розрахункової схеми на фундаменти.

Підсистема **МЕТЕОР** дає можливість комбінувати результати розрахунку топологічно ідентичних розрахункових схем, варіюючи граничні умови, жорсткісні характеристики, параметри пружної основи, жорсткості вузлів тощо.

Загалом можливості системи **ВІЗОР-САПР**, що надаються при відображенні результатів розрахунку, дозволяють отримати вичерпну інформацію по всьому об'єкту та його елементах і зробити детальний аналіз напружено-деформованого стану моделі за ізоплями переміщень і напружень, епюрами зусиль і прогинів, мозаїками руйнування елементів, головним і еквівалентним напруженням, формами втрати стійкості, анімацією коливань конструкції і багатьма іншими параметрами.

3.3.3 Конструкторські модулі

Після проведення основних і допоміжних розрахунків **ПК «ЛІРА-САПР»** допомагає провести конструювання сталевих та залізобетонних елементів об'єкта, що розраховується.

Система для конструювання **АРМ-САПР** реалізує підбір площ перерізу арматури колон, балок, плит та оболонок за першим і другим граничними станами відповідно до нормативів України, країн СНД, Європи та США. Існує можливість задання довільних характеристик бетону й арматури, що має велике значення під час розрахунків, пов'язаних з реконструкцією споруд. Система дає змогу об'єднувати кілька однотипних елементів у конструктивний елемент, що допомагає робити ув'язку арматури уздовж усього конструктивного елемента. Система може функціонувати в локальному режимі (**ЛАРМ-САПР**), здійснюючи як підбір арматури, так і перевірку заданого армування для одного елемента. За результатами розрахунку формуються креслення балок і колон, а також здійснюється створення dxf-файлів креслень.

Система для конструювання **СТК-САПР** працює у двох режимах – підбору перерізів елементів сталевих конструкцій, таких як ферми, колони і балки, та перевірки заданих перерізів відповідно до нормативів України, країн СНД, Європи та США. Допускається об'єднання кількох однотипних елементів у конструктивний елемент. Система може функціонувати в локальному режимі, даючи змогу перевірити кілька варіантів при конструюванні необхідного елемента.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 60

Система **РС-САПР**, інформаційно пов'язана із системою **СТК-САПР**, допомагає здійснювати редагування використовуваної сортаментної бази прокатних і зварних профілів.

3.3.4 Модулі документування та розробки креслень конструкцій

Формування звітів за результатами роботи з комплексом виконується за допомогою системи **ДОКУМЕНТАТОР**. Ця система дає можливість подати всю отриману інформацію як у табличному, так і в графічному вигляді. Табличний і графічний розділи необхідної для звіту інформації можуть бути розміщені спільно на спеціально організованих для цієї мети аркушах і забезпечені коментарями та написами. Крім того, таблична інформація може бути передана в **Microsoft Excel**, а графічна — у **Microsoft Word**.

Реалізовано виведення таблиць у форматі HTML, а також у спеціальному форматі, що дає змогу далі працювати з таблицями в програмі **Дизайнер таблиць**.

На базі ПК «ЛІРА-САПР» розроблені розрахунково-графічні системи:

КМ-САПР – допомагає за даними розрахунку сталевих конструкцій (елементів і вузлів) отримати повний комплект креслень КМ у середовищі AutoCAD: монтажні схеми з маркуванням елементів і вузлів, відомості елементів, креслення вузлів із тривимірною візуалізацією, а також їх специфікації.

САПФІР-ЗБК — дає змогу за результатами підібраної арматури в плитах перекриттів і діафрагмах в автоматизованому режимі отримувати робочі креслення армування плит і діафрагм (розкладка арматури, специфікації, відомості деталей тощо).

3.3.5 Модулі для конвертації даних

Програмний комплекс «ЛІРА-САПР» підтримує інформаційний зв'язок з такими системами, як **REVIT, AutoCAD, ArchiCAD, Allplan, BOCAD, Advance Steel, ТЕКЛА, STARK ES, ПК МОНОМАХ-САПР** і **ФОК-ПК** на основі відкритих та розроблених форматів даних.

Вбудовані конвертери дозволяють здійснювати імпорт графічних даних для спрощення розробки комп'ютерної моделі, а також здійснювати експорт даних з результатами розрахунку в програми, які містять конструкторські модулі, для подальшої розробки конструктивних рішень.

3.4 Графічне середовище ПК «ЛІРА-САПР»

ПК ЛІРА-САПР володіє розвинутими засобами графічного середовища для побудови моделей та аналізу результатів їх розрахунку. Загальний вигляд головного вікна системи ВІЗОР-САПР приведений на рис. 3.14.

Структура вікон ПК «ЛІРА-САПР» стандартна для програм ОС «Windows» і включає в себе:

- *заголовок вікна програми*, в якому виводиться назва програми та ім'я поточного проекту, міститься панель виклику швидких команд;
- рядок випадаючих *меню*, в яких згруповані всі доступні команди;
- *стрічка*, що об'єднує *набори інструментів* та елементи керування, розділені на *вкладки*;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 61

- панелі інструментів, що містить кнопки для виклику найчастіше використовуваних команд;
- робочу область вікна графічних даних, в якій у графічній формі відображається побудована розрахункова схема та виводяться результати розрахунку;
- інформаційний рядок стану, в якому виводиться коротка інформація про призначення вибраної команди, а також повідомлення і підказки системи. У правій частині інформаційного рядка розміщені три цифрові поля, в яких виводиться інформація про кількість вузлів і елементів моделі, номер активного завантаження і кількість всіх завантажень, передбачених користувачем.

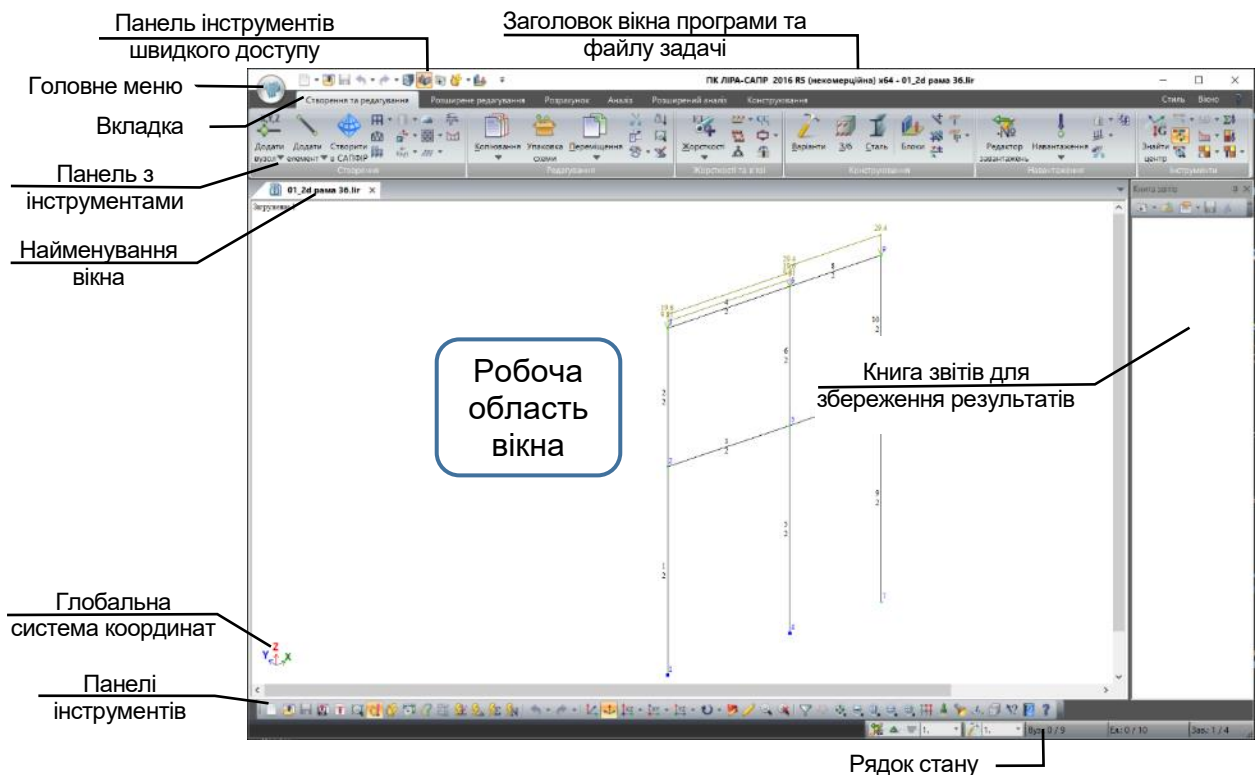


Рисунок 3.14 – Загальний вигляд головного вікна системи ВІЗОР-САПР

Після створення нової задачі графічне середовище ПК «ЛІРА-САПР» працює в режимі формування розрахункової схеми. Цей режим надає користувачеві широкий набір інструментальних засобів, операцій і функцій для опису скінченно-елементних моделей конструкцій і споруд широкого класу. Важливе місце відведене створенню стандартних плоских і просторових фрагментів (рам, ферм, оболонок тощо). Отримані таким чином базові елементи можуть надалі копіюватися, переміщатися, зшиватися один з одним, утворюючи у результаті складні просторові розрахункові схеми. Окремий блок функцій реалізує операції задання жорсткостей та їх присвоєння елементам розрахункової схеми.

Після формування геометричної схеми конструкції наступним етапом є задання зовнішніх навантажень. У задачі може бути кілька завантажень, після проведення розрахунку можна переглядати результати окремо по кожному з них. Важливим елементом розрахунку, необхідним при використанні результатів для конструювання є автоматизований вибір розрахункових поєднань зусиль при спільній дії декількох

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 62

завантажень. Потрібні для цього дані задаються для кожного завантаження в спеціальній таблиці розрахункових сполучень зусиль (РСЗ).

В разі успішного розв'язку задачі на диску створюються набори робочих файлів з результатами і стає доступним режим візуалізації результатів розрахунку. При аналізі напруженого стану для стержневих елементів розрахункової схеми можуть бути побудовані епюри будь-якого з переміщень і зусиль, що виникають в поточному завантаженні. Для пластин, оболонок і тривимірних тіл результати представляються у вигляді ізополів напружень, де кожен колір відповідає певному діапазону значень.

В процесі роботи над задачею ПК «ЛІРА-САПР» створює в робочих каталогах ряд файлів, в яких зберігаються вихідні дані та результати розрахунку:

- *.*lir* – основний файл проекту, в якому зберігаються всі дані розрахункової схеми;
- *.*txt* – текстовий файл задачі, містить опис розрахункової схеми в текстовому вигляді, використовується процесором ПК ЛІРА для розрахунку, а також при конвертації вихідних файлів ПК ЛІРА у інші формати;
- *.*~lir* – файл резервної копії проекту;
- *.*har* – робочий файл системи ЛАРМ-САПР;
- *.*stc* – робочий файл системи СТК-САПР;
- *.*sbj*, *.*stf*, – двійковий та текстовий файли системи КС-САПР, які містять опис сконструйованого перерізу;
- *.*srt* – файли баз даних сортаменту системи РС-САПР;
- *.*mkt* – макет системи ДОКУМЕНТАТОР, в якому зберігаються всі сформовані користувачем листи з графічною інформацією проекту;
- *.*blk*, *.*kln* – файли з результатами підбору армування балок та колон системою ЛАРМ-САПР;
- *.*#xx.**, *.*_xx.**, *.*#xx* – проміжні файли з результатами розрахунку окремих елементів схеми.

3.5 Знайомство з ПК «ЛІРА-САПР»

3.5.1 Програмний інструментарій комп'ютерних технологій розрахунку і проектування конструкцій

Головні інструменти керування в ПК «ЛІРА-САПР» розташовані в стрічковому інтерфейсі. Стрічковий інтерфейс розташований у верхній частині вікна програми (див. рис. 3.14) і являє собою робочий простір, заснований на *панелях інструментів*, які розділені *вкладками*. На вкладках відображаються інструменти та елементи керування, які призначені для розв'язання певної задачі. Вкладки стрічки відповідають можливим етапам роботи зі схемою:

- створення та редагування;
- розширене редагування;
- розрахунок;
- аналіз;
- розширений аналіз;
- конструювання.

Під час виділення об'єктів активуються такі контекстні вкладки:

- робота з вузлами;
- робота зі стержнями;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 63

- робота з пластинами;
- робота з об'ємними СЕ;
- робота з одновузловими СЕ;
- робота з СЕ.

Крім цього існує також гри вкладки, які викликають окремі режими роботи програми:

- редактор контурів;
- просторова модель (3D ірафіка);
- триангуляція.

Далі познайомимся з основними елементами стрічкового інтерфейсу ПК «ЛІРА-САПР»:

Вкладка (рис. 3.15) – елемент графічного інтерфейсу користувача, який дає можливість в одному вікні додатка виконувати перемикання між зумовленими наборами елементів інтерфейсу, коли доступні кілька, а на виділеному для них просторі вікна можна показувати тільки один з них.

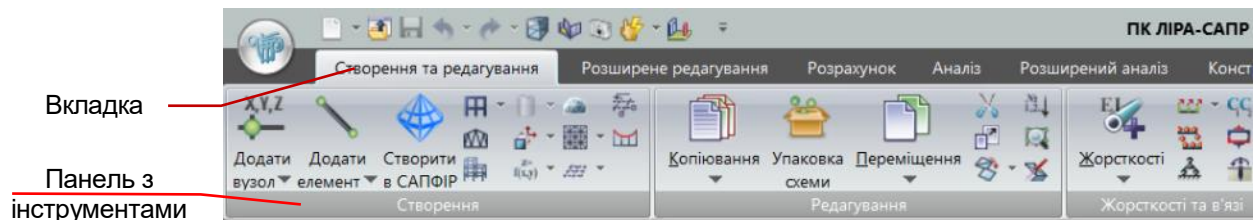


Рисунок 3.15 – Вкладки і панелі стрічки

Контекстні вкладки стрічки (рис. 3.16) – при відмітці певного типу об'єкта або виконанні певних команд замість панелі інструментів або діалогового вікна виводиться особлива контекстна вкладка стрічки. Контекстна вкладка закривається після завершення роботи з об'єктами і зняття з них відмітки.



Рисунок 3.16 – Контекстна вкладка стрічки **Робота з вузлами**

Кожна вкладка складається з панелей інструментів.

Панель інструментів (рис. 3.17) – організація команд у групи. Панелі інструментів можуть розташовуватися на вкладках або окремо. Панелі інструментів на вкладках стрічки допомагають здійснювати швидкий виклик команд і при цьому скорочують кількість наявних на екрані елементів інтерфейсу.

Розкриті списки кнопок панелей інструментів стрічки містять цілу низку команд, які близькі за призначенням та займають при цьому на панелі стрічки місце лише однієї команди.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 64

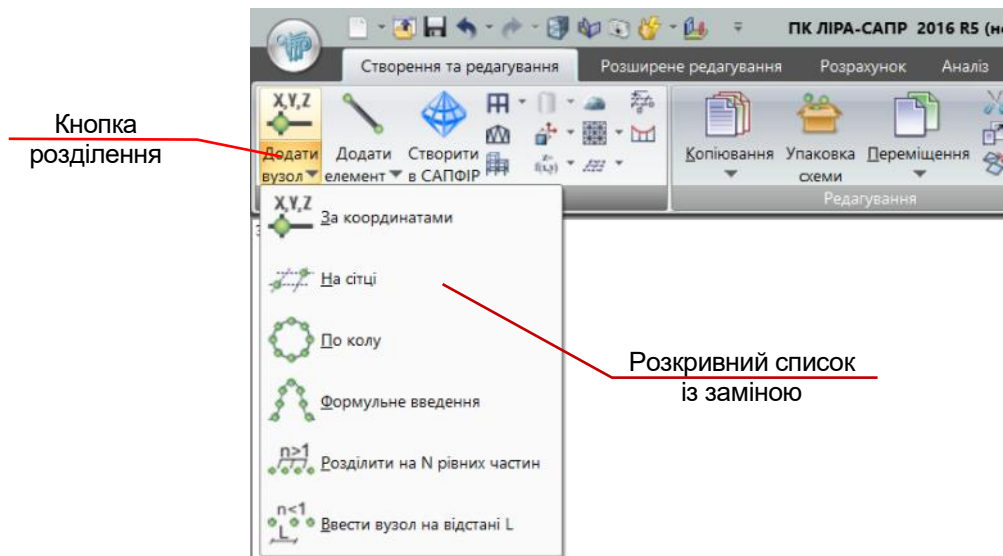


Рисунок 3.17 – Організація роботи кнопок у панелях стрічки

Існує кілька можливих способів роботи розкритого списку:

- *розкритий список із заміною* – налаштований як кнопка розділення. Головна кнопка цього розкритого списку відображає останню використану команду, яку згодом можна запустити просто натиснувши без здійснення вибору із розкритого списку. Розкритий список відкривається натисканням кнопки розділення;
- *розкритий список* – після використання однієї з команд списку головна кнопка не відображає останню використану команду, а завжди працює однаково.
- *розкритий список без команди за замовчуванням* – не налаштований як кнопка розділення і натискання головної кнопки, завжди веде до відкриття списку.

Панель інструментів швидкого доступу (рис. 3.18) – панель швидкого доступу розміщується у верхній частині вікна додатка (вдovж стрічки, над або під нею) і забезпечує безпосередній доступ до певного набору команд.

Панель швидкого доступу може налаштовуватися і містити набір команд, що не залежать від вкладки, яка відображається в даний момент на стрічці.

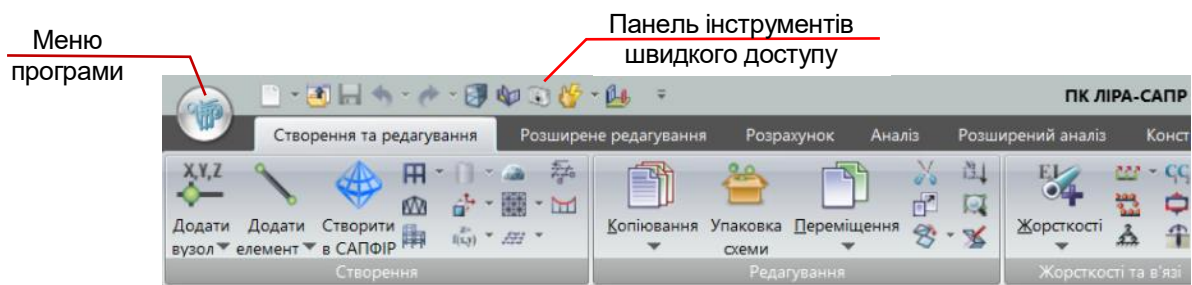


Рисунок 3.18 – Панель інструментів швидкого доступу

Меню програми (рис. 3.19) – меню для роботи з файлами документа і налаштуванням параметрів для графічного відображення схеми та розрахунку. Також головна сторінка меню програми додатково містить список документів, які відкривалися останніми.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 65

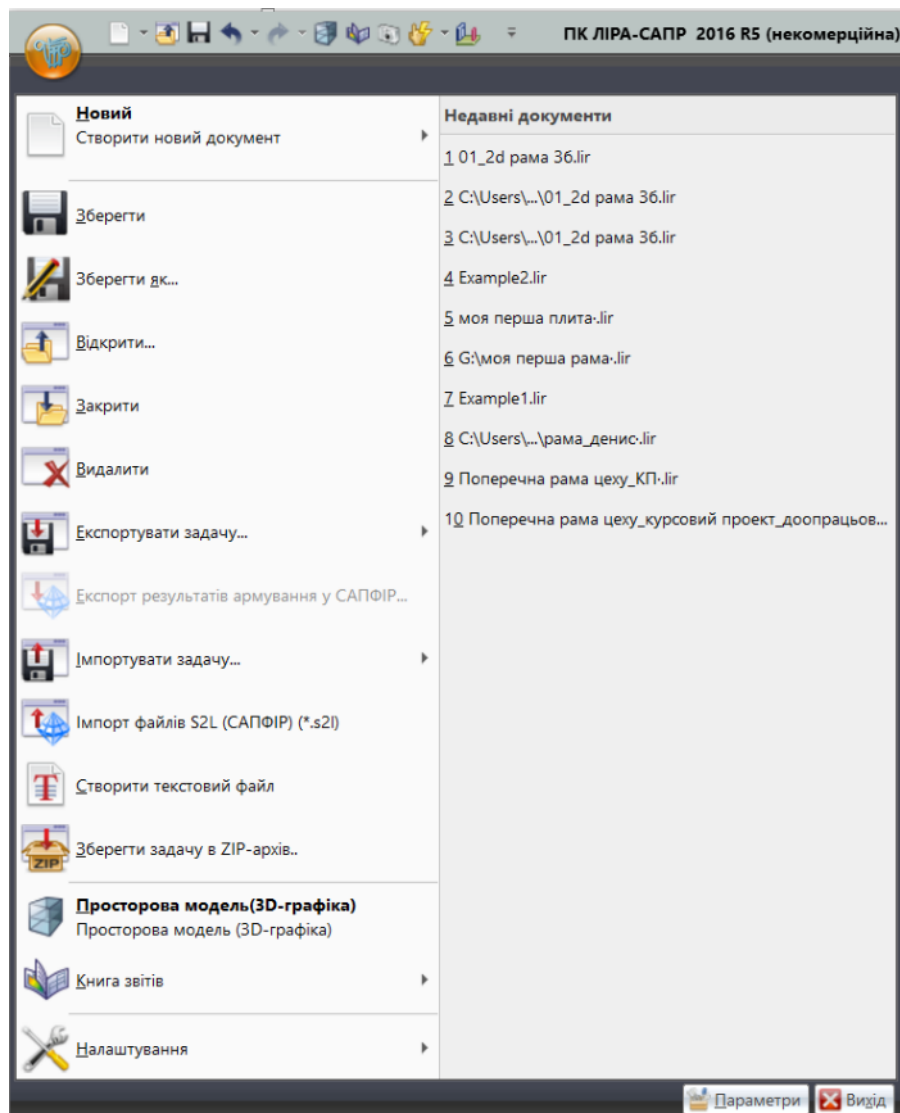


Рисунок 3.19 – Розгорнуте меню програми

Рядок стану (рис. 3.20) – це панель у нижній частині вікна, призначена для виведення підказок до пунктів меню, індикації елементів, а також містить блоки коригування і перемикання завантажень розрахункової схеми, блок перемикання варіанта конструювання.

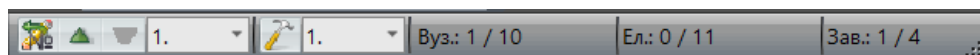


Рисунок 3.20 – Рядок стану

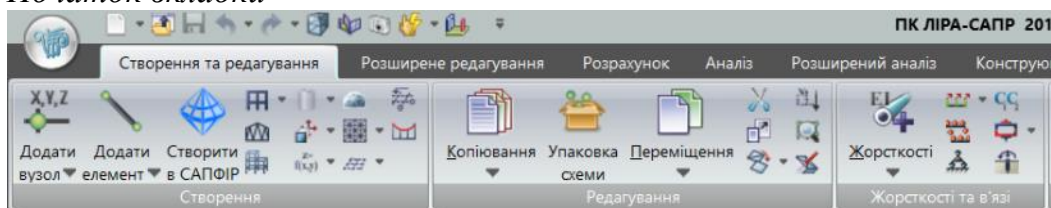
Функціональна вкладка «Створення та редагування». У цю вкладку входять (рис. 3.21):

- панель «Створення» з командами генерації регулярних фрагментів і сіток, створення поверхонь, створення і триангуляція контурів;
- панель «Редагування» з інструментами копіювання переміщення, функції упаковки схеми, кнопка виклику діалогового вікна для вибору ознаки системи за степенями вільності тощо;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 66

- панель «Жорсткості та в'язі», на якій розташовані: розкритий список «Жорсткості», що містить операції з вибору необхідних типів (параметрів) жорсткості з бібліотеки характеристик жорсткості; інструмент задавання в'язів у вузлах; інструменти моделювання умов роботи та особливостей взаємодії скінченних елементів у вигляді абсолютно жорстких тіл (АЖТ), груп об'єднання переміщень у вузлах; інструмент задання коефіцієнтів постелі С1 і С2 на зазначений елемент або групу елементів; кнопка виклику системи **Конструктор перерізів (КС-САПР)** для формування геометрії нестандартних перерізів елементів конструкції і розрахунку їх характеристик жорсткості; кнопка виклику системи **Конструктор тонкостінних перерізів (КТС-САПР)** для формування геометрії нестандартних тонкостінних перерізів елементів конструкції та обчислення їх характеристик жорсткості;

Початок вкладки



Кінець вкладки

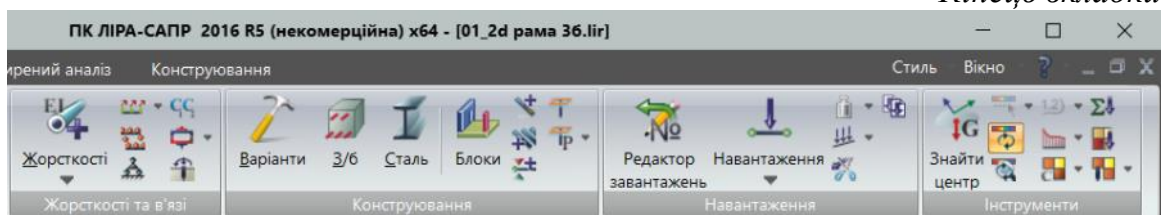


Рисунок 3.21 – Вкладка «Створення та редагування»

- панель «Конструювання» з інструментами створення варіантів конструювання і призначенню для них матеріалів, роботи з конструктивними блоками, створення конструктивних або уніфікованих елементів для подальшого сталевого розрахунку чи розрахунку армування;

- панель «навантаження», на якій розташовані кнопки інструментів редактора навантажень, розкритого списку задання навантажень на вузли та елементи, задання навантажень від власної ваги, а також редагування навантажень; - панель «Інструменти», на якій розташована низка інших допоміжних інструментів, розкритих списків, функцій, які використовуються для налаштування графічного відображення результатів і початкових даних схеми.

Функціональна вкладка «Розширене редагування» – містить спеціальні інструменти з розширеного редагування схеми, збирання схем, роботи з блоками та суперелементами (рис. 3.22).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 67

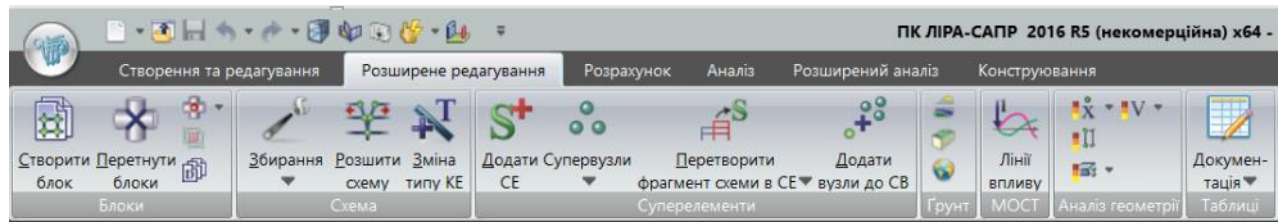


Рисунок 3.22 – Вкладка «Розширене редагування»

Функціональна вкладка «Розрахунок» – містить інструменти задання даних для статичного, динамічного й додаткових розрахунків. формування таблиць. контроль параметрів для розрахунку та запуск задачі на розрахунок (рис. 3.23).

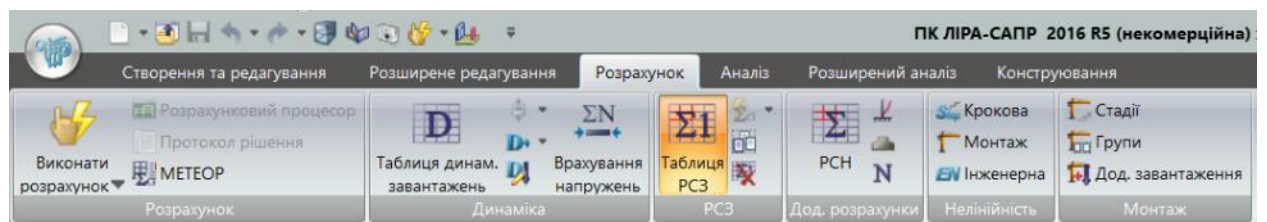


Рисунок 3.23 – Вкладка «Розрахунок»

Вкладка «Розрахунок» містить такі панелі:

- **Розрахунок** – зміна параметрів розрахунку для поточної задачі, завантаження даних у розрахунковий процесор і виконання розрахунку;
- **Динаміка** – операції, що дають можливість організувати розрахунок на динамічні дії. задання характеристик кожною конкретного динамічного впливу;
- **РСЗ (розрахункові сполучення зусиль)** – операції, що дають змогу формувати розрахункові сполучення зусиль;
- **Додаткові розрахунки** – задання вихідних даних для обчислення переміщень у вузлах і зусиль (напружень) в елементах від стандартних і довільних лінійних комбінацій завантажень; для розрахунку навантажень на фрагмент, обчислення головних та еквівалентних напружень у скінченних елементах; розрахунку на стійкість;
- **Нелінійність** – задання параметрів, що визначають специфіку й організацію крокового процесу для розв'язання нелінійних задач;
- **Монтаж** – задання інформації для комп'ютерного моделювання процесу зведення споруд, яка передбачає монтаж та демонтаж елементів, зміна умов закріплення конструкцій або сполучення елементів між собою.

Панель **Нелінійність** містить такі команди:

Крокова – задання вихідних параметрів, які визначають специфіку й організацію крокового процесу для розв'язання нелінійних задач;

Монтаж – задання інформації для комп'ютерного моделювання процесу зведення споруд, яке передбачає монтаж і демонтаж елементів, зміну умов закріплення конструкцій або сполучення елементів між собою;

Інженерна – задання вихідних даних розрахунку задач з використанням інженерної нелінійності – обчислення нових характеристик жорсткості елементів з урахуванням заданих діаграм деформування матеріалів і виконання статичного розрахунку з новими жорсткісними характеристиками.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 68

Панель **Монтаж** містить такі команди:

Стадії – формування стадій для комп'ютерного моделювання процесу зведення, задання монтованих або демонтованих елементів;

Групи – задання інформації про групи елементів, монтованих на поточній стадії зведення;

Додаткові навантаження – задання інформації про завантаження, які можуть бути прикладені як під час зведення, так і після зведення споруди.

Функціональна вкладка «Аналіз результатів розрахунку» – містить найбільш вживані функції аналізу результатів, а саме: виведення на екран числової і графічної інформації про переміщення будь-якого вузла та елемента, зусилля і напруження в будь-якому елементі (рис. 3.24).

Вкладка **Аналіз** містить такі панелі:

- **Деформації** – операції, які дають можливість відобразити деформації конструкції;
- **Зусилля в стержнях** – операції щодо відображення епюр і мозаїк зусиль у стержнях.
- **Напруження в пластинах та об'ємних СЕ** – розфарбовування пластин і поверхонь об'ємних елементів відповідно до значень напружень у них;
- **Зусилля у спецеlementах** – відображення на екрані мозаїк зусиль у спеціальних елементах;
- **Зусилля в одновузлових СЕ** – відображення зусиль в одновузлових елементах розрахункової схеми;
- **Інструменти** – основні інструменти для налаштування режиму графічного відображення схеми, а також функції подання результатів;
- **Таблиці** – виведення на екран числового подання результатів, а також запуск режимів для формування звіту та пояснювальної записки.

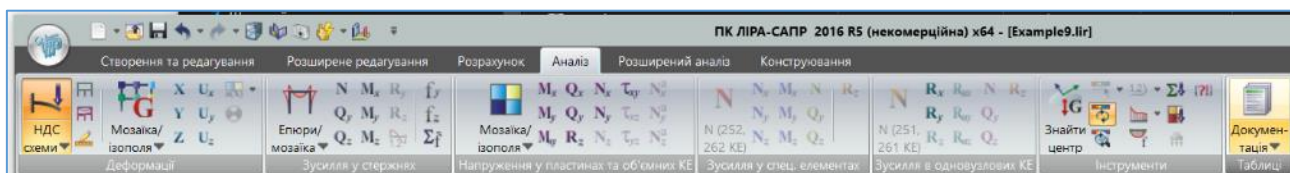


Рисунок 3.24 – Вкладка «Аналіз»

Функціональна вкладка «Конструювання» – містить операції щодо задання вихідних даних для конструювання, розрахунок армування, перевірка і підбір сталевих перерізів, виведення на екран числової і графічної інформації про результати розрахунку за допомогою конструкторських модулів, а також запуск локальних режимів.

Вкладка **Конструювання** (рис. 3.25) містить такі панелі:

Розрахунок – операції, пов'язані з розрахунком армування залізобетонних елементів;

Армування пластин – відображення результатів армування в пластинчастих елементах одним з обраних способів;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 69

Армування стержнів – відображення результатів армування в стержневих елементах одним з обраних способів, а також конструювання балок і колон;

Інструменти – операції з управління градуванням і колірним налаштуванням ізополів та мозаїк, вихідних даних розрахункової схеми (C1. C2. Pz). результатів статичного/динамічного розрахунку, результатів перевірки та підбору сталевих перерізів, результатів визначення підбору площ арматури, а також операції з налаштування поновлення шкали й колірного відображення вузлів і елементів схеми на екрані, можливості виконати розрахунок уніфікацій РСЗ або зв'язатися з результатами ЗБ і сталевих розрахунку;

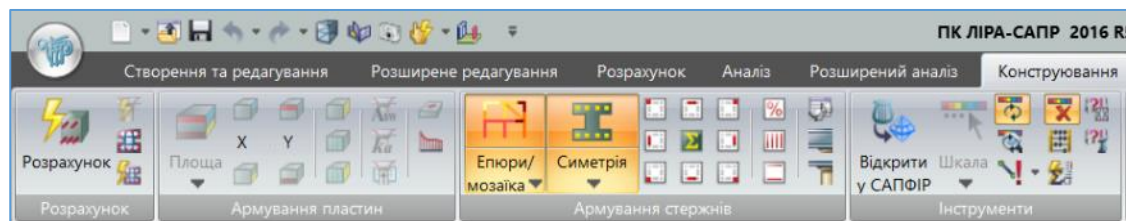
Конструювання – операції зі зміни жорсткостей і задання вихідних даних для конструювання;

Сталь: розрахунок – операції, пов'язані з розрахунком сталевих елементів;

Сталь: перевірка і підбір – графічне відображення результатів перевірки і підбору сталевих перерізів;

Таблиці – виведення на екран числового подання результатів, а також запуск режимів для формування звіту та пояснювальної записки.

Початок вкладки



Кінець вкладки

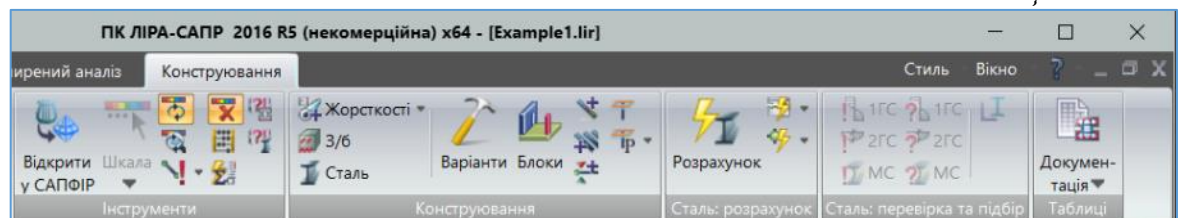



Рисунок 3.25 – Вкладка «Конструювання»

3.5.2 Підготовка до створення розрахункової схеми в ПК «ЛІРА-САПР», налаштування каталогів файлів та одиниць виміру

Запуск програми ПК «ЛІРА-САПР». Після встановлення ПК «ЛІРА-САПР» на комп'ютер запустить програму.

Здайте за необхідності папки каталогів файлів «ЛІРА-САПР», у яких зберігатимуться параметри налаштувань, файли вихідних даних, розрахунку, документування тощо.

У Меню програми у розкритому списку пункту **Налаштування** виберіть

команду –  **Каталоги**. Після цього відкриється діалогове вікно з розташуванням каталогів файлів (рис. 3.26). Під час роботи програма ПК «ЛІРА-САПР» використовує вісім каталогів:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 70

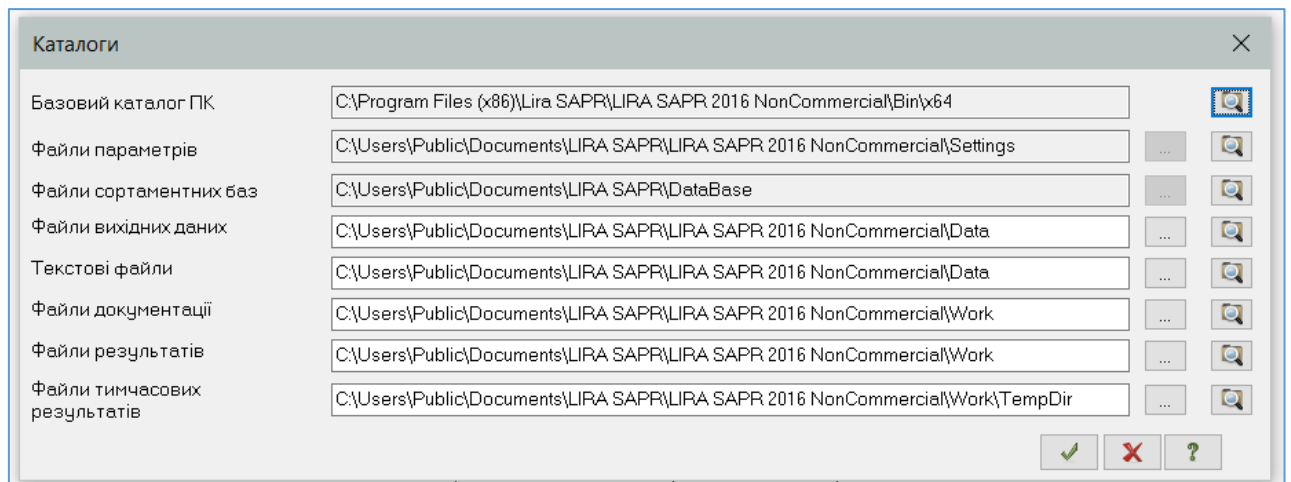


Рисунок 3.26 – Діалогове вікно **Каталоги**

Файли параметрів налаштувань – каталог зберігання файлів, що містять параметри налаштувань;

Файли сортаментних баз – каталог зберігання бінарних файлів баз сортаментів сталевих прокату;

Файли вихідних даних – каталог зберігання бінарних файлів вихідних даних;


Текстові файли – каталог зберігання текстових файлів вихідних даних;


Файли документації – каталог зберігання файлів, підготовлених для документування;

Файли результатів – каталог зберігання бінарних і текстових файлів результатів розрахунку та тимчасові файли;

Файли тимчасових результатів – каталог зберігання тимчасових файлів, які генерує МСЕ-процесор.

За замовчуванням створений файл зберігатиметься в папці **Data** (C:\Users\Public\Documents\LIRA SAPR\LIRA SAPR 2016 NonCommercial\Data), згенеровані в процесі розрахунку та документування файли зберігатимуться в робочому каталозі **Work** (C:\Users\Public\Documents\LIRA SAPR\LIRA SAPR 2016 NonCommercial\Work).

Для зміни каталогів необхідно натиснути кнопку  і вибрати новий каталог у дереві або ввести каталоги у відповідні поля вручну.

Налаштування одиниць вимірювання. У меню Додатки у розкритому списку пункту **Налаштування** вибирається команда  **Одиниці виміру** і у діалоговому вікні (рис. 3.27) відповідно до обраної користувачем системи (СІ або технічної, наприклад, МТС) призначаються одиниці вимірювання основних величин (зміна одиниць вимірювання може бути виконана на будь-якому етапі роботи з проектом).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 71

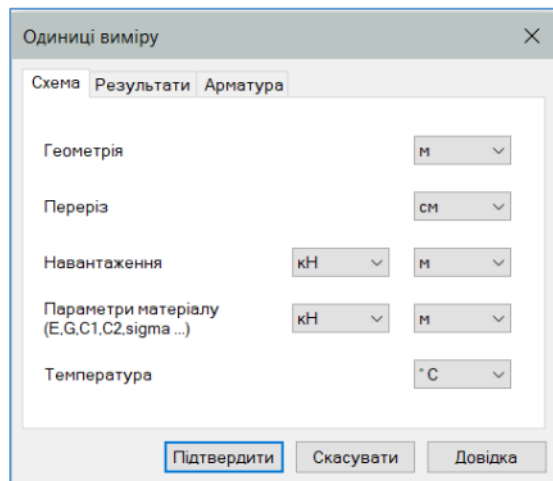


Рисунок 3.27 – Діалогове вікно
Одиниці виміру

3.5.3 Створення нового проекту для виконання розрахунку, вибір ознаки схеми

Для створення нового завдання відкрийте **Меню програми** → **Новий**.

У відкритому діалоговому вікні **Опис схеми** (рис. 3.28) задайте такі параметри:

- ім'я створюваної задачі – наприклад. «Завдання 1»;
- у списку виберіть **Ознака схеми**:

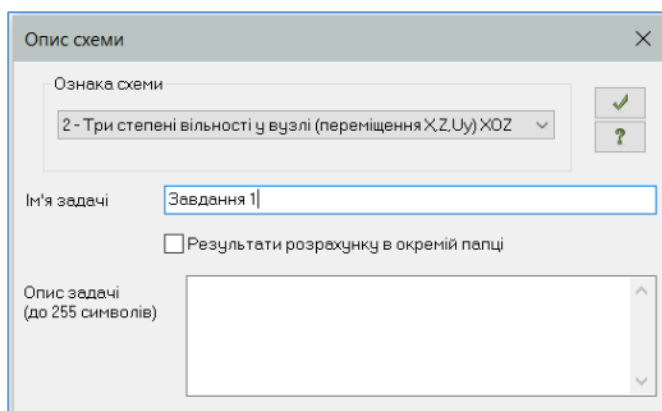


Рисунок 3.28 – Діалогове вікно
Опис схеми

Ознака схеми 1 – плоскі схеми, що розміщуються в площині XOZ; кожен вузол має два степені вільності – лінійні переміщення вздовж осей X, Z або X2, Z2. У цій ознаці схеми розраховують **плоскі ферми і балки-стілки**;

Ознака схеми 2 – плоскі схеми, що розміщуються в площині XOZ; кожен вузол має три степені вільності – лінійні переміщення вздовж осей X, Z або X2, Z2 і поворот навколо осі Y або Y2. У цій ознаці схеми розраховують **плоскі рами і допускається включення елементів ферм і балок-стінок**;


Ознака схеми 3 – плоскі схеми, що розміщуються в площині XOY; кожен вузол має три степені вільності – лінійне переміщення вздовж осі Z або Z2 та повороти навколо осей X, Y або X2, Y2. У цій ознаці розраховують **балкові ростверки та плити, допускається врахування пружної основи**;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 72

Ознака схеми 4 – просторові схеми, кожен вузол яких має три степені вільності – лінійні переміщення вздовж осей X, Y, Z або X2, Y2, Z2. У цій ознаці розраховують **просторові ферми та об'ємні тіла**.

Ознака схеми 5 – просторові схеми загального вигляду з шістьма степенями вільності у вузлі: три лінійні переміщення вздовж осей X, Y, Z або X2, Y2, Z2 і три повороти навколо X, Y, Z або X2, Y2, Z2. У цій ознаці схеми розраховують **просторові каркаси, оболонки і допускається включення об'ємних тіл, врахування пружної основи тощо**.

Після цього натисніть кнопку  – **Підтвердити**.

Діалогове вікно **Опис схеми** також можна відкрити з уже обраною ознакою схеми для її зміни. Для цього на вкладці стрічкового інтерфейсу «**Створення та редагування**» в панелі «**Редагування**» слід натиснути на кнопку  інструменту **Ознака схеми** і обрати у розкритому списку відповідну ознаку схеми.

3.6 Можливості та призначення спеціалізованих програмних комплексів САПФІР, МОНОМАХ-САПР

3.6.1 САПФІР (LIRA-CAD)

Назва САПФІР (остання версія має назву LIRA-CAD) означає Система архітектурного проектування, формоутворення та розрахунків. Вже із назви програми зрозуміло її основне призначення: архітектурне проектування. При цьому програма надає користувачеві можливості вільного формоутворення у тривимірному просторі (3D). *Особливість програми, що виділяє її з ряду програм подібної спрямованості, – це тісний зв'язок з програмним комплексом ПК ЛІРА-САПР (LIRA-FEM) для аналізу напружено-деформованого стану твердого тіла та розрахунків на міцність будівель та споруд.*

САПФІР – це автономний графічний редактор, який відноситься до сімейства САД-програм і розроблений фахівцями компанії LIRALAND спеціально для організації коректної взаємодії з ПК «LIRA-САПР». Застосування САПФІР та його взаємодія з ЛІРА-САПР виконується у такому порядку:

1) В середовищі САПФІР створюється архітектурна модель будівлі на основі 3D моделювання, використовуючи звичні нашому слуху та виду об'єкти, як колони, балки, стіни, плити та інше (рис. 3.29).

2) Поруч із створенням 3D моделі формується і аналітична модель цієї будівлі за допомогою вбудованої підсистеми **САПФІР-Конструкції** (рис. 3.30). Для цієї моделі формується необхідний набір завантажень, виконується збір навантажень, генеруються РСЗ, РСН, формуються з'єднання елементів в стиках завдяки задаванню умов обпирання, створенню абсолютно жорстких тіл (АЖТ) та контурів продавлювання. Далі виконується тріангуляція, трансляція моделі для розрахунку в ЛІРА-САПР.

3) Після трансляції в ПК «ЛІРА-САПР» виконується розрахунок моделі і аналіз його результатів. Аналізуються переміщення, зусилля, напруги в елементах та проводиться підбір армування.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 73

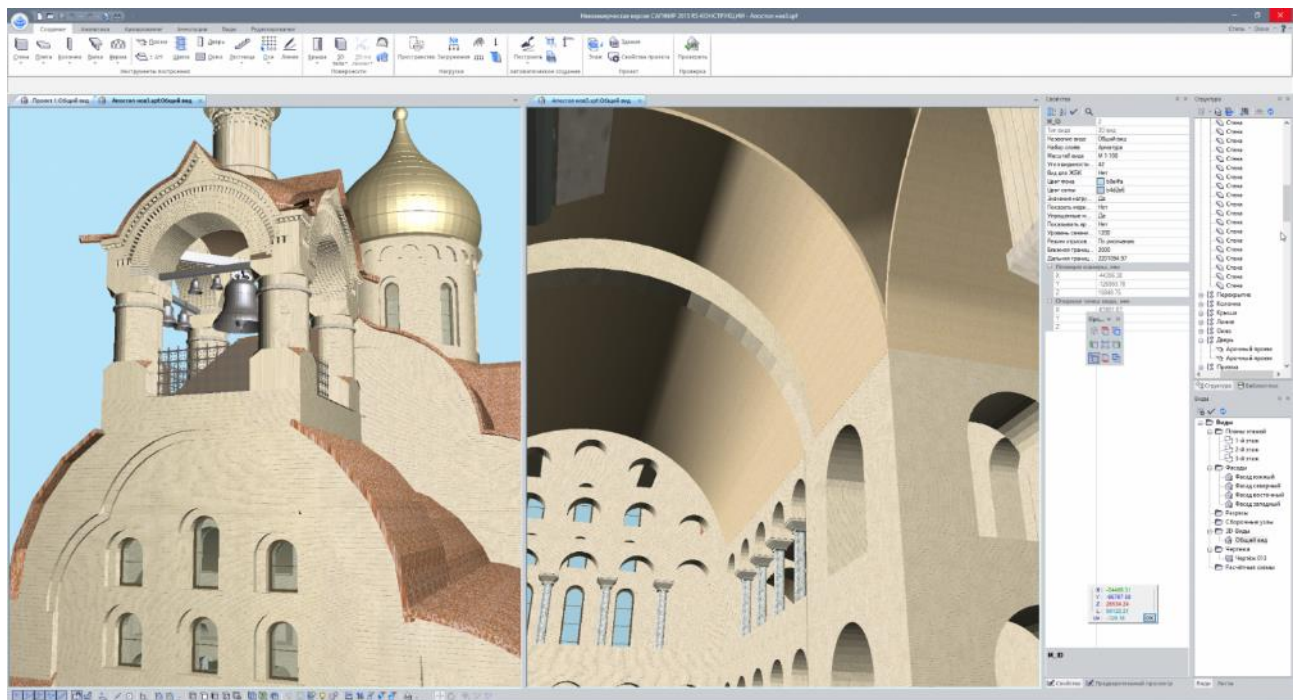


Рисунок 3.29 – Можливості архітектурного моделювання САПФІР

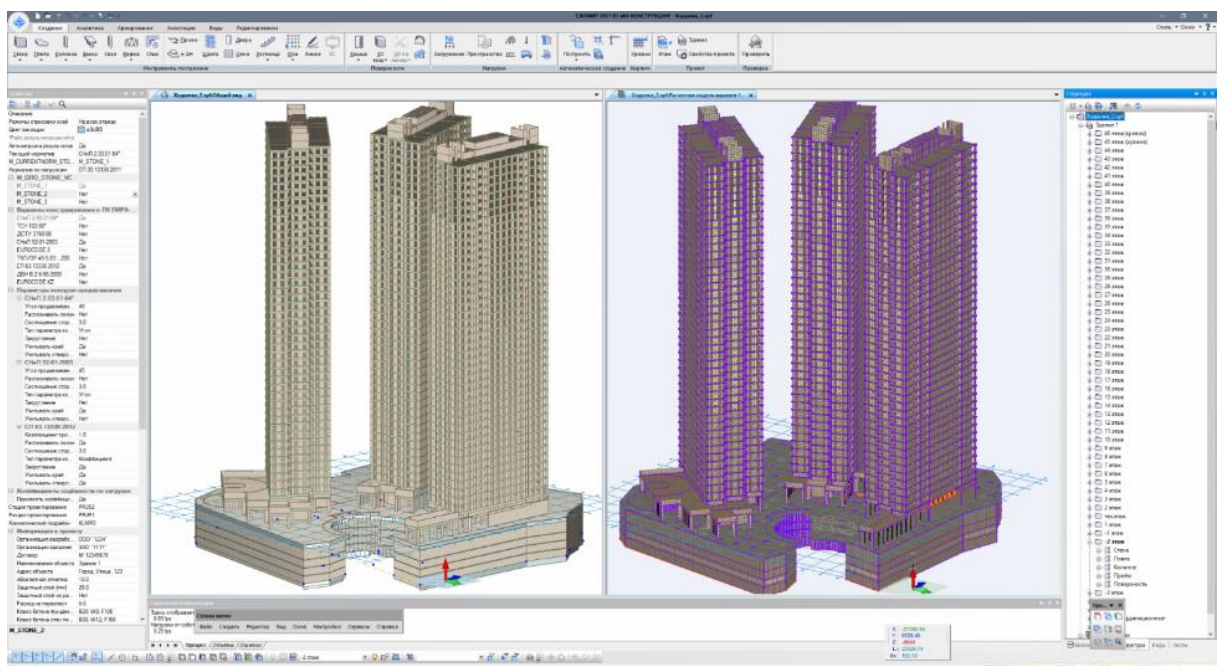


Рисунок 3.30 – Формування паралельно з архітектурною розрахунковою комп'ютерної моделі в САПФІР за допомогою підсистеми САПФІР-Конструкції

4) Підібрані результати армування експортуються до САПФІР для подальшого конструювання та випуску креслень основних ЗБ елементів за допомогою вбудованої системи САПФІР-ЗБК (рис. 3.31).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015		Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.X- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1
			Арк 122 / 74

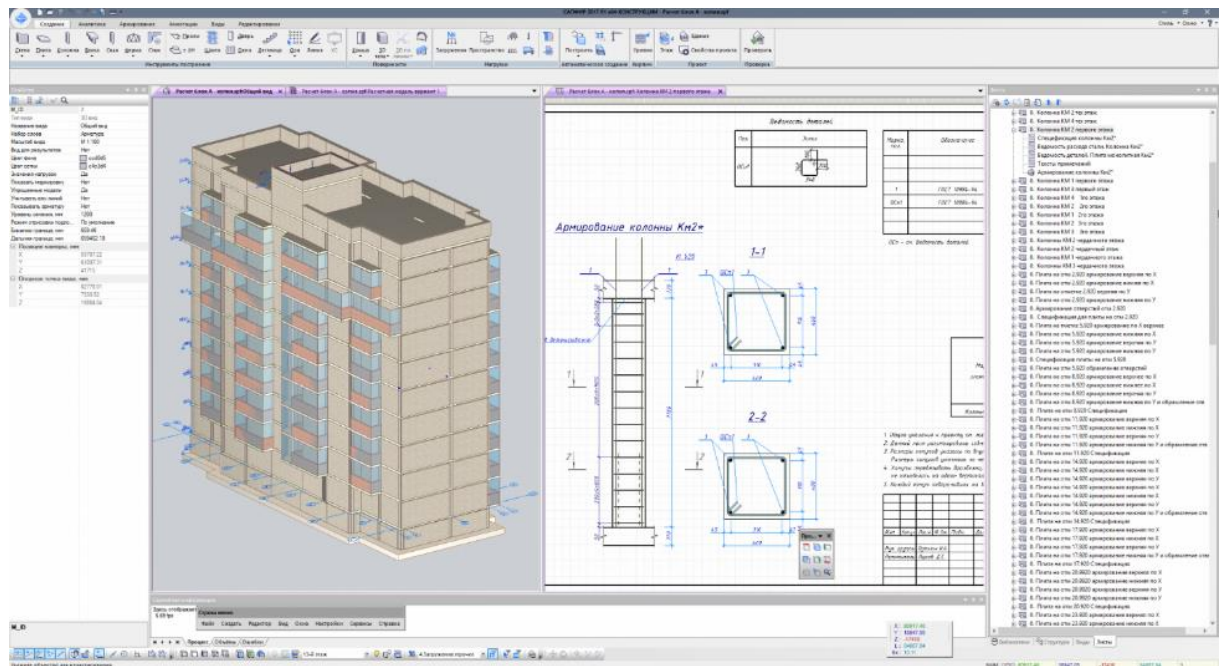


Рисунок 3.31 – Створення креслень в САПФІР за допомогою підсистеми САПФІР-ЗБК

Розглянута технологія забезпечує реалізацію в максимально автоматизованому режимі циклу *моделювання – розрахунок – конструювання*, що дозволяє ефективно вносити зміни в процесі проектування, формувати нові варіанти проектних рішень, удосконалювати проектні рішення.

В САПФІР реалізовані можливості імпорту 3D і 2D архітектурних моделей, які створені в інших графічних програмах: Allplan, Revit, AutoCAD та ін. Таким чином забезпечується можливість ефективного застосування розглянутої технології на основі застосування інших програм сімейства CAD.

3.6.2 МОНОМАХ-САПР (МОНОМАХ)

МОНОМАХ-САПР призначений для розрахунку і проектування конструкцій будівель з монолітного залізобетону, а також будівель з цегляними стінами. В процесі роботи робиться розрахунок будівлі і його окремих частин з формуванням робочих креслень і схем армування конструктивних елементів.

Комплекс складається з окремих програм – **КОМПУНУВАННЯ, БАЛКА, КОЛОНА, ФУНДАМЕНТ, ПІДПІРНА СТІНА, ПЛИТА, РОЗРІЗ (СТІНА), ЦЕГЛИНА, ГРУНТ**. Ці програми пов'язані інформаційно, крім того, кожна з них може працювати в автономному режимі.

КОМПУНУВАННЯ – програма для проектування багатоповерхових каркасних будівель з монолітного залізобетону, а також будівель з цегляними стінами. Найбільш ефективна робота програмного комплексу **МОНОМАХ-САПР** з формуванням технологічного ланцюжку проектування *моделювання – розрахунок – конструювання* здійснюється завдяки використанню цієї програми у такому порядку:

1) В програмі **КОМПУНУВАННЯ** *формується модель будівлі* з конструктивних елементів: колон, балок, стін, перегородок, плит перекриття, фундаментних плит і паль (рис. 3.32). В процесі формування моделі задаються матеріали конструкцій та

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.X- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 75

навантаження. Вертикальні навантаження задаються у вигляді розподілених по усій площі або по ділянці плити і у вигляді розподілених по лінії і зосереджених сил. Горизонтальні навантаження задаються або в рівні плит перекриттів у вигляді лінійно розподілених і зосереджених сил, або перпендикулярно площини стін у вигляді нерівномірно розподілених по площі сил. Автоматично враховується власна вага конструктивних елементів. Для обліку вітрових і сейсмічних дій задається інформація про район будівництва і напрям дії.

2) Далі за допомогою вбудованого модулю в програмі **КОМПОНУВАННЯ** виконуються *МСЕ розрахунок* (рис. 3.32). При виконанні МСЕ розрахунку автоматично формується звичайно-елементна схема і робиться статичний і динамічний розрахунки, в результаті яких визначаються переміщення у вузлах, зусилля і напруга в кінцевих елементах, сумарні навантаження для стін і колон в заданих завантаженнях, формується таблиця частот і періодів коливань. Анімація власних коливань дає додаткову інформацію для аналізу моделі. Сформована автоматично скінченно-елементна модель (СЕМ) може бути експортована в ПК «ЛІРА-САПР».

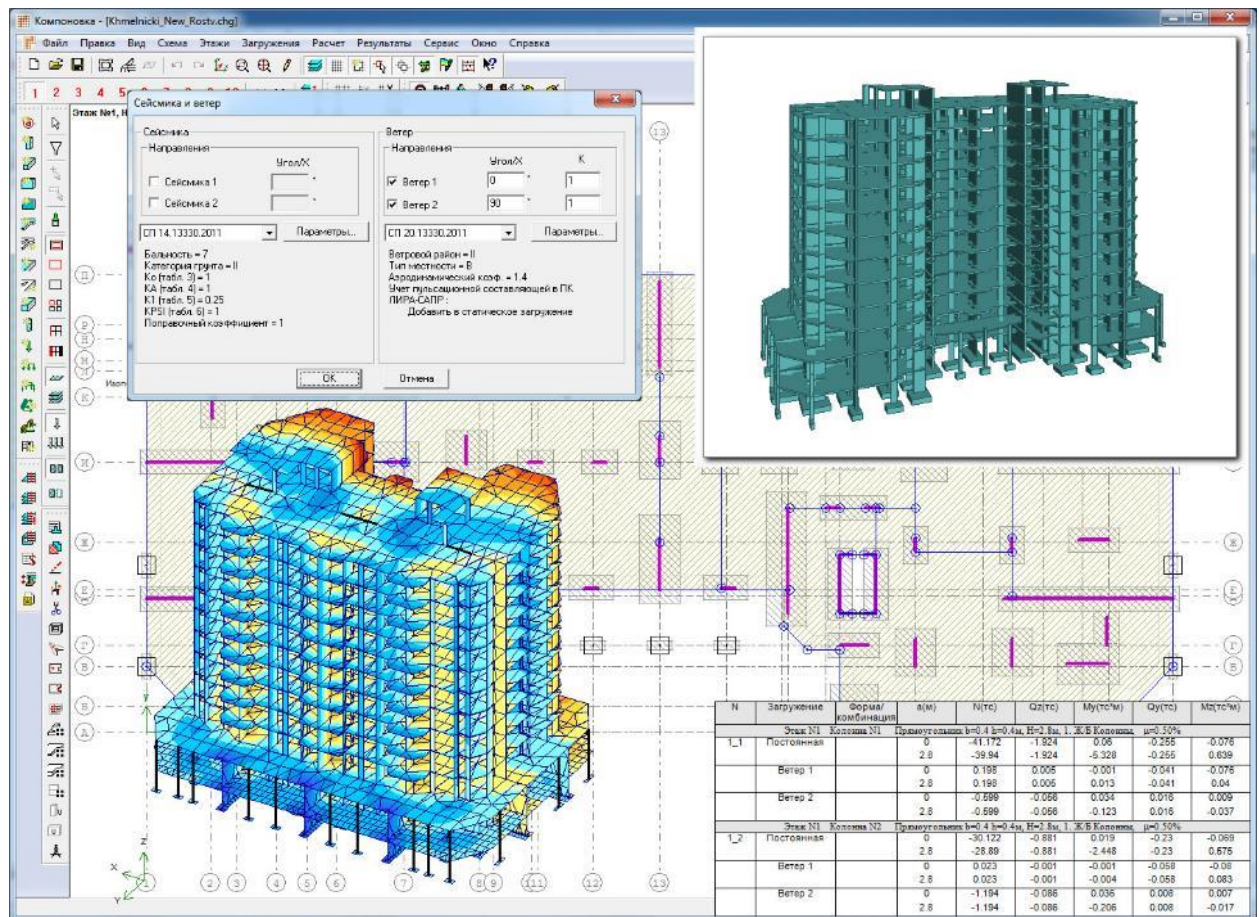


Рисунок 3.32 – Формування 3D моделі будівлі (МСЕ модель формується автоматично)

3) Результати МСЕ розрахунку експортуються в програми конструювання БАЛКА, КОЛОНА, ФУНДАМЕНТ, ПЛИТА, РОЗРІЗ (СТІНА), ЦЕГЛИНА. В кожній з цих програм виконуються конструкторські розрахунки та здійснюється попереднє конструювання з видачею креслень елементів конструкцій.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 76

Цикл проектування на 3-х етапах виконується декілька раз з поступовим уточненням конструктивних рішень. За результатами розрахунків на кожному циклі виконується аналіз результатів, здійснюється перевірка перерізів конструктивних елементів, формується відомість витрати матеріалів, таблиця вартості будівлі. За результатами перевірки перерізів уточнюються параметри елементів моделі будівлі і здійснюють повторні розрахунки моделі до тих пір поки конструктивні рішення не будуть задовольняти вимоги норм.

Розглянемо можливості проектування конструкцій в конструкторських програмах з комплексу МОНОМАХ-САПР:

- **БАЛКА** – програма для проектування монолітної залізобетонної багатопролітної балки зі змінною висотою перерізу по прольотах (рис. 3.33). Переріз балки прямокутний, враховується наявність полиці. Формування схеми виконується в режимі імпорту і в автономному режимі. Виконується розрахунок балки по першому і другому граничним станам (розрахунок по розкриттю тріщин). Виконується побудова огинаючих епюр переміщень, зусиль. Визначається необхідна площа перерізу арматури. Виконується побудова епюри матеріалів. Балка конструюється зварними каркасами або в'язаною арматурою. Виконується креслення.

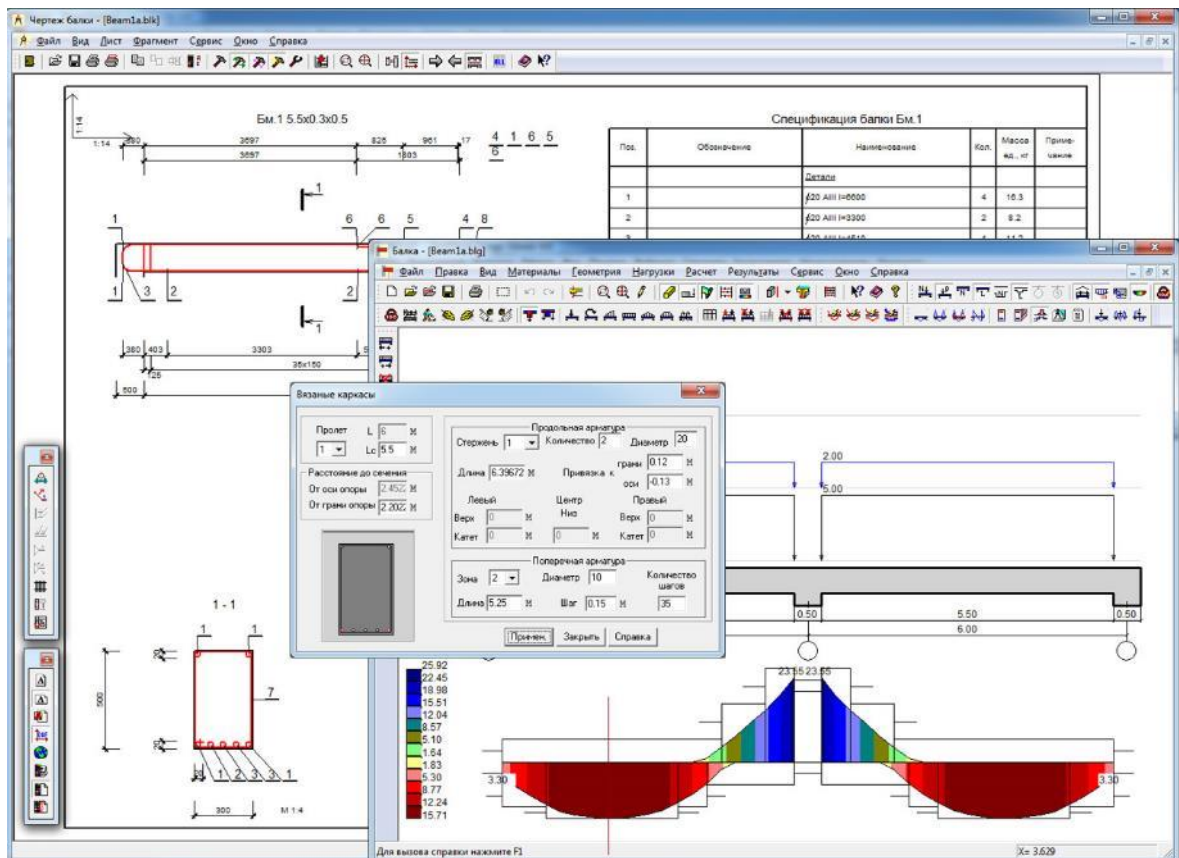


Рисунок 3.33 – Проектування багатопролітної монолітної залізобетонної балки в програмі БАЛКА з комплексу МОНОМАХ-САПР

- **КОЛОНА** – програма для проектування монолітної залізобетонної колони різних форм перерізів: прямокутного, таврового, хрестового, куткового, кільцевого і інших. Формування схеми виконується в режимі імпорту і в автономному режимі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.X- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 77

Виконується розрахунок колони по першому і другому граничним станам (розрахунок по розкриттю тріщин) з визначенням необхідної площі перерізу арматури та видачею результатів конструювання у вигляді автоматичного формування креслення;

- **ФУНДАМЕНТ** – програма для проектування монолітного залізобетонного фундаменту під колону для заданих інженерно-геологічних умов будівництва. Формування схеми виконується в режимі імпорту і в автономному режимі. В програмі виконується розрахунок основи і фундаменту з визначенням необхідної площі перерізу арматури та результатів конструювання у вигляді автоматичного формування креслення;

- **ПІДПІРНА СТІНА** – автономна програма для проектування монолітної залізобетонної кутникової підпірної стіни для заданих інженерно-геологічних умов будівництва. Також виконується перевірка масивної підпірної стіни. Виконується розрахунок по першому і другому граничним станам (розрахунок по розкриттю тріщин). Визначається необхідна площа перерізу арматури з формуванням результатів конструювання у вигляді креслення.

- **ПЛИТА** – програма для проектування монолітної залізобетонної плити перекриття, а також фундаментної плити на природній основі або на пальному полі (рис. 3.34).

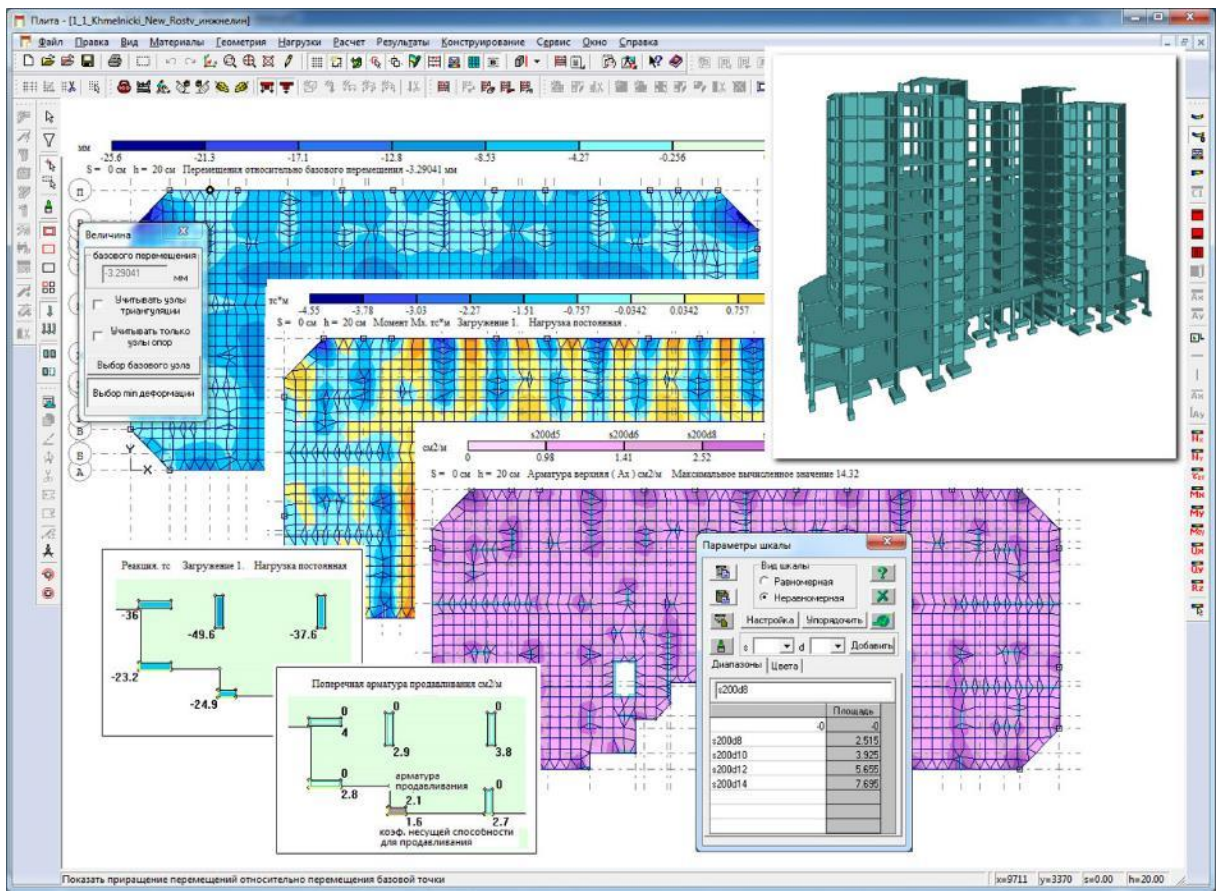


Рисунок 3.34 – Проектування монолітної залізобетонної плити в програмі ПЛИТА з комплексу МОНОМАХ-САПР

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 78

Контур плити може мати довільний контур, враховується змінна товщина плити і наявність отворів. Розрахунок плити виконується спільно з балочними конструкціями. Враховується податливість опор. Для фундаментної плити передбачено завдання ділянок з різними характеристиками ґрунту. Формування схеми виконується в режимі імпорту і в автономному режимі. За результатами розрахунку виконується побудова полів переміщень і зусиль, а для заданого відрізка – побудова епюр. Виконується побудова полів напруги під подошвою фундаментної плити або побудова мозаїки зусиль в палях. У випадку автономної роботи виконується експорт розрахункової схеми в ПК «ЛІРА-САПР» для МСЕ розрахунку. В програмі розрахунок перерізів плити виконується по першому і другому граничним станам (розрахунок по розкриттю тріщин) з визначенням необхідної площі перерізу арматури, побудовою полів розрахункового армування та конструювання плити з армуванням зварними сітками або стержнями. За результатами конструювання автоматично формується креслення.

- **РОЗРІЗ (СТІНА)** – в програмі проектується монолітна залізобетонна стіна довільного контуру спільно з примикаючими рамними конструкціями. Враховується змінна товщина стіни і наявність отворів. Формування схеми виконується в режимі імпорту і в автономному режимі. За результатами розрахунку формується зображення деформованої схеми. Виконується побудова полів переміщень і напруги для елементів стін, епюр розрахункових зусиль для стержневих елементів. Виконується експорт даних в програми конструювання БАЛКА і КОЛОНА. Виконується експорт розрахункової схеми в ПК «ЛІРА-САПР». Виконується розрахунок стіни по першому і другому граничним станам (розрахунок по розкриттю тріщин). Визначається необхідна площа перерізу арматури, виконується побудова полів розрахункового армування. Стіна конструюється сітками і стержнями. Виконується креслення.

- **ЦЕГЛИНА** – в програмі виконується розрахунок загальної схеми будівлі з урахуванням спільної роботи цегляних стін і залізобетонних включень (залізобетонні пояси, залізобетонні обойми, конструкції залізобетонних ліфтових шахт, колон, пілонів та ін.). Враховується позацентрове опираювання перекриттів на цегляні стіни. Для заданих рівнів цегляних стін виконується розрахунок окремих ділянок і у разі потреби армування, визначається кількість рядів кладки через які встановлюються сітки і формуються відповідні креслення.

- **ГРУНТ** – в програмі формується просторова модель ґрунтової основи за заданими інженерно-геологічними умовами майданчика будівництва (рис. 3.35). Для опису майданчика будівництва задається база характеристик шарів ґрунту (ІГЕ), вказується розташування і відмітки гирла свердловин, шари ґрунту для свердловин. Для довільних штампів навантажень від проєктованих або існуючих будівель визначається поле осідань; по декількох методиках виконується розрахунок і визначення жорсткості ґрунтової основи (коефіцієнтів постелі). Обчислені по області фундаментної плити коефіцієнти постелі експортуються в програми КОМПОНУВАННЯ і ПЛИТА, де використовується при розрахунку фундаментів і фундаментних плит.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 79

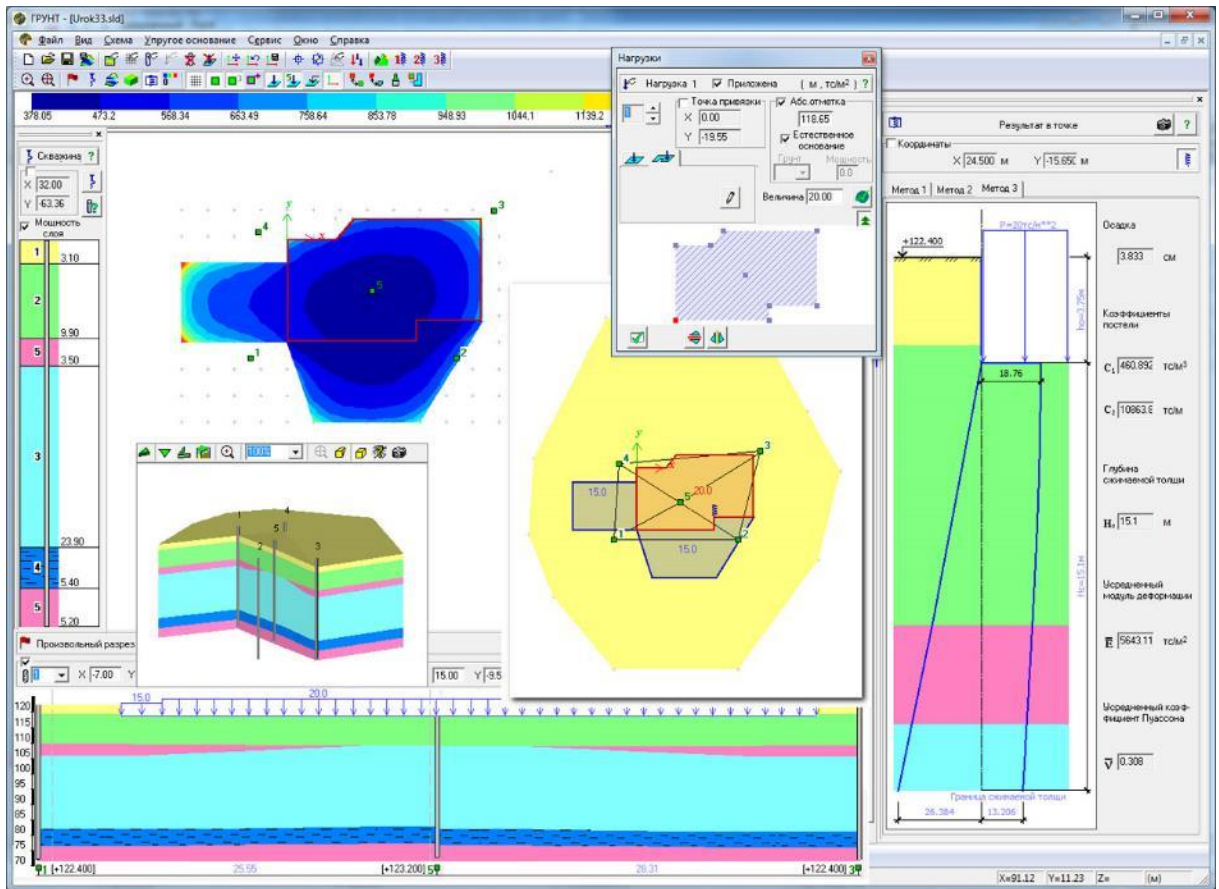


Рисунок 3.35 – Моделювання ґрунтової основи в програмі ГРУНТ з комплексу МОНОМАХ-САПР

Запитання для самоконтролю

1. Назвіть основні етапи розробки комп'ютерної розрахункової моделі об'єкта.
2. Для чого на вашу думку потрібна ідеалізація об'єкта під час створення розрахункової моделі?
3. Як ви розумієте термін геометричне моделювання?
4. Назвіть та опишіть основні типи опорних закріплень.
5. Опишіть у чому полягає ідеалізація матеріалу елементів конструкцій.
6. З яких функціональних елементів складається стрічковий інтерфейс ПК «ЛІРА-САПР»?
7. Для чого виконується налаштування каталогів розташування файлів в ПК «ЛІРА-САПР»?
8. Опишіть докладно ознаки схеми в ПК «ЛІРА-САПР».
9. Наведіть критерії вибору ознаки схеми.
10. Опишіть принципову схему організації роботи з використанням САПФІР.
11. Опишіть принципову схему організації роботи з використанням комплексу МОНОМАХ-САПР.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 122 / 80</i>

Список використаних джерел

1. MacLeod I.A. A strategy for the use of computers in structural engineering. The structural Engineering, 1995. Vol. 73, №21. P. 13-21.
2. Основи комп'ютерного моделювання: Навчальний посібник / М.С. Барабаш, П.М. Кір'язєв, О.І. Лапенко, М.А. Ромашкіна. Київ: Книжкове видавництво НАУ, 2018. 492 с.
3. Програмне забезпечення інженерних розрахунків: конспект лекцій для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» всіх форм навчання / Укладач: Сорочак А.П. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. 128 с.
4. LIRALAND Group, 2002 – 2024: Офіційний веб-сайт компанії-розробника ПК «ЛІРА-САПР». URL: <https://www.liraland.ua>.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 81

Тема 4. Основи побудови скінчено-елементних моделей в ПК «ЛІРА-САПР»

1. Системи координат: глобальна, місцева, локальна та спеціальна.
2. Моделювання шарнірів у стержневих і площинних елементах.
3. Бібліотека кінцевих елементів, їх особливості та область використання.
4. Створення розрахункових схем конструкцій та споруд шляхом використання регулярностей та готових шаблонів.
5. Створення розрахункових моделей без використання шаблонів: визначення типів елементів, опорних в'язей, шарнірів, жорсткостей, прикладання навантажень, виконання розрахунку зусиль.
6. Закріплення прийомів створення розрахункових моделей засобами ПК «ЛІРА-САПР» на прикладах (однопролітна балка, ферма, арка тощо).

4.1 Системи координат: глобальна, місцева, локальна та спеціальна.

Сучасні програмні комплекси надають користувачеві можливість використання набору різних систем координат. Можна виділити три основні види систем координат (рис. 4.1):

Глобальна (X, Y, Z) – це система координат, відносно якої визначаються значення параметрів, що характеризують комп'ютерну модель: координати вузлів, визначення напрямків ступенів вільності, орієнтація шарнірів, вузлові переміщення, в'язі, місцеві і вузлові навантаження, напруження тощо. В програмі за умовчуванням прийнята декартова система координат.

Місцева система координат (X_1, Y_1, Z_1) – це система координат, яка встановлюється в межах окремих скінчених елементів. Відносно неї можуть задаватися параметри жорсткостей, навантаження, що діє по області скінченного елемента, обчислюються зусилля та напруження, ведеться розрахунок армування. Місцева система координат елемента пов'язана з головними осями елемента. Для стержневих елементів осі місцевої системи координат співпадають з головними осями. Також ось X_1 направлена від 1-го за порядковим номером вузла до другого.

Локальна система координат (X_2, Y_2, Z_2), яка може встановлюватися в програмному комплексі для вузлів. Ця система вводиться найчастіше в таких випадках, коли використовується циліндрична, сферична або тороїдальна системи координат. У таких випадках напрямки дії навантажень або в'язів у вузлах не збігаються з напрямками глобальних осей, тому може бути зручним введення для таких вузлів локальних систем координат.

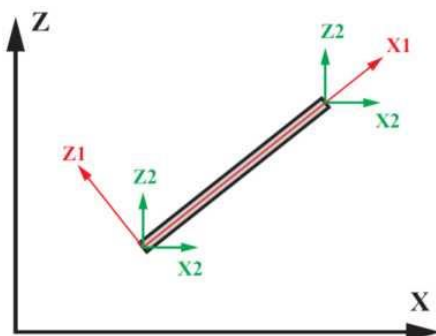


Рисунок 4.1 – Системи координат стержневого СЕ

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 82

4.2 Бібліотека кінцевих елементів, їх особливості та область використання.

Можливості моделювання будівельних об'єктів забезпечуються та реалізуються в програмному комплексі через наявність різноманітних типів скінченних елементів в бібліотеці програмного комплексу. Тому основою програмних комплексів, які реалізують МСЕ, є бібліотека скінченних елементів (БСЕ).

Основна вимога до бібліотеки скінченних елементів – це її відкритість, тобто можливість поповнювати її новими процедурами. По суті, саме БСЕ надає програмним комплексам, що реалізують метод скінченних елементів (МСЕ), властивість універсальності і гнучкості, оскільки, поповнивши БСЕ новими СЕ, можна розширити клас вирішуваних завдань, практично залишаючи без змін основну структуру комплексу.

Також необхідною вимогою до БСЕ є її прозорість, тобто для кожного типу СЕ мають бути описані базисні функції, типи вузлових невідомих і приведені величини порядку збіжності. Це може виявитися дуже корисним при складанні складних комбінованих скінченно-елементних моделей і оцінці отриманого наближеного розв'язку.

Кожен тип скінченних елементів характеризується наступними властивостями:

- *розмірністю* використовуваного простору (одновимірний, двовимірний, тривимірний);
- *геометричною формою*, яка найчастіше є однієї з простих геометричних фігур (відрізок прямої, трикутник, прямокутник, чотирикутник, тетраedr і т.п.);
- *набором вузлів*, що розташовуються (як правило) на лініях (поверхнях) розділу елементів і є загальними для елементів, що граничать один з одним;
- *набором використовуваних зовнішніх і внутрішніх ступенів вільності*, віднесених найчастіше до вузлів (хоча і не обов'язково до вузлів) – переміщення, повороти і т.п.;
- *системою апроксимуючих функцій*, що визначають усередині області СЕ наближені вирази для компонент переміщень, і їх зв'язком з ступенями вільності СЕ;
- *фізичним законом*, що зв'язує напруження і деформації;
- *визначенням енергетичного простору*, для моделювання елементів якого призначені СЕ даного типу. Це визначення енергетичного простору еквівалентно посиланню на клас задач, до яких застосовуються СЕ даного типу (СЕ пластини плоского напруженого стану, СЕ плити на пружній основі, СЕ стержнів для просторових задач тощо);
- *переліком обмежень і рекомендацій щодо використання*.

Бібліотека скінченних елементів ПК ЛІРА-САПР містить елементи, що моделюють роботу різних типів конструкцій:

Елементи стержнів (СЕ № 1-5, 10). Це широкий набір одновимірних скінченних елементів, що володіють наступними властивостями:

- довільний переріз, постійний або змінний по довжині стержня;
- довільне місцеве навантаження;
- примикання до вузлів за допомогою абсолютно жорстких вставок або шарнірів;
- можливість врахування зсуву;
- можливість моделювання різних класів задач.

Елементи плоскої задачі – товсті та тонкі пластини для моделювання балок-стінок, тонких плит, пологих оболонок (СЕ № 11, 12, 21- 24, 27, 30, 41, 42, 44). Це набір

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 83

двовимірних скінченних елементів, що мають форму трикутника, прямокутника, опуклого чотирикутника і володіють наступними властивостями:

- можливість врахування анізотропних, ортотропних та ізотропних властивостей матеріалу;
- можливість моделювання багатошарових конструкцій;
- можливість моделювання різних класів конструкцій: балки-стілки, плити, що працюють на згин, у тому числі і на пружній основі, оболонки;
- довільне місцеве навантаження на всій або на частині області СЕ.

Елементи просторової задачі – об’ємні елементи для моделювання масивних тіл (СЕ № 31-34, 36). Це набір тривимірних скінченних елементів у вигляді паралелепіпеда, тетраедра, чотирикутної і трикутної призми, випуклих шестикутного і восьмикутного елементів, що володіють наступними властивостями:

- можливість врахування анізотропних властивостей матеріалу;
- довільне навантаження на всій або на частині області СЕ.

СЕ для нелінійних задач (СЕ № 200-500). Їх набір і властивості аналогічні скінченним елементам для лінійно деформівних систем, крім того ці скінченні елементи повинні допускати можливість задання довільних законів деформації (залежності між напруженнями і деформаціями). Важливою властивістю таких скінченних елементів є можливість моделювання біматеріалів (типу залізобетону) із заданням двох різних законів деформування, а також можливістю моделювати властивості ґрунту. Важливою вимогою до БСЕ є наявність скінченних елементів (особливо стержнів і пластин), що одночасно враховують фізичну і геометричну нелінійність.

Спеціальні елементи (СЕ № 51, 53-55). Деякі з цих елементів можна умовно віднести до скінченних елементів, оскільки вони не володіють власне атрибутами СЕ (базисні функції, область скінченного елемента тощо). Проте з точки зору реалізації вони природно вписуються в скінченно-елементну процедуру і значно розширюють інструментарій для побудови скінченно-елементних моделей. До таких елементів можна віднести: елементи, що моделюють податливий зв’язок між вузлами; законтурні елементи пружної основи; односторонні в’язі; елемент, що моделює попереднє напруження (форкопф); елемент, що моделює абсолютно жорстке тіло (АЖТ) та багато інших.

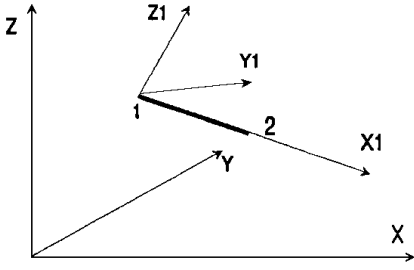
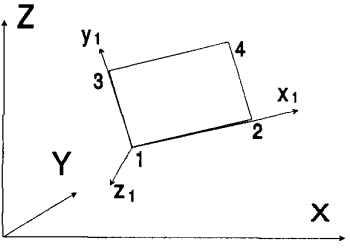
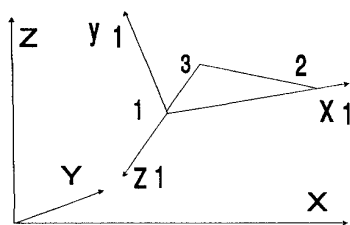
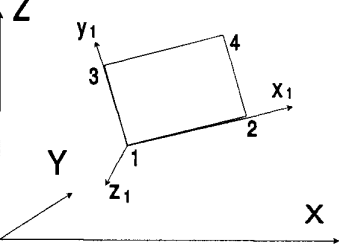
Елемент «абсолютно тверде тіло» може виявитися дуже корисним для моделювання, наприклад, такого поширеного класу конструкцій, як безригельне перекриття, що спирається на колони з різним перерізом. У цьому випадку тіло колони в ділянці плити моделюється цим елементом із провідним вузлом, що відповідає центру ваги перерізу колони, і веденими вузлами, що відповідають вузлам контуру перерізу колони.

Необхідною вимогою до БСЕ є її «прозорість», тобто для кожного СЕ мають бути описані базисні функції, типи вузлових невідомих і зведені величини порядку збіжності. Це може виявитися дуже корисним для користувача під час складання складних комбінованих скінченно-елементних моделей та оцінювання отриманого наближеного розв’язку.

В таблиці 4.1 наведені вибірково описані можливості скінченних елементів для розв’язання просторових задач загального вигляду. Більш детально з БСЕ та можливостями використання скінченних елементів можна ознайомитися в довідковій інформації програмного комплексу.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 84

Таблиця 4.1 – Характеристики найбільш розповсюджених скінченних елементів для створення просторових розрахункових схем загального вигляду (ознака схеми 5)

№ типа елем.	Найменування	Розташування в просторі	Ступені свободи	Призначення
10	Універсальний стержень 	довільно	X,Y,Z, UX,UY,UZ	1. Використовується для одної, двох- та трьохвимірних задач. 2. Допускається наявність пружної основи.
41	Універсальний прямокутний елемент оболонки 	довільно	X,Y,Z UX,UY,UZ	1. Допускається наявність пружної основи. 2. Враховуються властивості матеріалу: – ізотропія; – трансверсальна ізотропія; – ортотропія; – анізотропія.
42	Універсальний трикутний елемент оболонки 	довільно	X,Y,Z UX,UY,UZ	- “ -
44	Універсальний чотирикутний елемент оболонки 	довільно	X,Y,Z UX,UY,UZ	- “ -

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 85

4.3 Створення геометричної моделі об'єкту

Створення геометричної моделі в ПК «ЛІРА-САПР може бути виконано двома способами (або їх комбінацією):

- використанням **регулярних фрагментів** (програмних шаблонів) зі створення геометрії розрахункової схеми;
- **послідовним введенням вузлів та створення по цих вузлам елементів** розрахункової схеми.

4.3.1 Використання регулярних фрагментів та шаблонів

Для створення розрахункової схеми цим способом необхідно скористатися операціями, які містяться на вкладці стрічки «Створення та редагування» в складі панелі «Створення» (рис. 4.2):

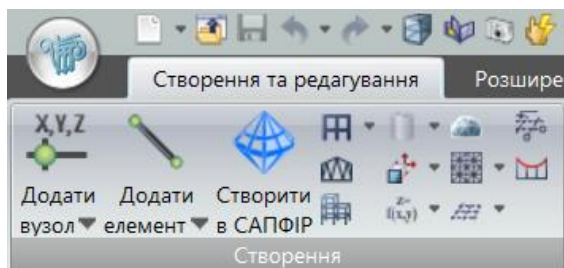


Рисунок 4.2 – Панель Створення на вкладці «Створення та редагування»

Створити в САПФІР – застосування цього інструменту включає такі операції: виділення та експорт частини схеми в САПФІР для створення на її базі довільного фрагмента, що містить стержневі й пластинчасті елементи; створення довільного фрагмента в САПФІР та передача його в ПК «ЛІРА-САПР»;

Генерація регулярних фрагментів і сіток (рис. 4.3) – розкритий список із заміною, що містить операції (шаблони) для задання регулярних фрагментів – рам, ростверків, балок-стінок, плит та плоских оболонки;

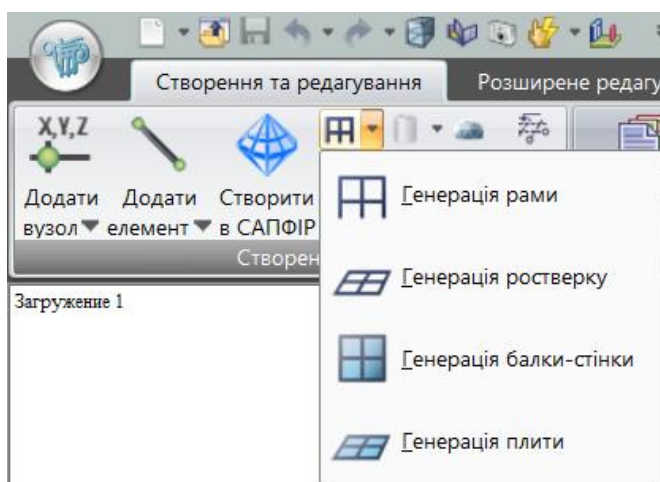



Рисунок 4.3 – Розкритий список Генерація регулярних фрагментів та сіток

Генерація ферм – виклик діалогового вікна для вибору необхідної конфігурації ферми за обрисами поясів, на зразок решітки ферми і задання необхідних параметрів;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 86

Генерація просторових рам  – виклик діалогового вікна для створення фрагментів просторових рам;

Поверхні обертання  (рис. 4.4) – розкритий список із заміною, що містить операції з генерації стрижневих або пластинчастих поверхонь обертання, а також операції зі створення об'єктів, заданих переміщенням або обертанням твірної (циліндр, конус, сфера, тор);

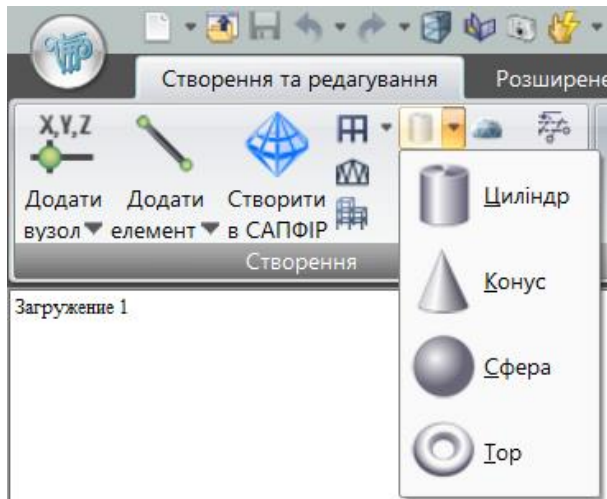




Рисунок 4.4 – Розкритий список Поверхні обертання

Переміщення  – розкритий список із заміною, що містить операції з генерації просторової схеми за допомогою переміщення або обертання твірної;

Створення поверхонь – розкритий список із заміною, що містить операції зі створення поверхонь $Z=f(x,y)$ і складчастих параболоїдів обертання.

Геодезичний купол  – виклик діалогового вікна для створення геодезичних куполів і їх елементів;

Створення і триангуляція контурів  (рис. 4.5) – розкритий список із заміною, що містить операції зі створення плоских фрагментів схем і триангуляції цих фрагментів.

Ланцюгова лінія  – виклик діалогового вікна для автоматичного задання ниток і вант.

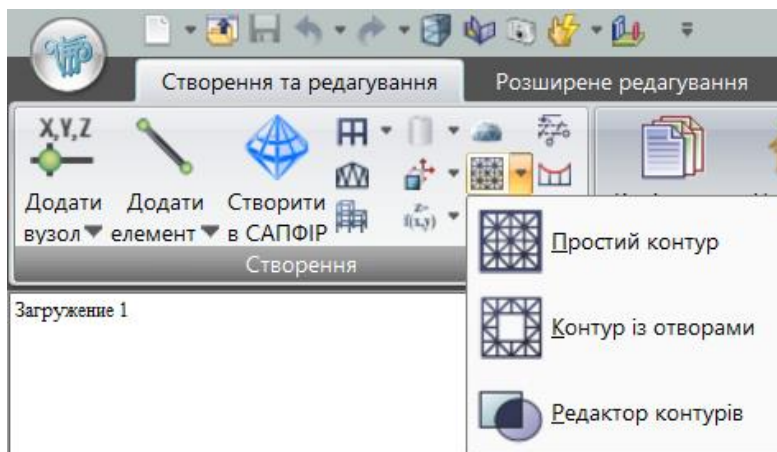


Рисунок 4.5 – Розкритий список Створення і триангуляція контурів

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 87

4.3.2 Введення вузлів та створення по вузлам елементів розрахункової схеми


У цьому способі кожен стержневий елемент розрахункової схеми вводиться окремо. Перед виконанням цієї операції рекомендується спочатку зобразити на папері вигляд розрахункової схеми або її частини з попереднім позначенням номерів вузлів та елементів. Потім необхідно вибрати вузол, який міститиме початок загальної системи осей координат, і зобразити напрямок координатних осей. Після цього можна почати процедуру введення вузлів за їх координатами в загальній системі координат.

Для складних схем розглянутий підхід слід застосовувати декілька раз завдяки поступовій побудові простих схем в складі загальної схеми.

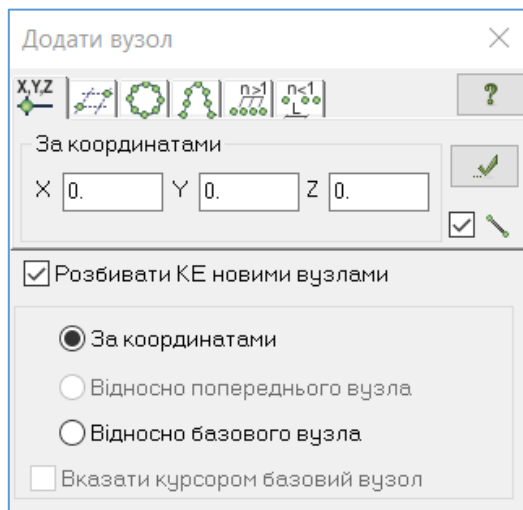
Введення вузлів. Для введення вузлів слід використовувати інструмент **Додати вузол**



(рис. 4.6), який розташований у вигляді кнопки розділення на панелі **Створення** вкладки «**Створення і редагування**» (рис. 4.6 б). Для введення вузлів за

координатами слід використовувати команду **За координатами** . За умовчужанням ця команда знаходиться на кнопці розділення інструменту **Додати вузол**. Далі відкриється діалогове вікно для введення вузлів (рис. 4.6 а). Також дану команду можна вибрати із розкритого списку кнопки розділення натиснувши рядок «за координатами» (рис. 4.6 б).

а



б

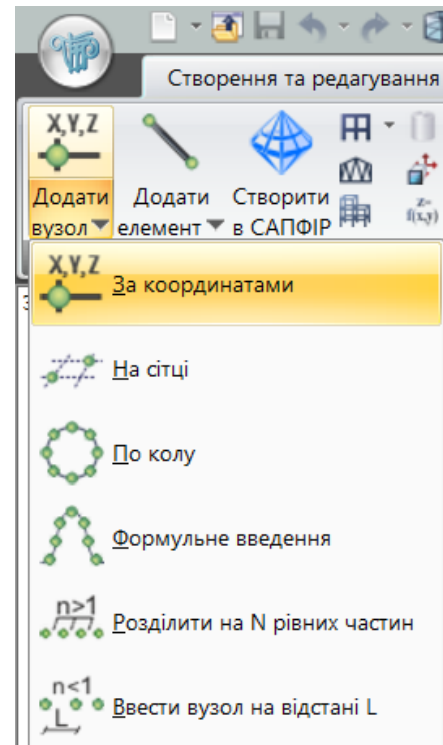





Рисунок 4.6 – Виклик команди «Додати вузол за координатами»:

- а – через діалогове вікно інструменту **Додати вузол**;
- б – виклик через розкритий список інструменту **Додати вузол**

Далі у діалоговому вікні, як правило, вводять перший вузол із нульовими координатами, натискаючи кнопку  **Застосувати**. У результаті в полі вікна для зображення розрахункової схеми з'явиться зображення вузла.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 88

Для легшої орієнтації у схемі виведемо на робочий екран номери вузлів. Увімкнення/вимкнення інформації, зображуваної безпосередньо на схемі, а також установки опцій відображення схеми здійснюється через діалог **Показати** натисканням кнопки  **Параметри відображення** на панелі інструментів **Панель вибору** (рис. 4.7) (за замовчуванням міститься в нижній ділянці робочого вікна). У діалоговому вікні **Показати** перейдіть на другу закладку **Вузли** та встановіть прапорець **Номери вузлів**. Натисніть кнопку  **Перемалювати**.

Далі у відповідності до попередньо призначених номерів вузлів вводяться інші вузли.

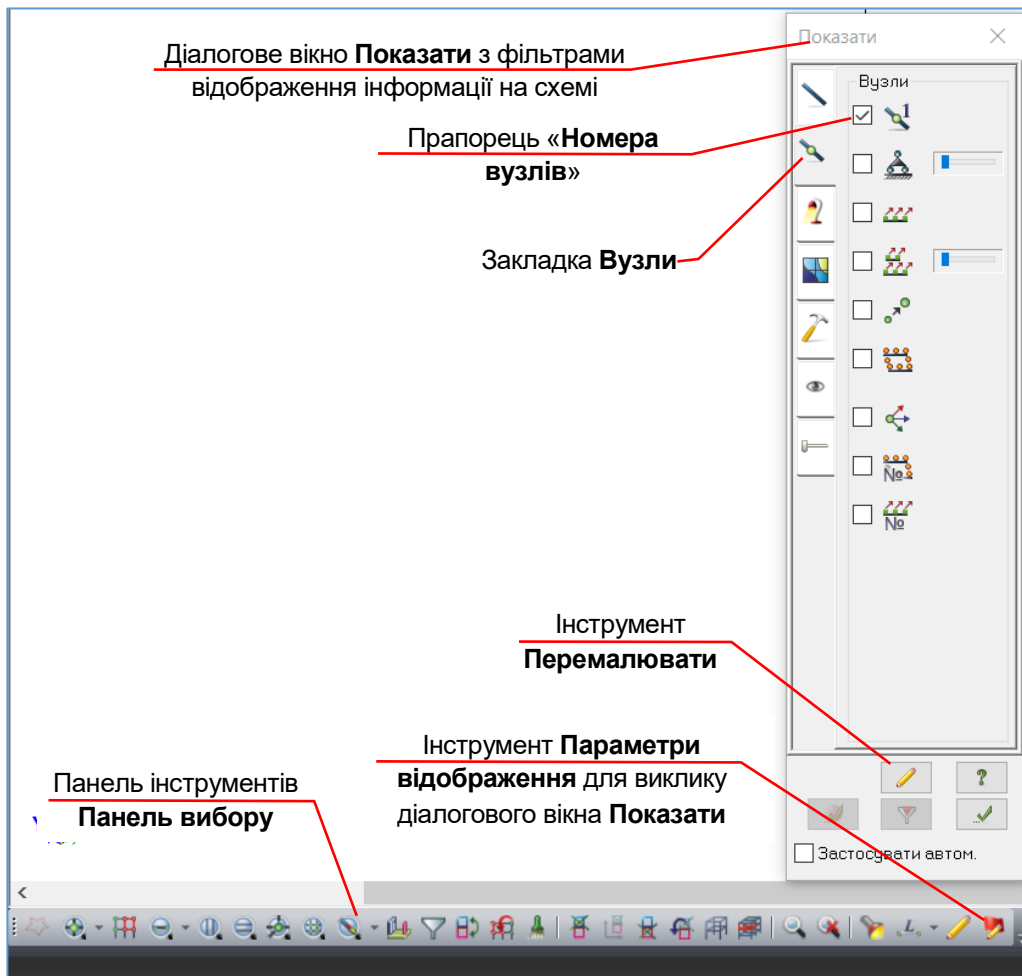



Рисунок 4.7 – Виклик діалогового вікна **Показати** з фільтрами відображення інформації на схемі завдяки інструменту **Параметри відображення** на **Панелі вибору**

Діалогове вікно **Додати вузол** та інструменти в розривному списку кнопки **Додати вузол** також надають можливості задання вузлів (рис. 4.6 б): **на сітці**, **по колу**, **за формулою** (задання вузлів за допомогою функції однієї змінної), **розподілом на N однакових частин**, **введенням проміжного вузла між наявними вузлами**.

Введення елементів. Введення стержневого елемента – це з'єднання відрізком прямої лінії його кінцевих вузлів. Для цього необхідно обрати інструмент **Додати**

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 89

 **елемент**, який розташований у вигляді кнопки розділення на панелі **Створення** вкладки стрічкового інтерфейсу «**Створення та редагування**» (рис. 4.8 б). Для додавання елемента стержня слід використовувати команду **Додати стержень**. За умовчуванням ця команда знаходиться на кнопці розділення інструменту **Додати елемент**. Далі відкриється діалогове вікно для додавання стержнів (рис. 4.8 а). Також цю команду можна обрати із розкритого списку інструменту (рис. 4.8 б).

а

б

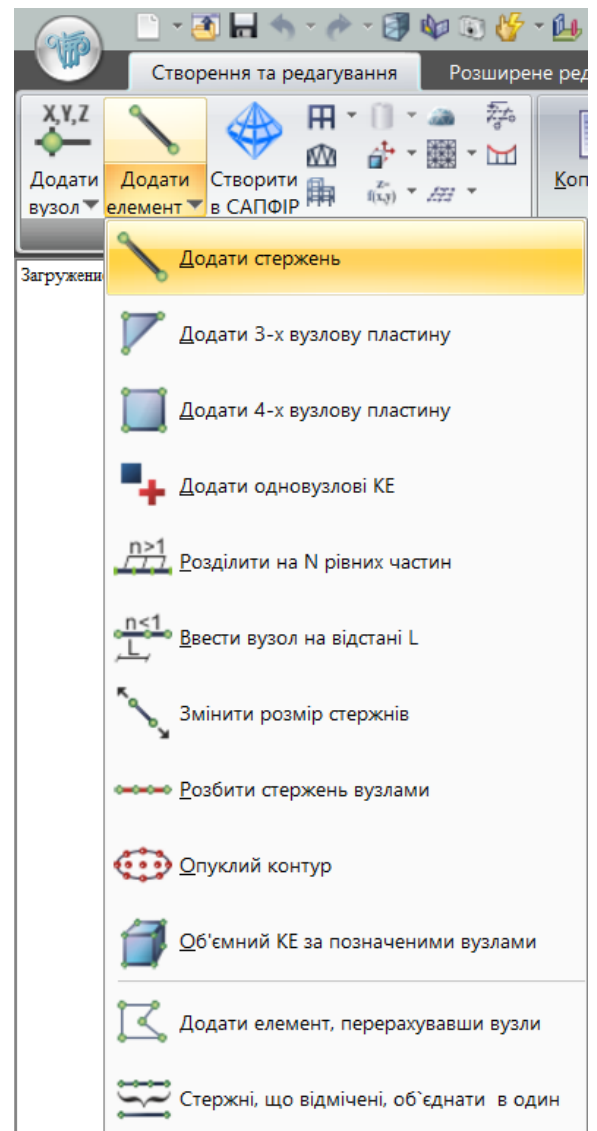
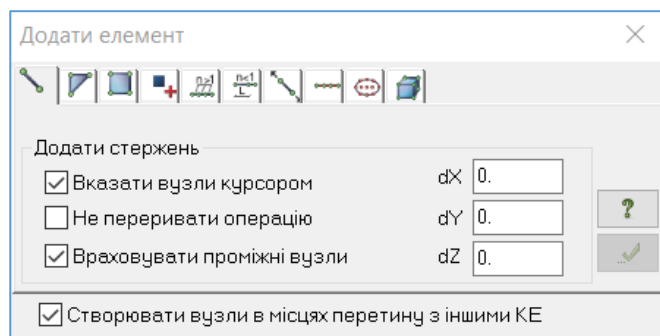



Рисунок 4.8 – Виклик команди «**Додати стержень**»:

а – через діалогове вікно інструменту **Додати елемент**;

б – виклик через розкритий список інструменту **Додати елемент**

Після вибору команди підведіть курсор до вузла 1, натисніть лівою кнопкою миші. Далі проведіть лінію до вузла 2, і знову клацніть лівою кнопкою миші. Якщо при цьому в діалозі **Показати** (див. рис. 4.7) встановлений прапорець **Номери елементів** (закладка **Елементи**), то з'явиться номер введеного елемента.

Щоб вивести на екран місцеві осі стержнів, установіть відповідний прапорець у діалоговому вікні **Показати** (вкладка **Елементи**). Потім натисніть кнопку  **Перемалювати**. Напрямок осі X1 буде збігатися з напрямком рисування осі елемента.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 90

Бажано також усі горизонтальні стержневі елементи рисувати зліва направо, а вертикальні – знизу вгору.

Діалогове вікно **Додати елемент** також дає можливість задання таких елементів (рис. 4.8 б): стержнів (поділом на дві частини в заданому співвідношенні або на N однакових частин), трьохвузлових пластин, чотирьохвузлових пластин, спеціальних однувузлових елементів, об'ємних елементів.

4.4 Вибір компонентів розрахункової схеми

Щоб виконати будь-яку команду над вузлами та елементами (надалі – об'єкти) розрахункової схеми (відмітка, призначення жорсткості, задання навантажень тощо), потрібно попередньо вказати на відповідні об'єкти завдяки виділенню їх із загальної схеми.

Операцію виділення об'єктів схеми називатимемо вибором або відміткою.

Команди, що стосуються компонентів розрахункової схеми, виконуються в такій послідовності:

- відмічаються потрібні об'єкти (елементи, вузли);
- вводиться команда відповідної операції.

Програмний комплекс «ЛІРА-САПР» має великий набір команд вибору. Ці команди, а також операції з відображення фрагмента розрахункової схеми на екрані через фрагментацію схеми або її збільшення містяться на панелі інструментів **Вибір** (див. рис. 4.7, 4.9). За умовчування ця панель розташована в нижній частині вікна програми (див. рис. 4.7).

Початок панелі



Продовження панелі









Рисунок 4.9 – Панель інструментів **Вибір**

Панель інструментів **Вибір** (рис. 4.9), як всі панелі керування ПК «ЛІРА-САПР», може видозмінюватися залежно від доданих або видалених користувачем команд.

Активізуючи команди вибору, об'єкт можна відмітити кількома способами:

1) *Автоматичне виділення об'єкта при активізації команд:* **Відмітити вузли, що збігаються; Відмітити вузли, що належать відміченим елементам; Відмітити елементи, що збігаються; Відмітити елементи, що примикають до відмічених вузлів; Попередня відмітка; Інверсія вибору;**

2) *Одноразове клацання лівою кнопкою миші на об'єктах з увімкненою командою вибору:* **Відмітка вузлів** ; **Відмітка елементів** ; **Відмітка вертикальних стержнів** ; **відмітка горизонтальних стержнів** ; **Відмітка конструктивного елемента; Відмітка уніфікованої групи елементів ; Відмітка уніфікованої групи SE; Відмітка вузлів, що збігаються** ; **Відмітка блока**  тощо.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 91

Якщо в ділянку курсора потрапляють кілька об'єктів, користувачеві надається діалогове вікно вибору «**Вибір елемента**»/«**Вибір вузла**» (рис. 4.10), що пропонує користувачеві уточнити, який з об'єктів, що сходяться в зазначеній точці, слід відмітити. Користувач повинен натиснути на потрібний елемент, а потім – на кнопці **Підтвердити**;

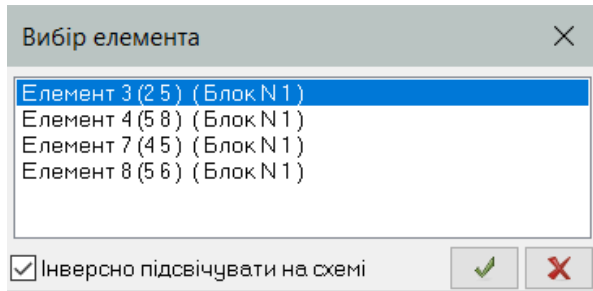



Рисунок 4.10 – Діалогове вікно
Вибір елемента


3) **Відмітка за допомогою рамки**, тобто прямокутної ділянки зі сторонами із суцільних ліній, що виникає на екрані. Команда працює якщо клацнути лівою кнопкою миші в будь-якому місці робочої ділянки і пересунути покажчик із включеними командами: **Відмітка вузлів**; **Відмітка елементів**; **Відмітка вертикальних і горизонтальних стержнів**.


Для виділення об'єктів існують рамки двох типів – звичайна рамка і січна рамка.

Для виділення об'єктів за допомогою звичайної рамки необхідно клацнути лівою кнопкою миші в будь-якому місці робочої ділянки й пересунути покажчик зліва направо, у результаті чого відбудеться відмітка тільки тих об'єктів, які потрапили цілком всередину цієї рамки. При цьому зняти виділення з елемента, не зачіпаючи вибір інших елементів, можна, утримуючи клавішу CTRL. Також можна й додати елемент до вже обраних, утримуючи SHIFT.

Відмітка об'єктів січною рамкою здійснюється аналогічно до вибору простою рамкою, за винятком того, що після клацання мишею покажчик, розтягуючи за собою рамку, повинен переміщатися справа наліво. При цьому для вибору об'єкта необов'язково, щоб він цілком потратив всередину самої рамки. Досить, щоб рамка зачепила хоча б частину об'єкта;

4) **Виділення за допомогою Полігональної відмітки**  з увімкненими командами: **Відмітка вузлів**, **Відмітка елементів**, **Відмітка вертикальних і горизонтальних стержнів**;

5) **За допомогою ПоліФільтра**  – діалогового вікна, призначеного для управління відображенням розрахункової схеми з урахуванням властивостей складових її об'єктів. Це вікно містить усі функції вибору та відмітки однотипних об'єктів схеми, над якими передбачається здійснювати будь-які операції;


6) **За допомогою Конструктивних блоків**  – діалогового вікна для формування й редагування конструктивних блоків. Як конструктивні блоки можна брати довільні фрагменти конструкції, призначені користувачем (колони, балки, стіни, плити, рами, ферми, поверхи тощо);

За допомогою діалогового вікна **Конструктивні блоки** зручно знаходити, відмічати і фрагментувати на розрахунковій схемі окремі елементи будівель і споруд, орієнтуючись за привласненими іменами і марками конструктивних блоків;


Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 92



7) Відмітка всіх елементів і вузлів на розрахунковій схемі командою за допомогою сполучення клавіш *CTRL + A*.

Під час роботи з розрахунковою схемою, коли постійно доводиться відмічати ті чи інші об'єкти, дуже зручною є операція **Попередня відмітка**, яка дає можливість здійснити повернення до останнього виділення вузлів і/або елементів.

Скасування зробленої раніше відмітки вузлів і елементів виконується вказанням на відмічені компоненти вдруге або натискуванням кнопки  – **Скасування вибору або ізорежиму**. Також зняти відмітку можна завдяки натисканню кнопки ESC, якщо фокус введення переведений у робочу зону.

4.5 Виведення інформації про компоненти розрахункової схеми

Інформацію про вузол або елемент можна вивести на екран завдяки використанню інструмента  **Інформація про вузол або елемент**, яка розташована на панелі **Вибір** (див. рис. 4.9). Команда дає можливість не тільки миттєво отримати повну інформацію про всі об'єкти моделі, але й коригувати їх параметри.

Для виведення інформації слід натиснути на кнопку  **Інформація про вузол або елемент** та вказати курсором на будь-який елемент або вузол. Після цього з'явиться діалогове вікно з інформацією про об'єкт моделі (рис. 4.11). Команда буде активною доти, доки користувач не скасує її клацанням миші по кнопці  **Інформація про вузол або елемент** або доки не активує інший режим на панелі інструментів **Панель вибору**. Це означає, що можна отримали кількість інформації, викликавши клацанням миші переходячи від одного вугла (або стержня) до іншого.

Діалогове вікно надає повну інформацію про компоненти моделі щодо елемента або вузла (див. рис. 4.11). Залежно від режиму (створення розрахункової схеми, результати розрахунку, залізобетонні і сталеві конструкції) діалогове вікно **Інформація про елемент** містить різну інформацію.

Діалогове вікно **Інформація про елемент** у режимі створення розрахункової схеми містить: номер елемента; номери його вузлів на схемі; покажчик відмітки елемента на схемі; номер блока, до якого входить розглядуваний елемент; тип жорсткості; бібліотечний тип скінченного елемента; кількість перерізів (для стержня), у яких обчислюються зусилля або кут узгодження місцевих осей для пластин і об'ємних СЕ; кут повороту осей ортотропії (для пластин і об'ємних СЕ); довжина (площа, обсяг) і координати центру ваги елемента в глобальній системі координат; скролінг номерів завантажень.

У режимі результатів розрахунку: номер елемента; номери його вузлів на схемі; покажчик відмітки елемента на схемі; номер блока, до якого входить розглядуваний елемент; тип жорсткості; бібліотечний тип скінченного елемента; кількість перерізів (для стержня), у яких обчислюються зусилля або кут узгодження місцевих осей для пластин і об'ємних СЕ; кут повороту осей ортотропії (для пластин і об'ємних СЕ); довжина (площа, обсяг) і координати центра ваги елемента в глобальній системі координат; скролінг номерів завантажень або РСН; скролінг номерів перерізів для стержнів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 93

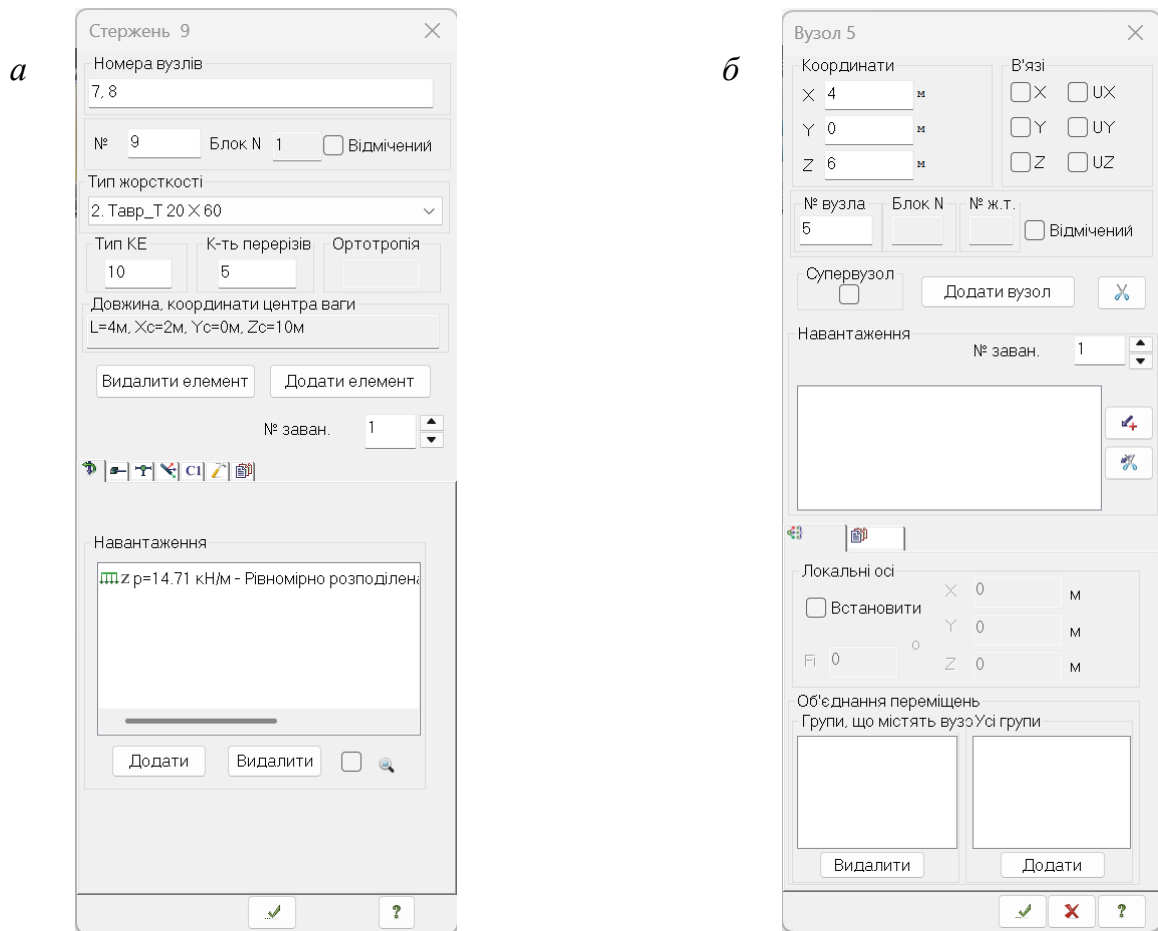


Рисунок 4.11 – Приклади діалогових інформаційних вікон елемента (а) та вузла (б) моделі


У режимі залізобетонних та сталевих конструкцій: номер елемента; номери його вузлів на схемі; показчик відмітки елемента на схемі; номер блока, до якого входить розглядуваний елемент; тип жорсткості; бібліотечний тип скінченного елемента; кількість перерізів (для стержня), у яких обчислюються зусилля або кут узгодження місцевих осей для пластин і об'ємних СЕ; кут повороту осей ортотропії (для пластин і об'ємних СЕ); довжина (площа, обсяг) і координати центру ваги елемента в глобальній системі координат; скролінг номерів завантажень або РСН; скролінг номерів перерізів для стержнів.

Найбільш важливим є те, що інформаційні вікна одночасно є засобом коригування. Такі компоненти, як жорсткість, навантаження, шарніри, можна змінювати, не залишаючи вікна.


Щоб коригувати навантаження, потрібно виконати такі операції:

- у вікні **Номер навантаження**, прокручуючи клацанням миші список номерів, вибрати навантаження, яке цікавить;
- подвійним клацанням миші зазначити в списку навантаження, що підлягає коригуванню;
- у розкритому діалоговому вікні **Параметри місцевого навантаження** ввести у відповідні поля нові параметри навантаження;
- закрити вікно натисканням кнопки **Підтвердити**;


Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 94


- закрити діалогове інформаційне вікно натисканням кнопки  **Застосувати**.


Отже, можна коригувати будь-який із параметрів, що характеризують заданий тип навантаження. Змінити ж сам тип навантаження не можна. Якщо потрібно буде це зробити, слід кнопкою **Видалити**, розміщеною у нижній частині поля **Навантаження** (рис. 4.11 а), скасувати задане навантаження і потім натискуванням кнопки **Додати** викликати діалогове вікно **Задання навантажень** (панель **Навантаження** на вкладці «Створення та редагування»). Далі за допомогою вікна задати нове навантаження.

Якщо потрібно змінити жорсткість елемента, досить розгорнути список жорсткостей, відмітити нову жорсткість, потім закрити вікно кнопкою  **Застосувати**.

Зауважимо, що в один прийом можна зробити коригування в усіх полях, де це допускається, і потім закрити вікно.


Інформаційне вікно вузла моделі має вигляд, подібний до попереднього (рис. 4.11 б). Тут також можна коригувати сили, прикладені до вузла. Є можливість задати в'язі або змінити наявні. Робиться це просто відміткою (або зняттям відмітки) у відповідному віконці поля в'язі та натисканням кнопки  **Застосувати**.

Ознайомившись з інформаційними вікнами, зауважимо про кнопку **Видалити елемент** або  **Видалити вузол**, що розташовані у відповідних вікнах (див. рис. 4.11).


Увага! Будьте обережні щодо кнопок **Видалити елемент** або  **Видалити вузол!** При використанні цих команд видаляється не тільки обраний об'єкт, а і суміжні елементи, які включають вузли (вузол) об'єкта, що видаляється. Для відновлення помилково видаленої частини потрібно буде скористатися командою


Скасування  (Панель інструментів швидкого доступу).

4.6 Відображення характеристик розрахункової схеми

Команда **Параметри відображення**  викликає діалогове вікно **Показати**, яке призначене для відображення на розрахунковій схемі інформації, а також установки опцій відображення самої схеми. Функції команд очевидні з їх назв, винятком можуть бути тільки такі, як **Вузли об'єднання переміщень** або **Показати сітки**.

Діалогове вікно **Показати** містить такі закладки: Елементи, Вузли, Загальні. Значення, Матеріали, Показувати, Візуалізація (рис. 4.12).

Для відображення характеристик моделі на екрані спочатку відмічають компоненти моделі, які потрібно вивести на екран і натискають кнопку  **Перемалювати**. Після цього відмічені характеристики з'являться на екрані.

Можна також вивести інформацію на екран тільки для виділених об'єктів за допомогою кнопки  **Застосувати параметри відображення тільки для виділених об'єктів**.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 95

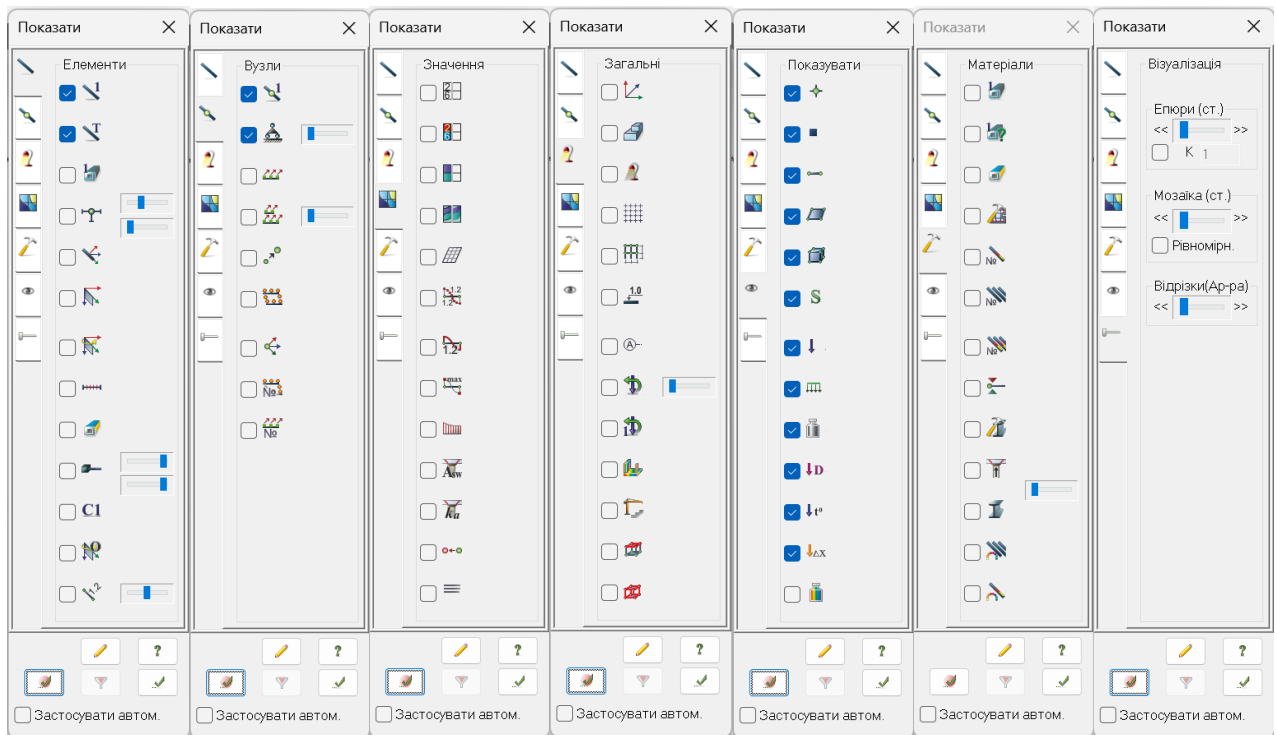


Рисунок 4.12 – Закладки діалогового вікна **Показати** інструментів **Параметри відображення**

4.7 Редагування розрахункової моделі

Редагування термін, який зазвичай розуміють як операцію редагування даних, які введені помилково. Однак у ПК «ЛІРА-САПР» це поняття значно ширше: команди редагування застосовують до всіх об'єктів розрахункової моделі для того, щоб швидко, за допомогою простих операцій, з існуючої моделі створити нову модель.

Зрозуміло, що використовуючи тільки регулярні фрагменти (рама, ростверк, плита, балка-стінка, ферма, поверхня обертання тощо), неможливо охопити всі конструктивні схеми, які можуть задумати конструктори. На допомогу приходить редагування. Ідея така: все, що не може бути зроблено в рамках регулярних фрагментів, коригується за допомогою команд редагування. Більше того, можна взяти готовий файл розрахункової моделі і за допомогою команд редагування створити нову розрахункову модель іншої споруди.

Розглянемо найпоширеніші команди панелі Редагування вкладки «Створення та редагування»: **Копіювання, Переміщення і Упаковку розрахункової схеми.**

1) **Копіювання** (рис. 4.13) – розкритий список із заміною, що містить операції копіювання об'єктів:

- за параметрами;
- за одним вузлом;
- за двома вузлами;
- поворотом;
- симетрично;

Переміщення (рис. 4.14) – розкритий список із заміною, що містить операції переміщення об'єктів:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 96

- за параметрами;
- за одним вузлом;
- за двома вузлами;
- поворотом;
- симетрично;
- притягненням вузлів до площини.

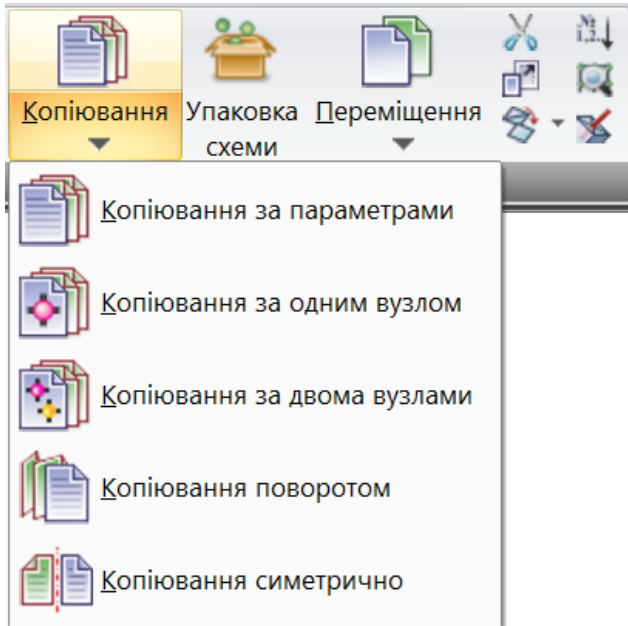


Рисунок 4.13 – Розкритий список інструменту **Копіювання**

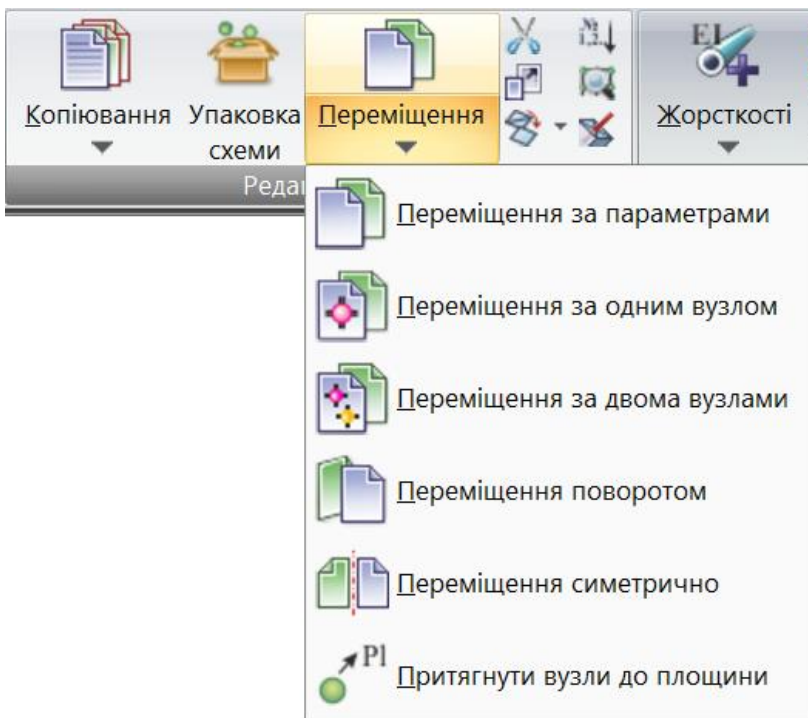



Рисунок 4.14 – Розкритий список інструменту **Переміщення**

3) **Упаковка схеми**  (див. рис. 4.14). У процесі створення моделі користувачеві доводиться неодноразово видаляти одні елементи й додавати інші. Потреба в цьому виникає часто:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 97

- наприклад, використовується раніше створена геометрична схема, у якій здійснюються виправлення;
- прототип неточно відображає розглянуту конструкцію;
- помилка під час розроблення моделі.

Для зшивання вузлів і елементів, які збігаються, а також для безповоротного вилучення з розрахункової схеми видалених вузлів і елементів здійснюється **Упаковка схеми** 📦. Під час розрахунку неупакованої схеми видалені вузли й елементи розглядаються як неіснуючі, але їх номери зберігаються доти, доки не виконане упакування.

Інструмент **Упаковка схеми** 📦 також дозволяє видалити або виправити елементи з некоректною геометричною схемою, видалити з моделі типи жорсткостей, матеріали та групи об'єднання переміщень, які не призначено жодному об'єкту розрахункової схеми тощо.

Діалогове вікно **Упаковка схеми** 📦 викликається з панелі **Редагування** на вкладці «Створення та редагування» (рис. 4.14, 4.15).

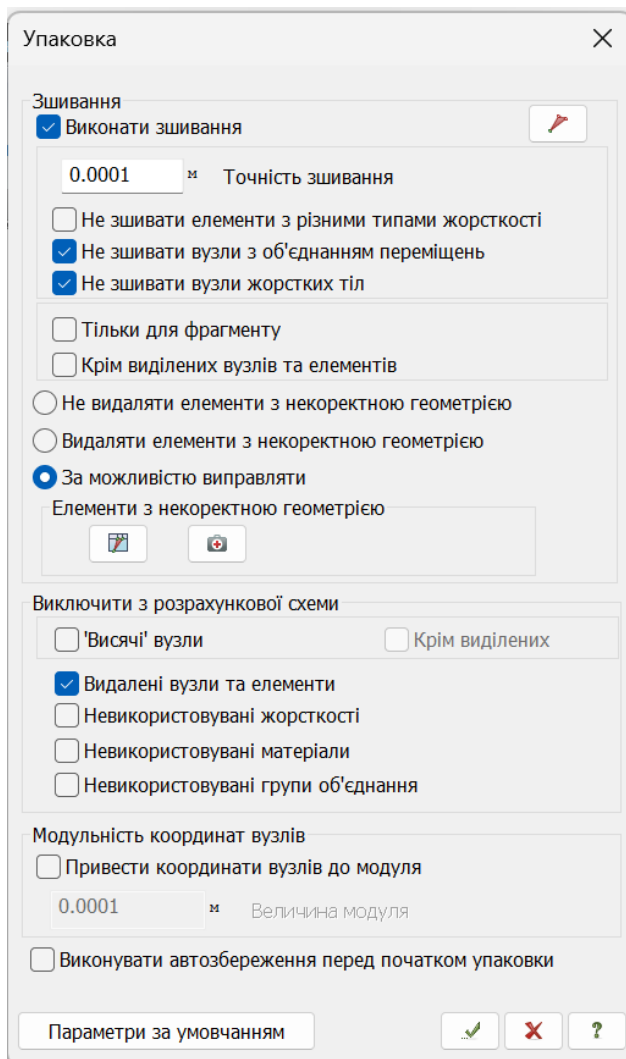


Рисунок 4.15 – Діалогове вікно **Упаковка схеми**

Встановлений у діалоговому вікні **Упаковка схеми** прапорець **Виконати зшивання** відкриває доступ до управління наступними параметрами:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 98

- **Точність зшивання:** якщо відстань між вузлами менше числа, заданого у відповідному полі введення, то ці вузли об'єднуються в один вузол; при цьому у відповідних елементів здійснюється коректування нумерації вузлів;

- встановлений прапорець **Не зшивати елементи з різними типами жорсткості** дозволяє уникнути об'єднання елементів в один елемент (наприклад, декількох одновузлових скінченних елементів типу 51, що входять в один і той же вузол);

- встановлений прапорець **Не зшивати вузли з об'єднанням переміщень** дозволяє уникнути зшивання вузлів з об'єднанням переміщень в один вузол;

- встановлений прапорець **Не зшивати вузли жорстких тіл** дозволяє уникнути об'єднання вузлів жорстких тіл;

- встановлений прапорець **Тільки для фрагменту** дозволяє виконати зшивання для поточного фрагменту;

- встановлений прапорець **Крім виділених вузлів та елементів** дозволяє не виконувати упаковку для виділених об'єктів розрахункової схеми.


Встановлені в діалоговому вікні прапорці у розділі **Виключити з розрахункової схеми** дозволяють виконувати такі операції:

- **«Висячі» вузли** – після виконання процедури упаковки всі вузли, до яких не приєднаний жоден елемент, будуть безповоротно виключені зі схеми; решта вузлів отримують нову послідовну нумерацію;

- **Видалені вузли та елементи** – після виконання процедури упаковки всі видалені вузли та елементи будуть безповоротно виключені зі схеми; решта вузлів і елементів отримують нову послідовну нумерацію;

- **Невикористовувані жорсткості** – після виконання процедури упаковки всі типи жорсткості, що не використовуються будуть безповоротно виключені зі схеми; решта типів жорсткості отримують нову послідовну нумерацію;

- **Невикористовувані групи об'єднання** – після виконання процедури упаковки невикористовувані групи об'єднання переміщень будуть безповоротно виключені зі схеми; решта груп отримують нову послідовну нумерацію.

Під час зшивання можна зробити винятки для окремих елементів та вузлів. Така операція може знадобитися для окремих елементів та вузлів, які через зшивання можуть стати некоректними. Для того щоб відмітити на схемі елементи, які стануть некоректними внаслідок зшивання вузлів і відмітити вузли, об'єднання яких призведе до цього, необхідно натиснути кнопку  у діалоговому вікні **Упаковка схеми**.

Встановлений прапорець **Привести координати вузлів до модуля** відкриває доступ до поля введення, в якому задається точність округлення координат.


Встановлений прапорець **Виконувати автозбереження** перед початком упаковки дозволяє зберегти всю створену інформацію про схему в тимчасовому файлі автозбереження.

Увага! У результаті упаковки знищується історія створення схеми. Також операцію Упаковка схеми в процесі створення моделі можна виконувати багаторазово.

4.8 Призначення типу елементів

Після побудови розрахункової схеми рекомендуються перевірити тип елементів за допомогою установки прапорця **Типи SE** (діалог **Показати**, вкладка **Елементи**; див.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 99

рис. 4.12). У випадку невідповідності типу СЕ слід виконати його корегування натисканням кнопки  **Зміна типу СЕ** (вкладка «Розширене редагування», панель **Схема** (рис. 4.16 а, б). Відкриється однойменний діалог (рис. 4.16 в).

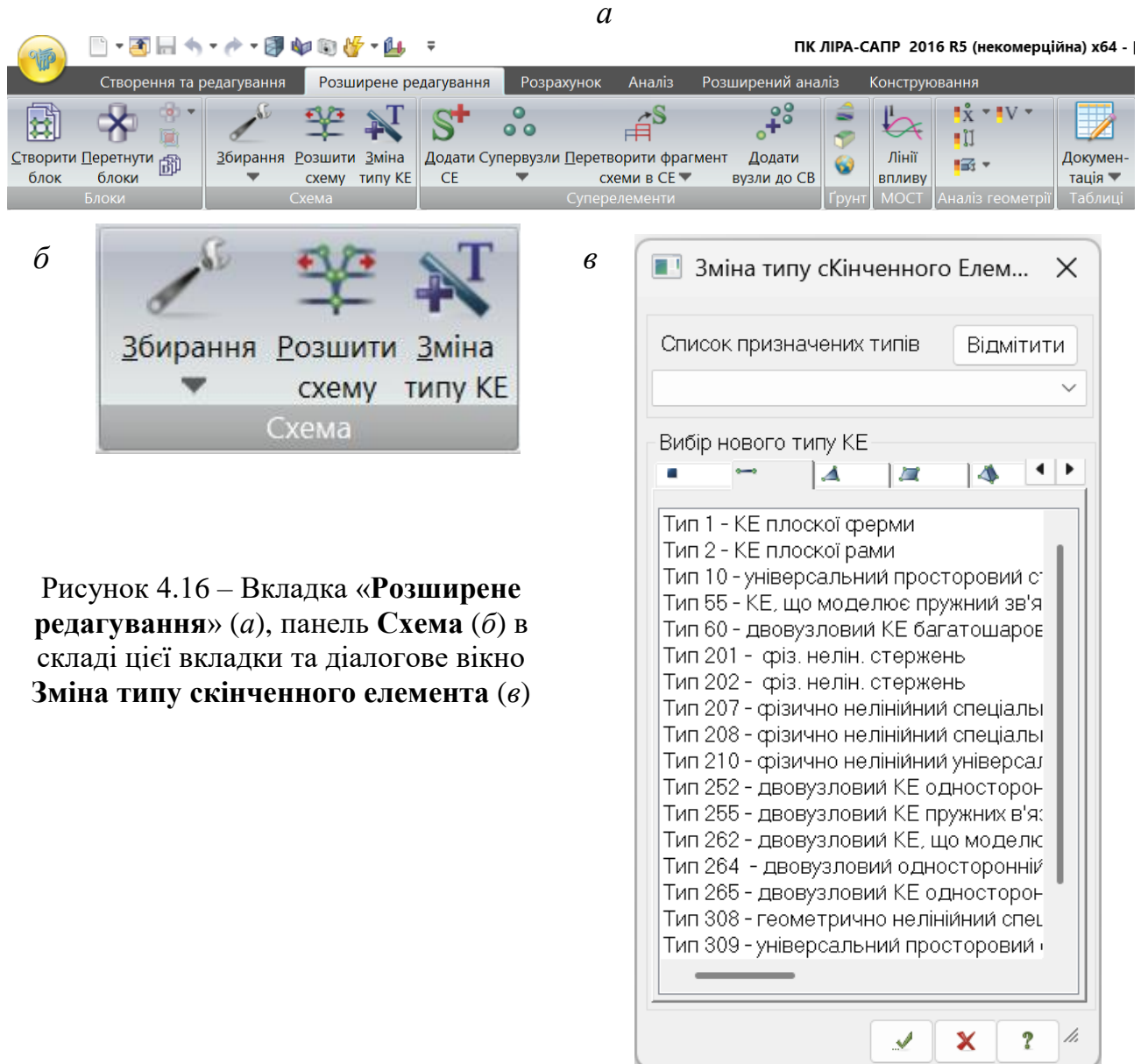




Рисунок 4.16 – Вкладка «Розширене редагування» (а), панель **Схема** (б) в складі цієї вкладки та діалогове вікно **Зміна типу скінченного елемента** (в)

Операція зміни типу скінченного елемента проводиться із обраними елементами. Відмітка елементів може бути проведена також у такий спосіб:

- відкрити список призначених типів, вибрати тип, який підлягає заміні, і позначити його курсором;
- виконати команду **Відмітити**; при цьому на схемі будуть відмічені всі елементи типу, який підлягає заміні;
- за допомогою однієї із закладок для вибору нового типу викликати в поле списку перелік елементів з бібліотеки і позначити необхідний новий тип;
- натиснути кнопку  **Застосувати**.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 100


4.9 Призначення опорних в'язей

Розрахункова модель повинна бути закріплена в просторі за допомогою в'язів до опорних конструкцій або до ґрунтової основи. Вибір та призначення в'язів виконують за допомогою діалогового вікна **В'язі у вузлах**, яке викликається натисканням кнопки  **В'язі** (панель **Жорсткості і в'язі** на вкладці «Створення та редагування») викличе діалогове вікно **В'язі у вузлах** (рис. 4.17).


У діалоговому вікні, яке відкрилось, передбачено призначення в'язів для вузла у просторі (шість в'язей відповідно до шести степенів вільності жорсткого вузла в просторовій задачі).

У загальній системі осей координат в'язі X, Y, Z відповідають закріпленню вузла в напрямку зазначених осей загальної системи координат.

В'язі UX, UY, UZ відповідають закріпленню вузла від поворотів щодо зазначених осей загальної системи координат.

Для розрахункових схем, у яких кількість степенів вільності у вузлі є меншою ніж шість (плоскі ферми, плоскі рами тощо) може застосовуватися інструмент  **Ознака схеми** (Панель **Редагування**). За допомогою цього інструмента програма автоматично накладає в залежності від обраної ознаки схеми відповідні просторові в'язі в розрахунковій моделі. Наприклад для ознаки схеми 1 для складання моделей плоских ферм всі в'язі в програмі із площині накладаються автоматично. У ПК «ЛІРА-САПР» задіяні п'ять ознак схеми (див. п. 3.5.3).

Наявність необхідних в'язей фіксується за допомогою установки відповідних прапорців. Потім слід виконати команду **+ Додати в'язі в відмічених вузлах**.

Видалення в'язей здійснюється аналогічно при натисканні кнопки  **Видалити в'язі із зазначених вузлів**.

Наприклад, у таблиці 4.2 наведено в'язі, які можуть накладатися на вузли для моделювання різних опорних закріплень у разі ознаки схеми 2 – три степені вільності у вузлі (два переміщення і поворот у площині XOZ; використовується для моделювання плоских рам).

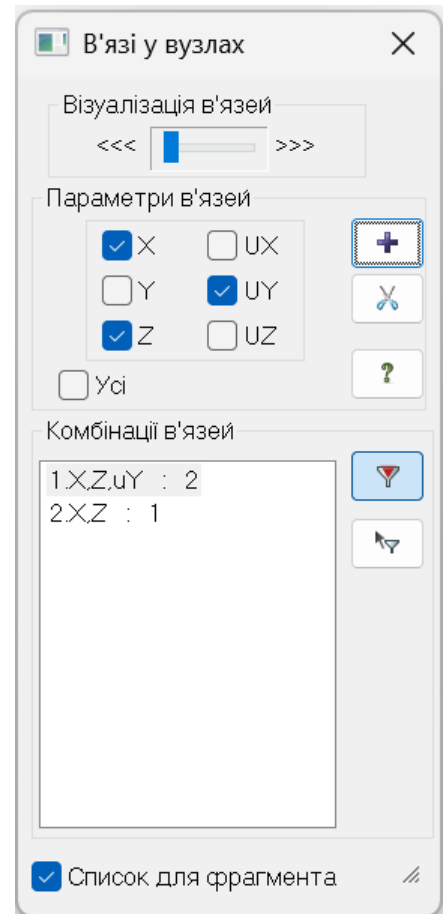
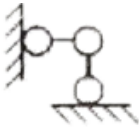

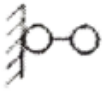





Рисунок 4.17 – Діалогове вікно **В'язі у вузлах**

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 101


Таблиця 4.2 – Можливі варіанти накладання в’язів на вузли для ознаки схеми 2

Назва опори	Схема	В’язі
Шарнірно-нерухома опора		<input checked="" type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> UX <input type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> UY <input checked="" type="checkbox"/> Z <input type="checkbox"/> UZ
Шарнірно-рухома опора (можливе переміщення вздовж осі x)		<input type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> UX <input type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> UY <input checked="" type="checkbox"/> Z <input type="checkbox"/> UZ
Шарнірно-рухома опора (можливе переміщення вздовж осі z)		<input checked="" type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> UX <input type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> UY <input type="checkbox"/> Z <input type="checkbox"/> UZ
Жорстке зацмлення		<input checked="" type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> UX <input type="checkbox"/> Y <input checked="" type="checkbox"/> UY <input checked="" type="checkbox"/> Z <input type="checkbox"/> UZ
Повзун (можливе переміщення вздовж осі x)		<input type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> UX <input type="checkbox"/> Y <input checked="" type="checkbox"/> UY <input checked="" type="checkbox"/> Z <input type="checkbox"/> UZ
Повзун (можливе переміщення вздовж осі z)		<input checked="" type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> UX <input type="checkbox"/> Y <input checked="" type="checkbox"/> UY <input type="checkbox"/> Z <input type="checkbox"/> UZ

4.10 Моделювання шарнірів


4.10.1 Моделювання шарнірів в стрижневих елементах

Під шарніром мається на увазі зняття або обмеження жорсткості в’язі одного з кінців стержня з вузлом схеми. У стержнях шарніри задаються безпосередньо при створенні схеми і орієнтуються відносно осей місцевої системи координат X_1 , Y_1 , Z_1 .


Для задання шарнірів слід викликати діалогове вікно **Шарніри** натисканням кнопки  Шарніри (рис. 4.18 а) (панель **Редагування стержнів** на контекстній вкладці **Стержні**). Операції, які застосовуються тільки до стержнів схеми, активуються при відмітці стержнів. Контекстна вкладка містить команди тільки щодо створення та редагування схеми і не може бути викликана із вкладок «Аналіз», «Розширений аналіз», «Конструювання»).

Допускається вводити як лінійні X_1 , Y_1 , Z_1 (вздовж осей X_1 , Y_1 , Z_1), так і кутові UX_1 , UY_1 , UZ_1 (навколо осей X_1 , Y_1 , Z_1) шарніри. Лінійні шарніри запобігають передаванню від одного елемента на інший осьових зусиль, кутові – моментів.

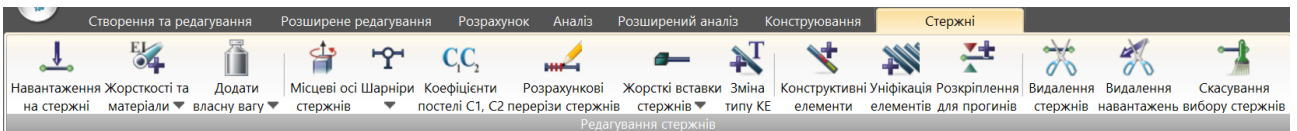
Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 102

В діалоговому вікні **Шарніри** (рис. 4.18 б) для кінців стержня (1-го та 2-го вузлів) за допомогою установки відповідних прапорців вказуються напрямки, за якими потрібно ввести шарніри. У відповідних полях введення задаються жорсткості шарнірів. Потім слід виконати команду  **Застосувати** для відмічених елементів схеми. Видалення шарнірів проводиться аналогічно. *Під час призначення шарнірів слід пам'ятати, що початок і кінець стержня визначаються напрямком місцевої осі X1. Місцева вісь стержня X1 в програмному комплексі направлена від меншого за номером вузла до більшого.*

Увага! Якщо жорсткість шарніра дорівнює нулю, то моделюється чистий шарнір. Якщо ж жорсткість шарніра задана дуже великим числом, то моделюється жорстка в'язь кінця стержня з вузлом.

У випадку застосування інструмента  **Генерація ферм** регулярний фрагмент ферми автоматично генерується із стержнів, яким призначається тип скінченного елемента №1 плоскої ферми. У вузлових сполучень елементів цього типу програмою автоматично задаються шарніри і тому їх спеціально встановлювати не потрібно.

а



б

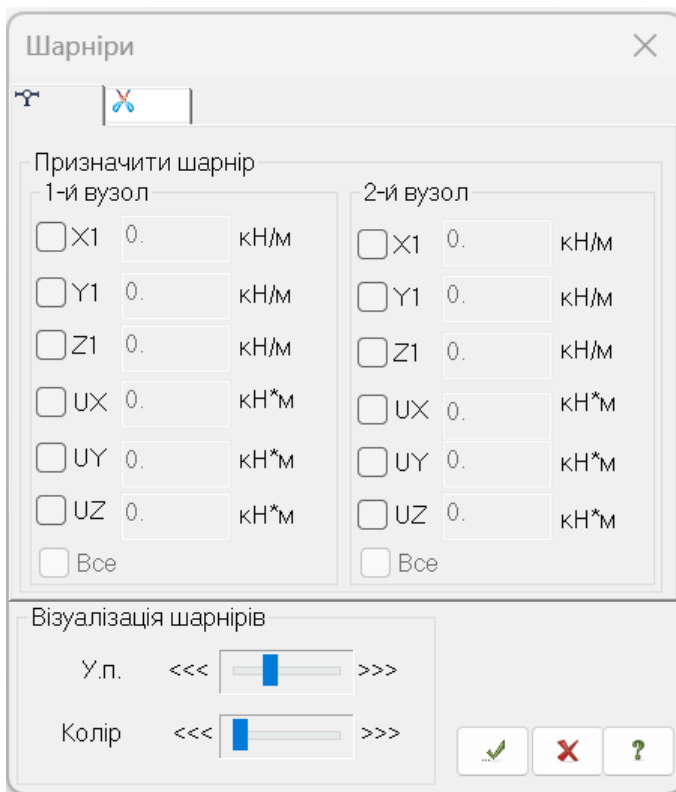





Рисунок 4.18 – Контекстна вкладка **Стержні** (а) та діалогове вікно **Шарніри** (б)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 103

4.10.2 Моделювання шарнірів у площинних елементах

Задання шарнірів у площинних елементах виконують за допомогою діалогового вікна **Об'єднання переміщень**, яке відкривається за допомогою кнопки розділення  на панелі **Жорсткості та в'язі** вкладки «Створення та редагування». Після натискання кнопки відкривається діалогове вікно, в якому є вибір з 2-х вкладок. Для задання шарнірів в пластинах слід в цьому вікні перейти на вкладку  **Створити шарнір із розшивкою вузлів**. Також можна відразу відкрити діалогове вікно з цією вкладкою завдяки вибору із розкривного списку кнопки розділення **Об'єднання переміщень** інструменту  **Створити шарнір із розшивкою вузлів** (рис. 4.19).

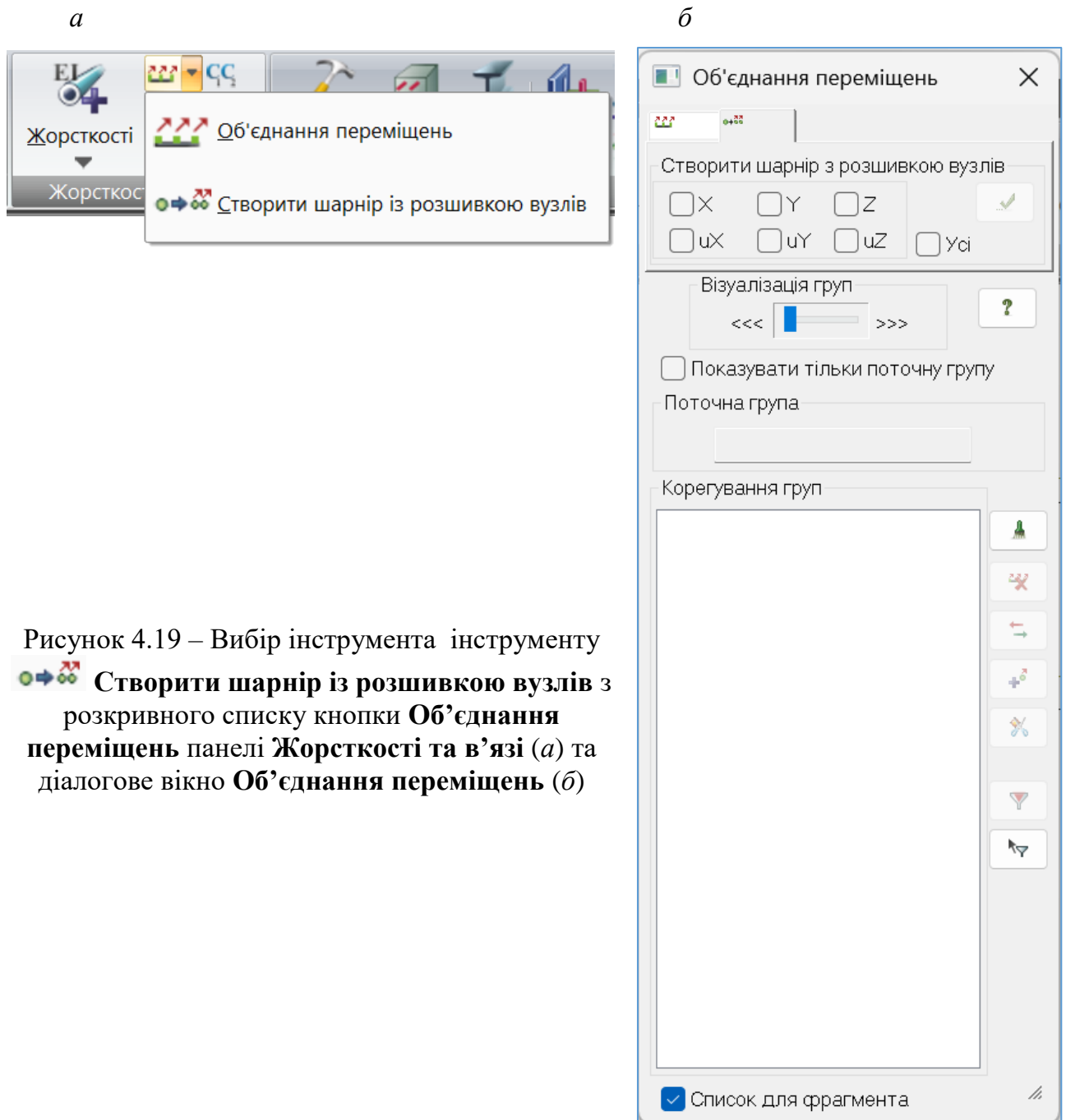







Рисунок 4.19 – Вибір інструменту  **Створити шарнір із розшивкою вузлів** з розкривного списку кнопки **Об'єднання переміщень** панелі **Жорсткості та в'язі** (а) та діалогове вікно **Об'єднання переміщень** (б)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 104

Шарнір у пластинах алгоритмічно організовується за допомогою розшивки схеми по відповідній лінії вузлів, як правило, орієнтованої уздовж однієї з осей глобальної системи координат. Розшивання супроводжується роздвоєнням вузлів на лінії розшивки (в одних і тих же координатах з'являється по два вузла – співпадаючі вузли). Щоб не допустити повного порушення сумісності, новим вузлам має бути дана вказівка, до яких саме елементів вони повинні належати. Для забезпечення цього рекомендується моделювання шарніра в пластині виконувати в наступному порядку:

- 1) Відмітити на схемі вузли, що лежать на лінії розшивки;
- 2) Відмітити на схемі елементи, яким повинні належати нові вузли (елементи, що примикають до відмічених вузлів);
- 3) Створити для лінії вузлів розшивки групу об'єднання відповідних переміщень і за допомогою установки відповідних прапорців зафіксувати потрібні переміщення - X, Y, Z, UX, UY, UZ. Так, наприклад, якщо на лінії розшивки необхідно створити шарнір навколо осі Y, то в групу об'єднання увійдуть всі переміщення, крім UY;
- 4) Занести створену групу в поле введення поточної групи та в поле накопичення груп за допомогою команди  Застосувати (див. рис. 4.19 б).

У результаті виконання команди відбудеться роздвоєння всіх вузлів на лінії стику. Вузли з більшими номерами будуть належати відміченим раніше елементам.

Також для задання шарнірів можна також застосувати інструмент  **Об'єднання переміщень** (1-а вкладка діалогового вікна **Об'єднання переміщень**, див. рис. 4.19). Для цього спочатку слід розділити елементи у спільних вузлах. Після відділення елементів замість спільного вузла утворюються два співпадаючих вузлах один з яких належить одному елементу, а інший другому. Потім слід за допомогою інструменту  **Об'єднання переміщень** об'єднати відповідні лінійні переміщення у співпадаючих вузлах. Якщо в іншому напрямку шарнір відсутній, то об'єднуються також і кутові переміщення цих вузлів у цьому напрямку. Також можливо застосовувати інструмент  **Об'єднання переміщень** і в не співпадаючих вузлах.

Якщо необхідно, наприклад, у плиті (рис. 4.20) описати шарнір відносно осі Y, то по лінії вузлів 4, 12, 20, 28, 36 робиться подвійна нумерація вузлів (додаються вузли. 5, 13, 21, 29, 37, координати яких можуть співпадати з координатами вузлів 4, 12, 20, 28, 36). Потім попарно об'єднуються (для вузлів 4 і 5, 12 і 13 і т.д.) переміщення у напрямках Z і UX. Для елементів оболонок, крім цього, попарно об'єднуються лінійні переміщення вузлів у напрямках X і Y.

Так само чинять при шарнірному кріпленні елементів оболонки до стержня. Окремо нумеруються вузли оболонки і стержня (та ж подвійна нумерація), а потім попарно об'єднуються переміщення вузлів у напрямках X, Y і Z.

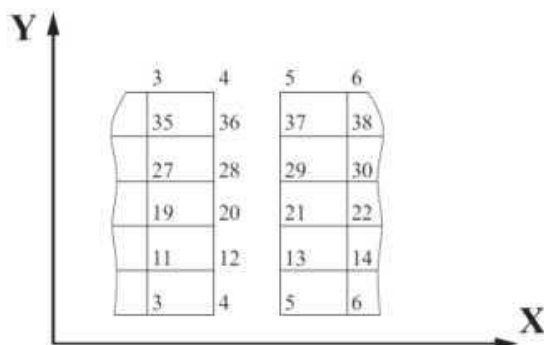


Рисунок 4.20 – Моделювання шарніру у плиті за допомогою інструменту об'єднання переміщень у вузлах

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 105

Якщо відомі лінійні податливості в місці установки шарніра, то між вузлами подвійної нумерації задається пружна в'язь (СЕ типу 55). У цьому випадку об'єднання переміщень по вказаних напрямках не задається.

4.11 Призначення жорсткостей елементів

Для розрахунку схеми необхідно задати жорсткісні характеристики елементів, що залежать від типу скінченних елементів, таких як площі поперечних перерізів (A), моменти інерції перерізів (I), товщина плитних і оболонкових елементів, модулі пружності (E) та зсуву (G), коефіцієнти пружної основи (C_1, C_2). Наприклад, при використанні програми «ЛІРА-САПР» для розрахунку стержневих елементів типу № 1 (елемент плоскої ферми) необхідно для розрахунків напружено-деформованого стану визначити значення поздовжньої жорсткості EA , а для скінченних елементів типу № 2 (елемент плоскої рами) і згинальну жорсткість EI .

Під час вивчення дисципліни «Будівельна механіка» для розрахунків статично визначених систем ми не використовували поняття жорсткості, а розглядали тільки умови рівноваги зусиль в перерізах. А для розрахунків статично невизначених систем, зокрема методом переміщень, необхідно було задання жорсткостей перерізів, оскільки від них залежать переміщення системи. МСЕ у формі методу переміщень в ПК «ЛІРА-САПР» є універсальним методом як для статично визначених так і статично невизначених конструктивних систем і потребує обов'язкового задавання жорсткостей перерізів елементів. На підставі цього можна зробити такі висновки і загальні рекомендації для користувача комплексу:

1) Якщо користувач розраховує *статично визначену систему* і йому *не потрібні результати розрахунку переміщень* у такому випадку для розрахунку зусиль в елементах схеми *достатньо задати довільне значення жорсткості*;


2) Якщо розрахункова система *статично визначена, але в ній потрібно визначити переміщення*, або вона *статично невизначена*, тоді у таких випадках *слід призначати жорсткості перерізів елементів максимально наближені до реальних значень*.


У ПК «ЛІРА-САПР» жорсткісні характеристики призначаються у такому загальному порядку:

- вводяться числові дані жорсткісних характеристик. Кожен набір характеристик називають *типом жорсткості* або просто *жорсткість*. Кожному типу жорсткості в програмі присвоюється *порядковий номер і колір*;

- один із типів жорсткості призначається поточним;

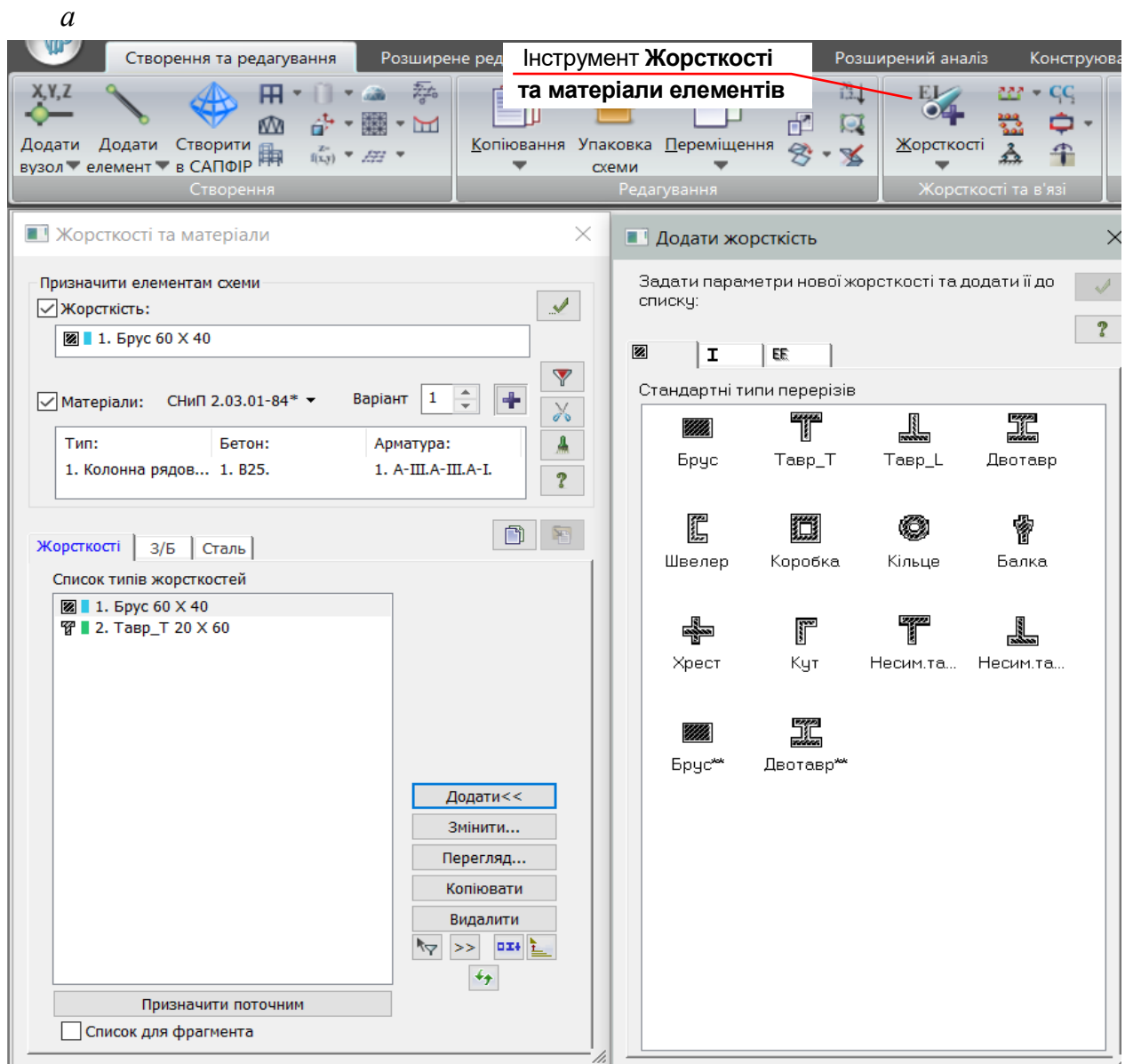
- призначають елементи, яким буде присвоєно поточну жорсткість;

- за допомогою кнопки  **Застосувати** всім відміченим елементам присвоюють жорсткісні характеристики, що містяться в поточному типі жорсткості.

Розглянемо, як практично даний порядок реалізується у програмі ПК «ЛІРА-САПР». Для введення характеристик жорсткості елементів слід спочатку викликати діалогове вікно **Жорсткості та матеріали** натисканням однойменної кнопки  на панелі **Жорсткості та в'язі** вкладки «Створення та редагування» (рис. 4.21 а). Відкрите діалогове вікно **Жорсткості та матеріали** містить інструменти управління жорсткостями і параметрами конструювання елементів моделі, має три закладки графічного меню, з яких при відкритті є активною закладка **Жорсткості** (рис. 4.21 б).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 106

У відкритому діалоговому вікні **Жорсткості та матеріали** при активній вкладці **Жорсткості** слід натиснути кнопку **Додати** (рис. 4.21 б) для відкриття діалогового вікна **Додати жорсткість** (рис. 4.21 в). Відкрите вікно **Додати жорсткість** має три закладки графічного меню і надає доступ до бібліотеки варіантів задавання характеристик жорсткості (див. рис. 4.21 в). За замовчуванням відкривається 1-а закладка (варіант) **Стандартні типи перерізів**. Дві інші закладки містять такі інструменти задавання жорсткостей: в 2-й закладці – інструменти задання характеристик з бази типових перерізів сталевого прокату; в 3-й закладці – інструменти для задання параметрів пластин та об'ємних елементів, безпосереднього введення числових значень характеристик жорсткості для частини типів скінченних елементів, інструменти вибору типу нестандартного та тонкостінного перерізів (рис. 4.21 в).



б

в

Рисунок 4.21 – Розташування інструмента **Жорсткості та матеріали елементів** в стрічковому меню (а), діалогове вікно **Жорсткості та матеріали** (б) та діалогове вікно **Додати жорсткість** (в)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 107

Щоб задати характеристики жорсткості для стандартного перерізу слід подвійним натисканням на піктограму потрібного типу перерізу вивести на екран діалогове вікно, що містить текстові поля для введення характеристик жорсткості.

У базі типових перерізів сталевого прокату (2-а закладка вікна **Додати жорсткість**) наведено велику кількість варіантів перерізів зі стандартних прокатних профілів, гнутих профілів, круглої сталі, а також складених перерізів із використанням стандартного прокату. Для використання цього варіанту задавання характеристик жорсткості користувачу достатньо обрати потрібні профілі з бази стандартних профілів, що містяться в програмному комплексі. База профілів ПК «ЛПРА-САІР» містить сортаменти згідно з національними стандартами, державними стандартами колишньою Радянського Союзу, Eurocode і нормами США.

Після задавання характеристик жорсткості діалогове вікно **Жорсткості та матеріали** надає користувачеві можливість:

- переглянути параметри жорсткості із списку завдяки натисканню кнопки [Перегляд...];
- переглянути елементи в моделі заданого типу жорсткості зі списку – кнопка [>>];
- змінити параметри заданого типу жорсткості зі списку – кнопка [Змінити...];
- видалити жорсткість зі списку – кнопка [Видалити...];
- копіювати в список уже наявну в ньому жорсткість для подальшого її коригування і призначення іншим елементам – кнопка [Копіювання].


Відзначимо надзвичайну корисність операції копіювання. Якщо потрібно ввести дані для кількох однотипних але різних за значенням жорсткостей (а це буває дуже часто), то треба скопіювати відмічену попередньо жорсткість у список, потім зазначити копію і кнопкою [Змінити...] викликати діалогове вікно «Задання стандартного перерізу» і в ньому змінити потрібні параметри.

4.12 Задання навантажень

У програмному комплексі є можливість задати майже всі відомі види статичних і динамічних навантажень. Перелічимо найважливіші типи навантажень, передбачених у програмному комплексі:

- постійні навантаження від власної ваги конструкцій;
- тимчасові статичні навантаження всіх видів (зосереджені, розподілені, моментні тощо), що додаються у вузлах або на ділянці елемента;
- динамічні навантаження – ударні, імпульсні, вібраційні;
- динамічні сейсмічні навантаження, задані акселогорамою;
- навантаження, викликані перепадом температур;
- навантаження, викликані вимушеними переміщеннями.

Під завантаженням в програмному комплексі розуміється група навантажень, що діють одночасно. Кожному завантаженню присвоюється номер, довільне ім'я і вид. Розподіл навантажень по окремим завантаженням слід виконувати в залежності від їх природи, характеру та тривалості дії. Навантаження слід задавати з розрахунковими значеннями, тобто з урахуванням коефіцієнта надійності за завантаженням γ_f . Всього в програмному комплексі допускається задання до 300 завантажень. Одне завантаження може містити будь-яку кількість навантажень.

Номер, ім'я й вид завантаження задаються у діалоговому вікні **Редактор завантажень** (рис. 4.22 б), яке викликається натисканням кнопки  **Редактор завантажень** (панель **Навантаження** на вкладці «Створення та редагування»; рис. 4.22 а).

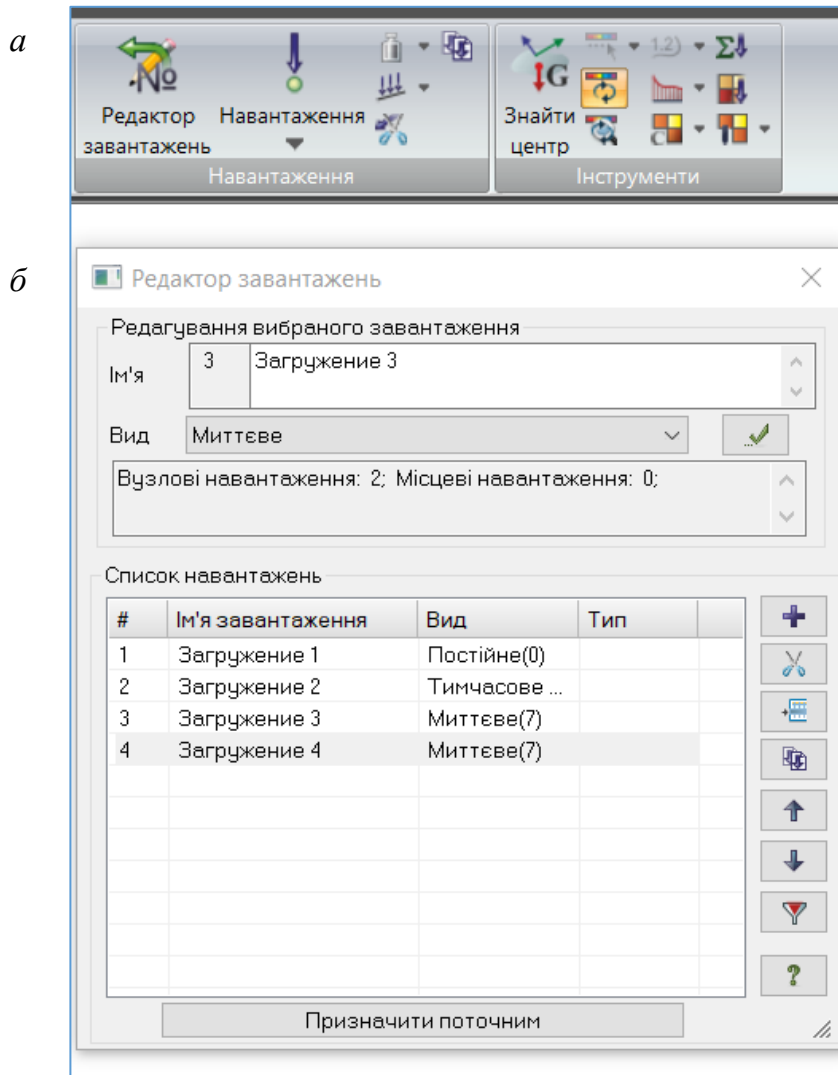





Рисунок 4.22 – Панель **Навантаження** (а) з вкладки «Створення та редагування» та діалогове вікно **Редактор завантажень** (б)

За замовчуванням, на початку роботи програми, прийняте ім'я *Завантаження 1*. Як правило, воно включає навантаження від власної ваги та постійні навантаження відповідно до норм. Задання навантажень від власної ваги конструкції розрахункової моделі може виконуватися в автоматизованому режимі за допомогою кнопки  **Додати власну вагу**, яка знаходиться на панелі **Навантаження** (див. рис. 4.22 а). Для цього необхідно під час задавання характеристик жорсткості елементів, вказати їх характеристичне значення питомої (або погонної) ваги R_0 . При виконанні команди  **Додати власну вагу** відкривається діалогове вікно, в якому слід задати коефіцієнт надійності за навантаженням γ_f та за необхідності встановити прапорець для задання навантаження від власної ваги тільки для відмічених елементів (рис. 4.23). Після цього слід натиснути кнопку  **Застосувати**. Під час розрахунку навантажень від власної ваги в програмі коефіцієнт надійності за навантаженням γ_f множиться на R_0 . У

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 109

результаті до всіх або виділених елементів конструкції буде автоматично додане рівномірно розподілене навантаження, що дорівнює погонній вазі елементів. Діалогове вікно містить низку налаштувань, які дають можливість призначати власну вагу на елементи з різними типами жорсткостей. Для таких елементів, як правило, використовують різні коефіцієнти надійності за навантаженням, наприклад, з/б елементи – 1,1, металеві – 1,05 тощо. Крім того, за допомогою відповідних налаштувань можна вказати, на які елементи задати власну вагу – на всі чи тільки на виділені.

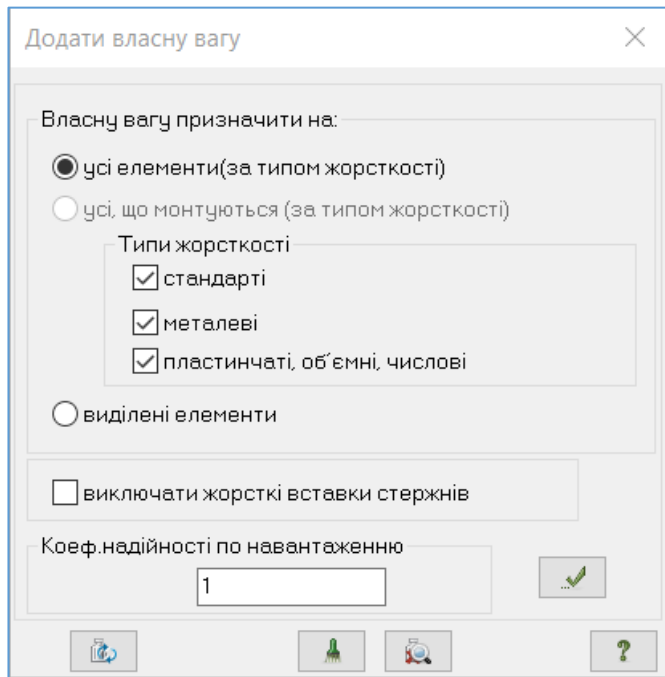


Рисунок 4.23 – Діалогове вікно
Додати власну вагу

Навантаження на вузли та елементи задаються за допомогою діалоговою вікна **Задання навантажень** (рис. 4.24 б), яке викликається після натискання кнопки розділення або вибору однієї із команд в її розкритому списку **Навантаження на вузли та елементи** (панель **Навантаження** на вкладці «Створення та редагування»; рис. 4.24 а).

Діалогове вікно містить закладки для задання навантажень на вузли, стержні, пластини, об'ємні елементи та суперелементи, а також дія задання навантажень для розрахунку на **динаміку в часі** (див. рис. 4.24 б). За замовчуванням навантаження належать до одного й того самого поточного завантаження, номер якого було поставлено заздалегідь. Вікно містить також закладку для коригування або видалення навантажень поточного завантаження.

У вікні розташовані радіокнопки для задання систем координат, напрямку дії навантаження (X, Y, Z) та кнопки вибору *типу навантажень*. Навантаження в залежності від типу на кнопках та в схемі виділені кольором, а саме: для статичних навантажень застосовується коричневий колір у діалоговому вікні та оливковий колір на схемі; для заданого зміщення – жовтий колір; для динамічного впливу – рожевий колір. Меню кнопок задання навантажень на закладках змінюється залежно від вибору типу об'єкта прикладення навантажень. При натисканні цих кнопок викликається діалогове вікно для задання параметрів навантаження. Прикладені навантаження і впливи заносять до поля списку навантажень – **Поточне навантаження**.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 110

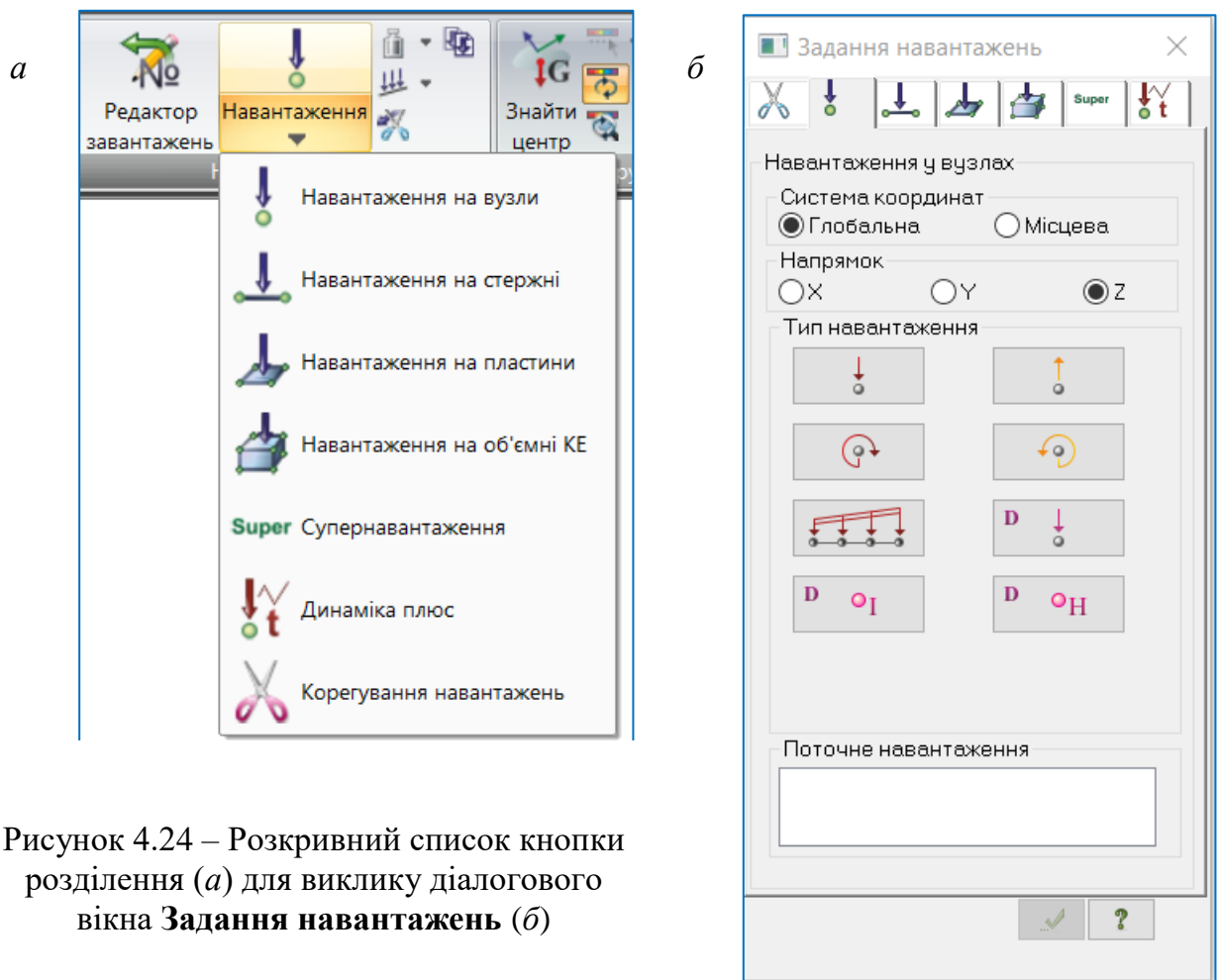


Рисунок 4.24 – Розкритий список кнопки розділення (а) для виклику діалогового вікна **Задання навантажень** (б)

Для вузлів передбачено задання таких восьми типів навантажень:

- зосереджена сила;
- зосереджений момент;
- задане переміщення;
- заданий поворот;
- трапецієподібне навантаження на групу вузлів;
- маси у вузлі;
- імпульсивне (ударне) навантаження;
- гармонічне навантаження.

Для стержневих елементів передбачено задання таких восьми типів навантажень:

- зосереджені навантаження;
- рівномірно розподілене навантаження на всій довжині стержня;
- лінійно розподілене навантаження на ділянці стержня.
- поздовжнє навантаження, яке викликане нагріванням стержня;
- моментне зосереджене навантаження;
- навантаження від моменту рівномірно розподіленого по всій довжині стержня;
- температурне навантаження нерівномірного нагрівання, що викликає в стержні згинальний момент;
- поздовжнє навантаження, яке лінійно змінюється по всій довжині стержня.

Після вибору за допомогою клацання миші потрібного типу навантаження виводиться діалогове вікно **Параметри навантаження** (рис. 4.25). У текстове поле

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 111

Значення заноситься знак і величина навантаження. Знак навантаження обирається за наведеним нижче правилом.

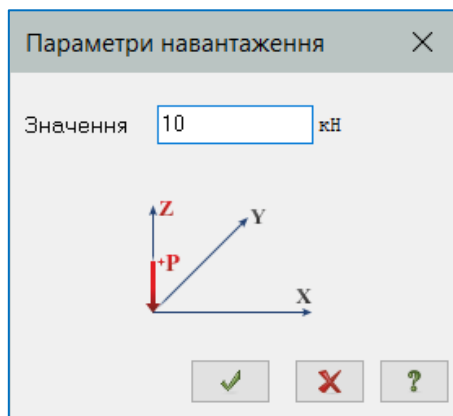



Рисунок 4.25 – Діалогове вікно
Параметри навантаження

(на прикладі типу  **Зосереджена сила** з меню інструментів закладки **Навантаження** у вузлах, див. рис. 4.23 б)

Навантаження вважається додатнім, якщо його напрямок дії протилежний напрямку відповідної осі системи координат (для моментів – додатне значення моменту відповідає обертанню за годинниковою стрілкою, якщо дивитися з кінця осі).

Якщо у вікні **Показати** на закладці **Загальні** для параметрів **Навантаження** і **Величини навантажень** виставлені прапорці, то задані навантаження відображаються на розрахунковій схемі. На закладці **Показувати** цього вікна можна встановити або зняти прапорці, які відповідають за відображення різних видів навантаження (**Показувати зосереджені навантаження, розподілені навантаження, власна вага, динамічні навантаження, температурні навантаження, спеціальні навантаження**).

4.13 Розрахункові сполучення зусиль

У програмному комплексі передбачено автоматизоване формування розрахункових сполучень зусиль (РСЗ) у відповідності до вимог будівельних норм.

Вибір РСЗ у проектуванні завжди був трудомістким завданням через необхідність обчислення зусиль від великої кількості сполучень, подальшого аналізу великого обсягу числових даних і остаточного вибору з цього обсягу найбільш несприятливих значень РСЗ.

У ПК «ЛІРА-САПР» процес обчислення РСЗ є повністю автоматизованим з використанням алгоритму для вибору РСЗ, на основі застосування спеціальних критеріїв. У загальному випадку напружено-деформованого стану критерієм визначення небезпечного РСЗ слугують екстремуми пружного потенціалу в будь-якій точці тіла при дії на нього зусиль від багатьох завантажень. У такій постановці легко враховуються особливості напруженого стану скінчених елементів різного типу. Це дозволяє значно скоротити кількість розглянутих РСЗ без втрати найбільш небезпечних із них.

Наприклад, для стержневих елементів завдання вибору РСЗ зводиться до знаходження екстремальних значень нормальних і дотичних напружень, які обчислені у характерних точках перерізу. Тому і критеріями тут є екстремальні напруження в цих точках перерізу. В елементах плоского напруженого стану, плитах і оболонках, завдання вибору РСЗ зводиться до розгляду огинаючих кривих напружень залежно від кута нахилу головних площадок.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 112

Щоб усвідомлено скористатися автоматизацією РСЗ користувач повинен ознайомитися із загальними правилами формування РСЗ в ПК «ЛІРА-САПР». Коротко ці правила можна сформулювати так:

- параметри РСЗ задаються для кожного завантаження;
- кожне РСЗ належить до одного з передбачених нормативними документами видів сполучень.


У програмному комплексі реалізовано дев'ять видів завантажень, за допомогою яких програмно забезпечується їх коректний логічний взаємозв'язок. При цьому існує можливість врахування знакозміни, взаємовиключення та супутності/ супроводження завантажень. Кожному з видів завантажень присвоєний номер:

- 1 – постійне;
- 2 – тимчасове тривале;
- 3 – короткочасне;
- 4 – кранове;
- 5 – гальмівне;
- 6 – сейсмічне;
- 7 – особливе/епізодичне (крім сейсмічною);
- 8 – миттєве;
- 9 – вітрове статичне при врахуванні пульсації вітру/неактивне.

Як бачимо, наведена вище класифікація дещо відрізняється від нормативної. Наприклад, снігове завантаження або ожеледь не виділені в окрему групу. Проте користувач може на свій розсуд призначити їм вид завантаження – або тривале, або короткочасне, що й обумовлено в нормах.

Програмним комплексом автоматично (за замовчуванням) генеруються параметри, що відповідають поточному виду завантаження. Однак користувач може на власний розсуд змінити будь-який із параметрів.


Усі операції щодо формування РСЗ виконуються за допомогою діалогового вікна


Розрахункові сполучення зусиль, яке викликається кнопкою  **Таблиця РСЗ** панелі РСЗ на вкладці «Розрахунок» (рис. 4.26).

Дані для формування РСЗ можуть бути введені до розрахунку в режимі **Розрахункова схема**, або після розрахунку в режимі **Результати розрахунку**.

4.14 Збереження розрахункової схеми

Збереження інформації про розрахункову схему можна виконати кількома способами:

1) **Збереження поточної задачі під вихідним ім'ям.** Для збереження інформації про розрахункову схему відкрийте **Меню Програми** та оберіть пункт **Зберегти** (кнопка  на панелі швидкого доступу). При цьому в робочому вікні залишається поточна схема і ВІЗОР-САПР може продовжувати роботу над нею. Операція може використовуватися для проміжного збереження даних.

2) **Збереження поточної задачі під іншим ім'ям.** Відкрийте **Меню Програми** та оберіть пункт  **Зберегти як**. У випадковому діалоговому вікні **Зберегти як** задайте:

- ім'я задачі;
- папку, в яку буде збережена ця задача (за замовчуванням обирається папка – **Data**);
- натисніть кнопку **Зберегти**. При цьому поточна задача в активному вікні отримує нове ім'я.

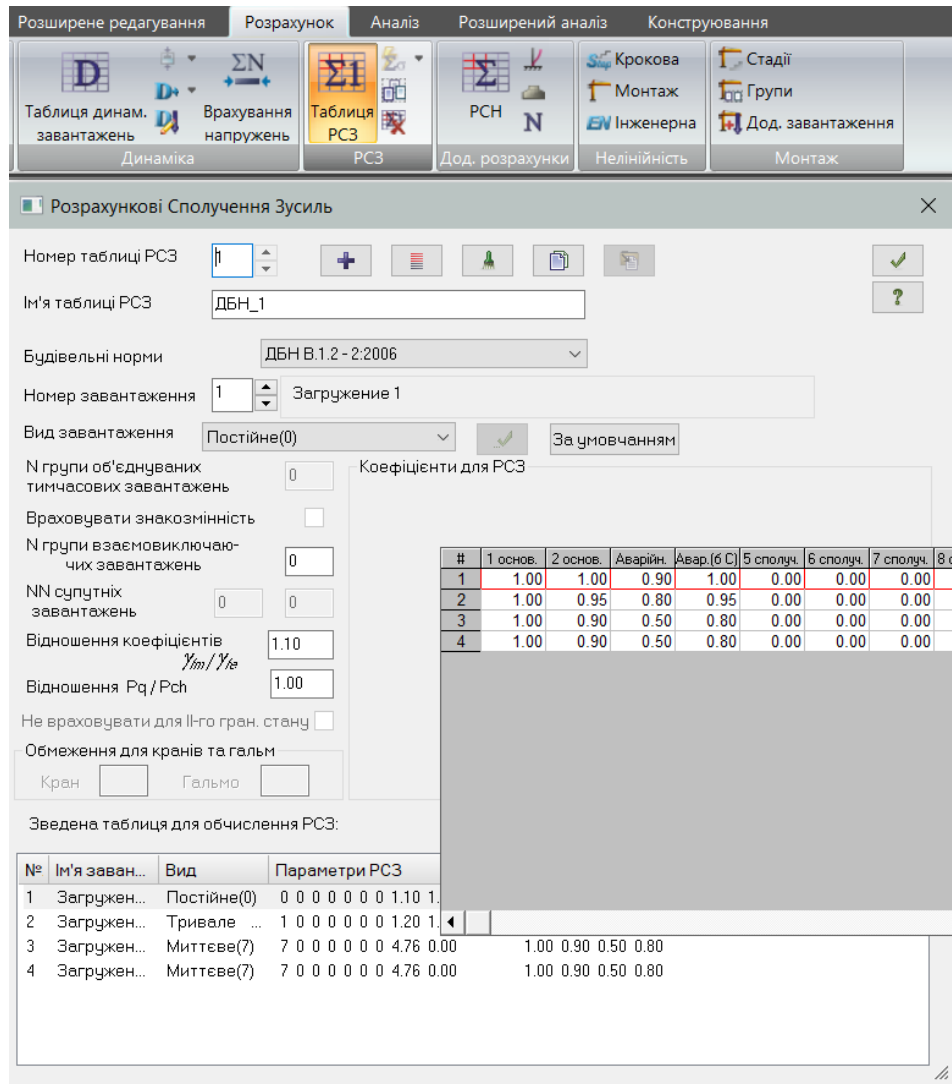



Рисунок 4.26 – Розташування команди  **Таблиця РСЗ** в стрічковому меню (зверху) для виклику діалогового вікна **Розрахункові сполучення зусиль** (знизу)

3) **Автозбереження.** Відкрийте **Меню Програми** → **Налаштування** → **Параметри налаштування**, закладка **Автозбереження**. За допомогою даної команди автоматично створюється файл автозбереження через інтервал часу, встановлений у поле **Хвилини** (введіть число від 1 до 120). Якщо комп'ютер «завис» (не відповідає), у разі несподіваного вимкнення електроенергії або пошкодження вихідного файлу задачі, можна відновити інформацію за допомогою файлу автозбереження. Файл автозбереження може містити інформацію, яка в іншому випадку могла би бути втрачена з вихідного файлу.


Файл автозбереження розміщений у тому самому каталозі, де збережений вихідний документ. Щоб відкрити файл автозбереження у діалоговому вікні **Відкрити** необхідно встановити фільтр по файлах автозбереження.

*Увага! Файл автозбереження не замінює команди  **Зберегти**, яка необхідна для зберігання повної інформації у файлі після завершення роботи з ним.*

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 114

4.15 Виконання розрахунку


4.15.1 Нормальне виконання розрахунку

Розрахунок підготовленої моделі на задані навантаження виконується в режимі повної автоматизації. Команда  **Виконати повний розрахунок** (панель *Розрахунок* на вкладці «**Розрахунок**») завантажує модель у розрахунковий процесор і починається розрахунок. У нижній частині екрана виводяться повідомлення про виконання етапів розрахунку.

Повідомлення, що відображають процес виконання завдання, утворюють «**Протокол розрахунку**». Це важливий документ, він зберігається в окремому файлі і його можна прочитати. Якщо все пройшло успішно, протокол закінчується словами «**ЗАВДАННЯ ВИКОНАНО**. Витрачений час ... хв».

Після завершення розрахунку програмним комплексом утворюються файли, що містять вихідні дані, модель, протокол розрахунку та результати.

4.15.2 Аварійне закінчення розрахунку

Не завжди розрахунок проходить успішно. Трапляються випадки, коли розрахунок закінчується повідомленням «**ЗАВДАННЯ НЕ ВИКОНАНЕ**». У цьому разі необхідно виконувати наступні рекомендації. Насамперед потрібно уважно прочитати повідомлення, які в процесі розрахунку виводяться в протоколі. Це можна зробити завдяки прокручуванню тексту протоколу у зворотному порядку. Якщо повідомлень багато і важко їх прочитати у вузькому текстовому вікні екрана, можна весь протокол викликати на екран за допомогою команди  **Протокол рішення** (панель **Розрахунок** на вкладці «**Розрахунок**»).

У протоколі спочатку можуть бути попередження, які не впливають на нормальне завершення розрахунку. У кінці протоколу розташовані повідомлення про причини зупинки розрахунку.

Багато повідомлень будуть зрозумілі для вас, і можна буде одразу ж виконати необхідні виправлення. Усі аварійні помилки пов'язані із помилками в початкових даних. Типові помилки такі:

- не задано або не у повному обсязі задано закріплення;
- не задано або некоректно введено жорсткості. Некоректно в даному разі означає, що серед жорсткостей є різниця в значеннях в 106 і більше разів.
- не задано навантаження або не в повному обсязі сформована таблиця РСЗ;
- у розрахунковій схемі введено шарніри, що роблять систему геометрично змінюваною;
- у процесі коригування розрахункової схеми в ній виявилися елементи, що не мають в'язей у вузлах.

Запитання для самоконтролю

Список використаних джерел

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 122 / 115</i>

1. Основи комп'ютерного моделювання: Навчальний посібник / М.С. Барабаш, П.М. Кір'язєв, О.І. Лапенко, М.А. Ромашкіна. Київ: Книжкове видавництво НАУ, 2018. 492 с.

2. Програмне забезпечення інженерних розрахунків: конспект лекцій для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» всіх форм навчання / Укладач: Сорочак А.П. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. 128 с.

3. LIRALAND Group, 2002 – 2024: Офіційний веб-сайт компанії-розробника ПК «ЛІРА-САПР». URL: <https://www.liraland.ua>.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 116

Тема 5. Документування результатів розрахунку

5.1 Поняття про результати розрахунку конструкцій

Розраховувач-проектувальник береться за роботу, коли місце зведення будівлі, його форма і призначення визначені й архітектурна модель будівлі вже готова. Зазвичай в його розпорядження надходить архітектурна модель будівлі. Проектувальник повинен спроектувати та спрогнозувати поведінку безліч систем: ґрунтової основи будівлі, самої будівлі під різними впливами, систем сонячного і штучного освітлення, мереж електро-, водо й теплопостачання, вентиляції, виконати калькуляцію обсягів робіт, скласти кошторис тощо.

Проектні розрахунки несучих конструкцій будівлі поділяють на розрахунки за першою і другою групами граничних станів.

Групи граничних станів

Граничні стани споруд за ступенем можливих наслідків поділяють на дві групи:

перша група – стани, коли відбувається вичерпання несучої здатності споруд за відповідних комбінацій навантажень, які можуть також супроводжуватися руйнуваннями будь-якого виду, перетворенням системи в механізм, утворенням і тріщин, ланцюга пластичних шарнірів тощо;

друга група – стани, коли порушується нормальна експлуатація споруд або вичерпується ресурс їх довговічності внаслідок появи неприпустимих деформацій, коливань та інших порушень, які потребують тимчасовою призупинення експлуатації споруди та виконання її ремонту.

Місце результатів розрахунку будівельних конструкцій серед інших розрахунків

Перше, що робить проектувальник після отримання архітектурних планів – виділяє з будівлі його несучі елементи. Визначає розміри й матеріали цих несучих елементів. Саме від проектувальника залежить, які стіни будуть несучими, а які ні. Де потрібна балка, а де ні. Саме проектувальник визначає, на які навантаження потрібно виконати розрахунок сформованої ним несучої частини. Несуна частина будівлі або споруди по-іншому називається *остов, каркас, будівельна конструкція* або просто *конструкція* будівлі. Результатом проектування будівельних конструкцій є модель каркаса будівлі, тобто інформація про розміщення несучих частин будівлі в просторі та їх матеріали. Таку модель у будівництві зазвичай називають *розрахунковою схемою*. В комп'ютерній програмі цю схему в останній час частіше називають *моделлю*. Коли йдеться про розрахунок будівельної конструкції, мають на увазі розрахунок каркаса будівлі за першою і другою групами граничних станів.

Розрахунок будівельної конструкції передусім передбачає розрахунок за першою групою граничних станів: на міцність, стійкість, витривалість, крихке руйнування тощо. Та почасти розрахунок конструкцій зачіпає і другу групу граничних станів: розрахунок осідання ґрунтової основи, розрахунок на ширину розкриття тріщин залізобетонних елементів, розрахунок допустимості прогинів елементів конструкції. Ще раз наголосимо на винятковій відповідальності, що лежить на розрахунку за першою групою граничних станів. Справді, якщо конструкція досягне граничного стану другої групи, наприклад, прогин підкранової балки буде занадто великий, то кран не зможе рухатися і просто зупинить технологічний процес. Досягнення ж

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 117

конструкцією граничного стану першої групи загрожує руйнуванням і падінням тієї самої підкранової балки, що може призвести до людських жертв.

Завдання побудови моделі надійного каркаса будівлі вирішують методом послідовних наближень. Спочатку задаються певним каркасом, обчислюють його стан під навантаженням. Далі, якщо він виявляється незадовільним, вносять у каркас корективи, і перераховують його, і так до тих пір поки каркас під навантаженням не стане задовольняти всі вимоги першої і другої груп граничних станів.

Аналіз каркаса під навантаженням або, термінами будівельної механіки, аналіз НДС конструкції полягає у вивченні зусиль і напружень, деформацій і переміщень, форм коливань та втрати стійкості будівельної конструкції. Перед розрахувачем стоїть завдання переконатися в адекватності НДС і вибрати відповідні матеріали – бетон, арматуру, металеві профілі – які мають достатню міцність для такого НДС.

5.2 Компоненти напружено-деформованого стану конструкції

Переважаюча частина розрахунків конструкцій будівель виконується нині за допомогою спеціалізованих комп'ютерних програм. У них конструкція дискретизується, тобто поділяється на елементарні частини, а потім досліджується стан кожної з таких елементарних частин. Метод скінченних елементів, який використовується в більшості програм розрахунку будівельних конструкцій, обчислює компоненти НДС елементів конструкції, які наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунку за методом скінченних елементів

Елемент	Роль у МСЕ моделі	Графічне зображення	Компоненти НДС
Вузол	Зв'язує інші елементи	Точка	Лінійні переміщення вздовж осей X, Y, Z ; повороти навколо осей X, Y, Z
Стержень	Моделює колони, балки, елементи в'язей або ферми	Відрізок	Нормальна сила N ; поперечні сили Q_y, Q_z ; крутний mX і згинальні моменти M_y, M_z
Пластина	Моделює елементарну частину плити, стіни, оболонки	Три- або чотирикутник	Нормальні напруження N_x, N_y ; дотичні напруження T_{xy} ; згинальні моменти M_x, M_y, M_{xy} ; поперечні сили Q_x, Q_y
Об'ємний елемент	Елементарна частина масивних залізобетонних елементів, ґрунтового масиву	Піраміда, призма	Нормальні напруження N_x, N_y, N_z ; дотичні напруження T_{xy}, T_{xz}, T_{yz}

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 118

Фізичний зміст компонентів НДС стержнів відомий з курсу «Опір матеріалів». На рис. 5.1 показані епюри зусиль балки на двох опорах, під впливом зосередженої сили в середині прольоту. Напрямки дії напружень і зусиль, що виникають у пластинах і об'ємних елементах, показані на рис. 5.2.

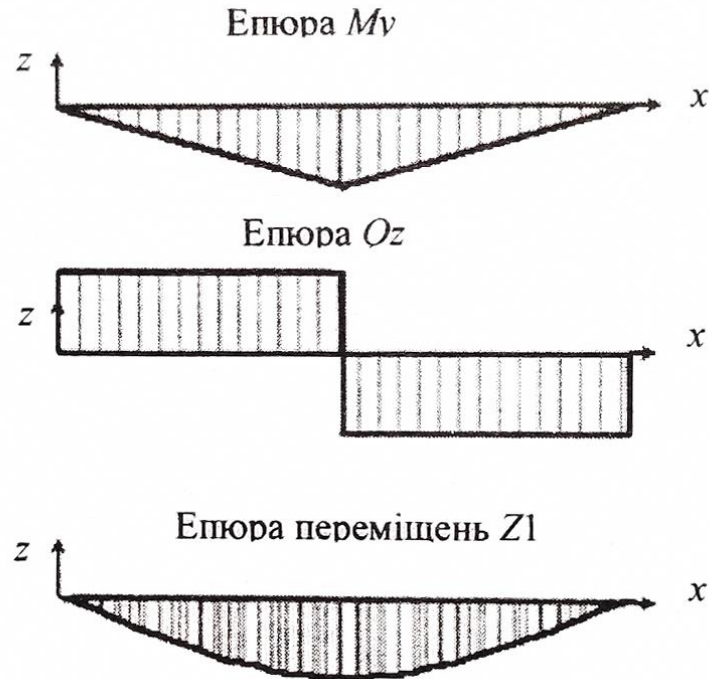


Рисунок 5.1 – Епюри зусиль і переміщень в стрижневому елементі (балці)

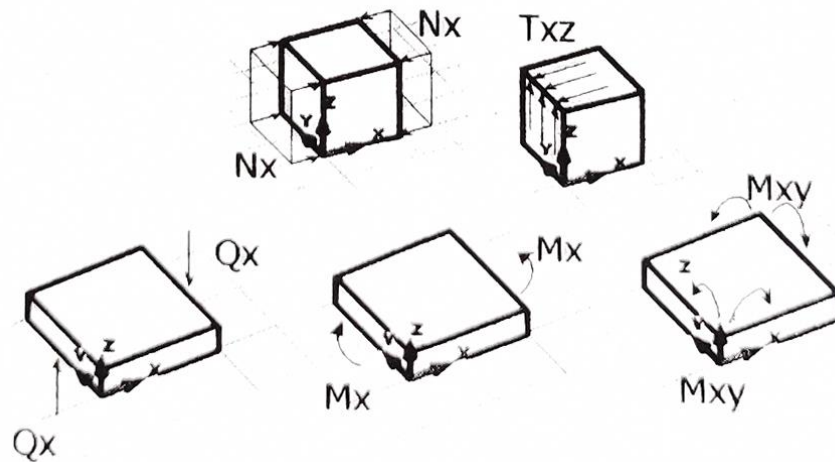


Рисунок 5.2 – Напруження і зусилля в пластинах та об'ємних елементах

Нормальні напруження N_x , N_y , N_z викликають стиснення або розтягнення паралельно напрямку однойменних осей системи координат.

Дотичні напруження викликають зрушення паралельних площин вздовж напрямку своєї дії. Так, напруження T_{xz} викликає зсув площин, паралельних площині XU у напрямку X і рівний йому зсув площин YZ у напрямку Z . Аналогічно, зсувне напруження T_{xy} викликає зсув у напрямках X та Y , а зсувне напруження T_{yz} викликає зсув у напрямках Y і Z . Зусилля Q_x , Q_y , M_x , M_y , M_{xy} обчислюються тільки в плитах і

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 119

оболонках. Для пояснення фізичного змісту цих величин скористаємося балковою аналогією. Уявімо собі прямокутну плиту завширшки 1 м, яка обперта як балка на двох опорах (рис. 5.3).

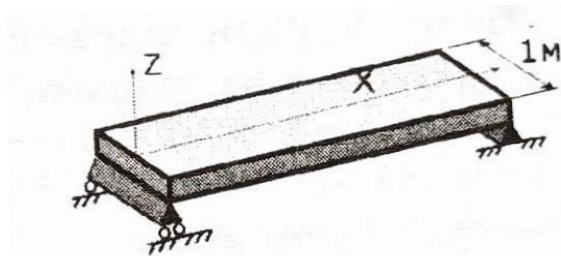


Рисунок 5.3 – Балкова аналогія для розуміння зусиль в плиті

При згині такої плити виникатиме згинальний момент, що дорівнює M_x , і поперечна сила, що дорівнює Q_x . Таким чином, момент M_x і поперечна сила Q_x є балковим моментом і балковою поперечною силою, що діють на 1 м ширини плити при згині в площині XZ . Аналогічно, момент M_y і сила Q_y діють на 1 м ширини плити при її згині в площині YZ . Так само плитний крутний момент M_{xy} можна розуміти як крутний момент у балці метрової ширини, за тим винятком, що в плиті він діє як у площині XZ , так і в площині YZ .

5.3 Інструменти створення документації про результати аналізу напружено-деформованого стану

Як уже було наголошено вище, для розрахунку конструкції сучасні комп'ютерні програми розбивають її на безліч простих сутностей – *скінченних елементів*. Для великих задач кількість таких простих сутностей може сягати кількох мільйонів. Завдання розрахувача не пропустити жодного скінченного елемента, у якому НДС не відповідає заданим матеріалам. Щоб відстежити це, в програмах аналізу результатів розрахунку конструкції передбачені різні інструменти. *Інструменти аналізу результатів можуть бути графічними й табличними*.

У графічних інструментах аналізу інформація виводиться кольором безпосередньо на зображенні розрахункової схеми. Основними інструментами графічної візуалізації результатів розрахунку є *епюри*, *мозаїки* та *ізополя*. Так, на рисунку 5.4 зображено плиту, на якій кольором забарвлені області близьких за значенням напружень у вигляді ізополів і мозаїки, а на рис 5.5 – стержні, у яких значення згинального моменту зображено у вигляді епюр і мозаїки. Прокоментуємо тільки мозаїки й ізополя. Як на мозаїці, так і на ізополях одним і тим самим кольором зображають скінченні елементи або фрагменти скінченних елементів, у яких виникають результати одного діапазону. Так, на рис. 5.4 діапазонів п'ять: два діапазони від'ємних значень від - 11 до -3,48 і від -3,48 до 0,11; діапазон нульових значень від -0,11 до 0,11; два діапазони додатних значень від 0,11 до 3,48 і від 3,48 до 11 тс/м². Кожному з п'яти діапазонів присвоєно власний колір, який відображається на колірній шкалі вгорі рисунка. Якщо значення результату розрахунку елемента лежить у межах діапазону, то скінченний елемент забарвлюється на мозаїці в колір, що відповідає цьому діапазону. Ізополя виводять ті самі значення, що й мозаїка, але для зручності читання межі діапазонів округлюють.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 120

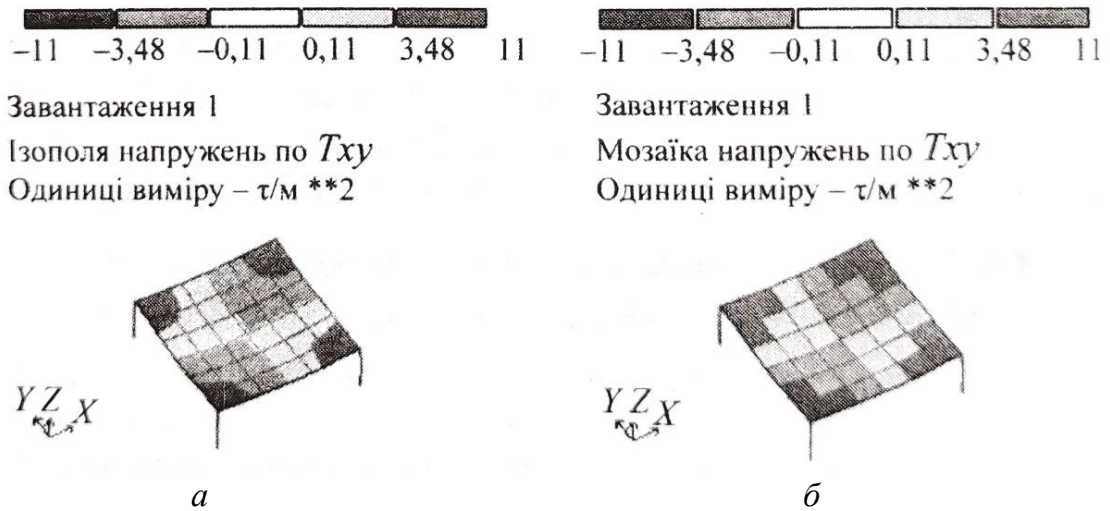


Рисунок 5.4 – Графічне зображення дотичних напружень у плиті:
а – у вигляді ізополів; б – у вигляді мозаїки

Як видно із зображень ізополів, епюри й мозаїки можуть будуватися за деформованою і вихідною схемами. У деформованій схемі координати вузлів відрізняються від вихідних на величину переміщення, що виникає внаслідок прикладених навантажень, при чому для більшої наочності переміщення множиться на масштабний коефіцієнт.



Рисунок 5.5 – Графічне зображення згинальних моментів M_y у вигляді:
а – епюри; б – мозаїки

Табличні інструменти аналізу результатів виводять результати розрахунку у формі таблиць, у яких можна виконувати сортування й відшукувати результати потрібного діапазону. Так, на рисунку 5.6 зображено таблицю зусиль і напружень у пластинах відсортовану за номерами скінчених елементів, у якій номери елементів менші ніж 56 виводяться синім шрифтом, «а понад 57 – червоним шрифтом.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 121

Э.	▲ ЭЛЕМ	NX, т/м**2	NY, т/м**2	TXU, т/м**2	MX, (т*м)/м	MY, (т*м)/м	MXU, (т*м)/м	QX, т/м	QU, т/м
1	55	-12.9482	-12.9353	10.9667	-.696005	-.728730	.723379	1.68210	-1.35393
2	55	-1.81339	-.001346	-1.86906	.374241	.112642	-.031517	-.081674	.190544
1	56	-11.1886	-2.83773	5.66795	.559912	-.426344	.527225	.774248	-2.48312
2	56	-1.88984	.337265	-2.02346	.234041	.085143	.019927	-.174348	.109916
1	57	-10.1882	-1.11383	1.30184	1.11082	-.336130	.172421	.241905	-3.01234
2	57	-2.25926	.066729	-1.74425	.071435	.028215	.032306	-.180602	.028349
1	582	1.42075	3.21265	-1.97451	-.786397	-.779317	.742045	1.53118	-1.53555
2	582	-3.01711	-.655954	-1.19713	1.41968	.420999	-.120186	-.286358	.789872
1	583	.953171	.498674	-.836787	.379814	-.508531	.527324	.747723	-2.45104
2	583	-3.02909	.126540	-1.69453	.921066	.317742	.083043	-.648569	.431668

Рисунок 5.6 – Табличне подання зусиль і напружень у пластинчастих скінченних елементах

Ітераційна процедура моделювання та аналізу результатів

Процедура побудови розрахункової схеми й аналізу результатів її розрахунку є ітераційною, тобто повторюється кілька разів. Таке твердження пов'язане з тим, що, як правило, неможливо з першого разу безпомилково побудувати бажану розрахункову схему. Аналіз результатів саме і є індикатором, за допомогою якого можна визначити, працює розрахункова схема під навантаженням так, як передбачалося під час її створення, чи ні.

Крім того, що результати показують, чи правильно побудована розрахункова схема, результати також можуть показати, чи безпомилкова сама програма. Маючи приклади із задалегідь відомими результатами, розрахованими аналітично, тобто «вручну», можна легко визначити придатність програми. *Процедура оцінювання достовірності результатів, що видаються програмою для відомих випадків, називають верифікацією.* Зрозуміло, для навчальних проектів верифікацію програми не виконують, але перед тим, як використовувати програму в розрахунку реальних будівель, розумно і безпечно виконати верифікацію програми хоча б у тій її частині, яка буде використана далі в розрахунку вашої реальної будівлі.

Етапи аналізу результатів

Комп'ютерна програма являє собою не що інше як конвеєр оброблення даних. Якщо вихідні дані, прийняті програмою, правильні, то й результат їх оброблення, швидше за все, буде правильним. Якщо прийняті дані неправильні то й результат буде неправильним. Взагалі для будь-якого програмного забезпечення діє принцип «що посієш, те й пожнеш».

Безглуздо після натискання кнопки «Розрахунок» одразу ж починати вписувати на папірець підібрану арматуру або сталеві поперечні перерізи. У дев'яноста дев'яти випадках зі ста ці цифри будуть абсурдними! Спочатку необхідно пройти ланцюжок оцінювання адекватності результатів. Таке оцінювання не є кількісним, не потребує перерахунку розрахункової схеми «вручну» і слугує для виявлення відверто сумнівних місць.

Отже, *першим етапом* в оцінюванні адекватності результатів буде оцінювання деформованої схеми.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-23.05- 05.01/192.00.1/Б/ВК.2.Х- 01-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 122 / 122

На рисунку 5.7 *а* показано плиту, обперту на чотири колони. Очевидно, що вид деформованої схеми, зображений на рисунку 5.7 *б*, демонструє помилку – один із країв плити не працює спільно з колоною. На рисунку 5.7 *в* цю помилку виправлено.

Другий етап – оцінювання зусиль і напружень у розрахунковій схемі. Приклад виведення зусиль показано на рисунках 5.4-5.6. Тут необхідно визначити, чи не виникають в елементах надто великі зусилля, або, навпаки, чи немає серед елементів, що мають істотно навантаження, нульових стержнів або пластин. Тобто таких стержнів і пластин, у яких зусилля нульові чи близькі до нуля. У цьому можуть суттєво допомогти мозаїки, ізополя, епюри.

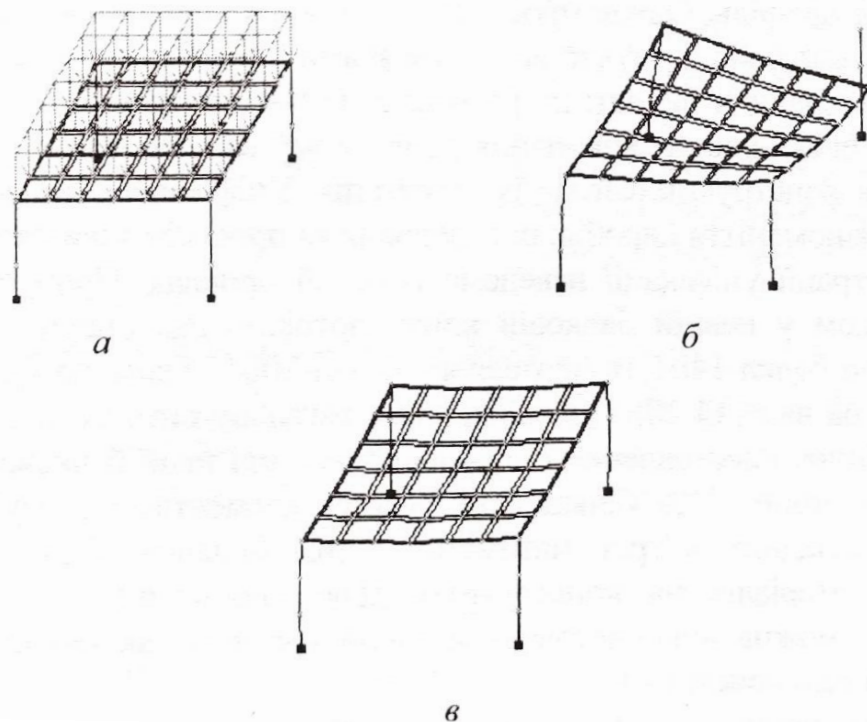


Рисунок 5.7 – Оцінювання правильності побудови розрахункової схеми за деформованою схемою:
а – плита, обперта на чотири колони; *б* – один із країв плити не працює спільно з колоною»; *в* – краї плити працюють спільно з колоною

І тільки на наступному, *третьому, етапі* можна починати вибирати матеріали для вже доведеного до адекватного НДС: бетон, арматуру чи металеві профілі.

Список використаних джерел

1. Основи комп'ютерного моделювання: Навчальний посібник / М.С. Барабаш, П.М. Кір'язєв, О.І. Лапенко, М.А. Ромашкіна. Київ: Книжкове видавництво НАУ, 2018. 492 с.
2. LIRALAND Group, 2002 – 2024: Офіційний веб-сайт компанії-розробника ПК «ЛІРА-САПР». URL: <https://www.liraland.ua>.