

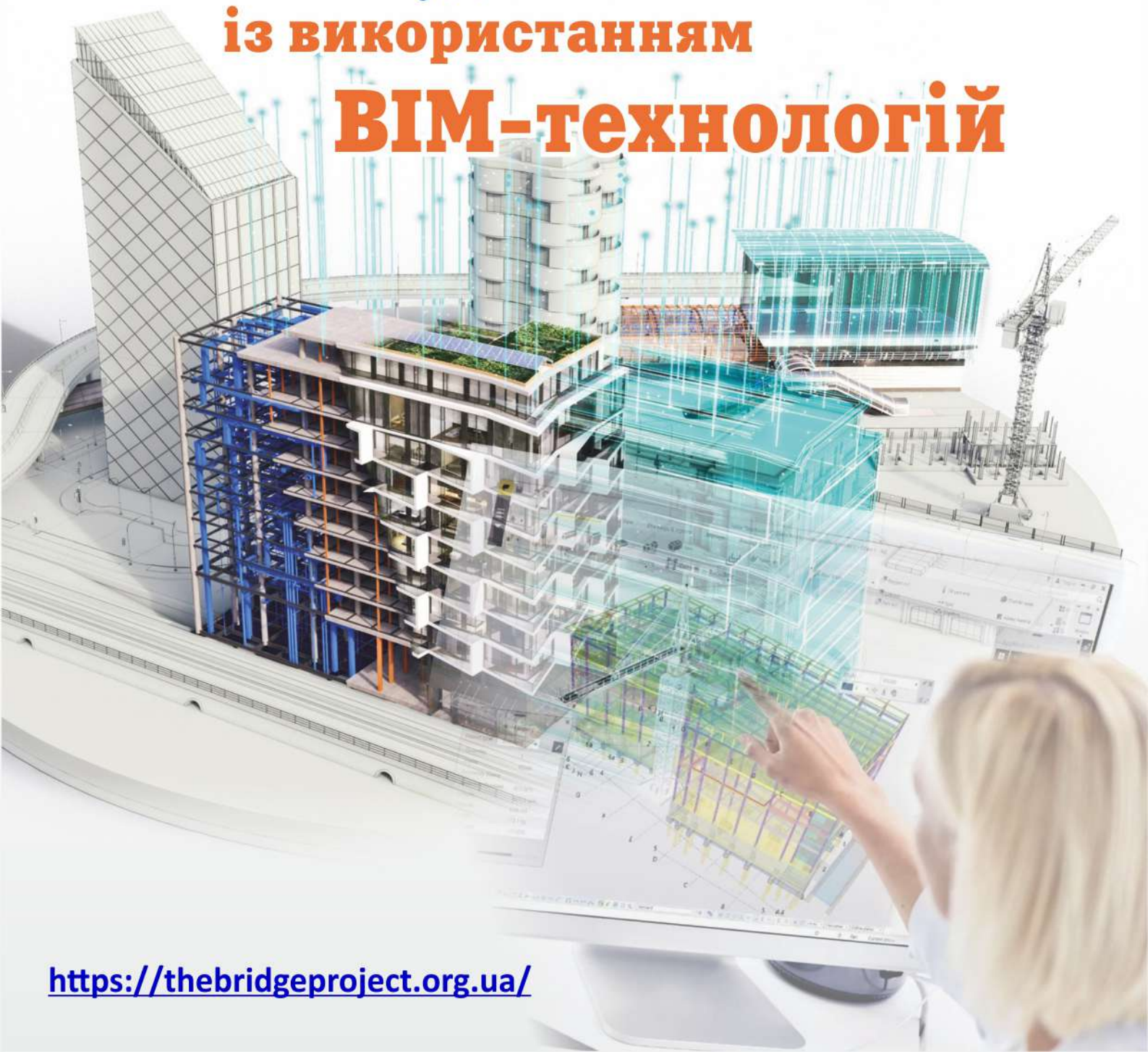


Co-funded by
the European Union

The **Bridge** IM architecture
engineering
construction

Практикум

СУЧАСНІ ПІДХОДИ до проєктування, аналізу та оцінки будівельних систем із використанням BIM-технологій



<https://thebridgeproject.org.ua/>

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПРОЄКТУВАННЯ, АНАЛІЗУ ТА ОЦІНКИ БУДІВЕЛЬНИХ СИСТЕМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІМ- ТЕХНОЛОГІЙ

Практикум

За ред. Ю. В. Булгакової та Н. С. Чернової

Проект співфінансується Європейським Союзом, проте висловлені погляди та думки належать лише авторам цього проекту і не обов'язково відображають погляди Європейського Союзу чи Європейського виконавчого агентства з питань освіти та культури. Ні Європейський Союз, ні грантодавець не можуть нести за них відповідальність.

Дніпро

2025

Практикум рекомендовано до друку рішенням Вченої ради Українського державного університету науки і технологій МОН України, протокол № 1 від 24.09.2025 р.

Авторський колектив: М. Г. Болотов, Т. Р. Ганєєв, І. І. Давидов, В. А. Загільський, В. В. Ковба, Д. В. Левківський, В. В. Малахов, А. С. Москвітін, О. Р. Позняк, Н. В. Пуштіна, С. Г. Рибачов, М. М. Руденко, В. Л. Сєдін, М. М. Сорока, М. Г. Сур'янінов, Р. Ю. Титаренко, Р. Є. Хміль, В. П. Чабан, В. І. Шеховцов.

За ред. Ю. В. Булгакової, Н. С. Чернової.

Наукові редактори:

Ю. В. Булгакова, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління комерційною діяльністю залізниць, Національний транспортний університет (м. Київ);

Н. С. Чернова, кандидат економічних наук, доцент кафедри економіки і менеджменту, Український державний університет науки і технологій (м. Дніпро).

Рецензенти:

І. І. Назаренко, Президент Академії будівництва України, доктор технічних наук, професор, машин і обладнання технологічних процесів Київський національний університет будівництва і архітектури, заслужений діяч науки і техніки України (м. Київ);

М. М. Бабенко, кандидат технічних наук, доцентка кафедри інженерії та фізики матеріалів, Словацький технічний університет у Братиславі (м. Братислава).

Сучасні підходи до проектування, аналізу та оцінки будівельних систем із використанням BIM-технологій : практикум / М. Г. Болотов, Т. Р. Ганєєв, І. І. Давидов та ін.; за ред. Ю. В. Булгакової та Н. С. Чернової ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 228 с.

ISBN 978-617-8314-79-8 (PDF)

У практикумі представлено матеріали науково-практичних досліджень, виконаних у межах реалізації міжнародного проекту програми Європейського Союзу Erasmus+ «The BRIDGE – Bridging Innovations, Knowledge and Skills for Integrating Digitalization in the Ukrainian Construction Sector».

Розглянуто сучасні підходи до проектування, аналізу та оцінки будівельних систем із використанням BIM-технологій, а також інноваційні рішення для забезпечення енергоефективності, точності розрахунків і взаємодії між програмними середовищами. Матеріали охоплюють питання термoeфективності екоорієнтованих модульних будинків, моделювання історичних будівель на основі хмари точок, використання BIM у конструктивному проектуванні, розрахунку металевих і залізобетонних конструкцій, аналізу взаємодії фундаментів із ґрунтовим середовищем, а також розробки моделей мікроклімату громадських будівель.

Видання призначене для науково-педагогічних працівників, аспірантів, здобувачів вищої освіти, а також фахівців у галузі будівництва, архітектури, енергетики та цифрового моделювання, які цікавляться практичним застосуванням BIM-технологій у навчальному процесі та професійній діяльності.

УДК 624.01:004.942(075.8)



Цей твір ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons

[«Attribution-NonCommercial-ShareAlike» 4.0 International \(CC BY-NC-SA 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

[\(«Із зазначенням авторства – Некомерційна – Поширення на тих самих умовах» 4.0 Міжнародна\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

*М. Г. Сур'янінов,
М. М. Сорока,
Н. В. Пуціна*

ВСТУП

Даний практикум розроблений у рамках дисципліни «Інформаційне моделювання в будівельній механіці» освітньо-наукової програми «ВІМ інжиніринг».

Метою практикума є засвоєння методики використання ПК ЛІРА-САПР для розрахунку несучої здатності рам.

Коротко наведені теоретичні положення та припущення, методика визначення граничного навантаження прямим методом з прикладом розрахунку.

При викладанні методики використання ПК ЛІРА-САПР описано покроковий алгоритм дій при виконанні розрахунку.

У додатку наведені вихідні дані, за якими здобувачі повинні самостійно виконати розрахунок несучої здатності рам з використанням ПК ЛІРА-САПР.

1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ПРИПУЩЕННЯ

Розрахунок несучої здатності рами виконується в рамках наступних припущень [1].

1. Розглядається плоска рама, що знаходиться в умовах простого статичного навантаження.
2. Поперечний переріз рами переходить в пластичний стан тільки під впливом згинальних моментів, вплив поздовжніх та поперечних сил не враховується.
3. Перерізи, в яких згинальний момент менше граничного, працюють в умовах закону Гука.
4. Пластичний шарнір утворюється в перерізі, де діє граничний момент.
5. Взаємний поворот перерізів, прилеглих до пластичного шарніру, необмежено зростає без зростання згинального моменту.
6. При дії граничного навантаження рама, або її частини не втрачають стійкості.
7. При визначенні граничного моменту для залізобетонного перерізу враховується тільки розтягнута арматура.

Для визначення параметру граничного навантаження і побудови граничної епюри моментів і схеми пластичного руйнування рами можуть бути використані декілька методів.

В даному практикумі розглянутий прямий метод [2], оснований на поетапному розрахунку рами при зростанні параметру навантаження з встановленням на кожному етапі простого шарніру в перерізі, де утворився пластичний шарнір. Метод дозволяє розглянути всі стадії роботи рами: її пружну роботу, пружно-пластичну роботу і стадію руйнування, але потребує багаторазових статичних перерахунків.

2. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРЯМИМ МЕТОДОМ

Алгоритм розрахунку несучої здатності рами прямим методом коротко можна описати так:

1. Статичний розрахунок рами з параметром навантаження ΔF .

2. Для кожного з розрахункових перерізів рами записується умова пластичності $|M_j| \leq M_{0j} \quad (j=1,2,\dots,s),$ (2.1)

де M_{0j} – величина граничного моменту в перерізі "j"; M_j – момент, що виникає в перерізі "j" від дії навантаження з параметром ΔF ; s – кількість розрахункових перерізів рами.

Встановлюється величина навантаження ΔF^I , що відповідає появі першого пластичного шарніру

$$\Delta F^I = \min \left(\frac{M_{0j}}{|M_j|} \right) \quad (j=1,2,\dots,s), \quad (2.2)$$

Перший пластичний шарнір утворюється в перерізі, де виконується умова (2.2).

3. Будується епюра моментів $M_{гр}^I$, що відповідає навантаженню ΔF^I .

$$M_{гр,j}^1 = \Delta F^1 M_j, \quad (2.3)$$

4. В перерізі, де утворився пластичний шарнір, встановлюється простий шарнір. Тим самим усувається можливість зміни згинального моменту в даному перерізі при подальшому зростанні параметру навантаження.

5. Якщо рама, чи її частина стала геометрично змінною, перейти до п. 10.

6. Виконується статичний розрахунок рами із встановленим шарніром при дії параметру навантаження ΔF .

7. Встановлюється переріз, де утворюється наступний пластичний шарнір і приріст параметру навантаження ΔF^i , що призводить до його появи. Для цього використовується залежність

$$|M_{гр,j}^{i-1} + \Delta F^i M_j| \leq M_{0,j}, \text{ або } \begin{cases} +(M_{гр,j}^{i-1} + \Delta F^i M_j) \leq M_{0,j} \\ -(M_{гр,j}^{i-1} + \Delta F^i M_j) \leq M_{0,j} \end{cases} \quad (2.4)$$

З використанням (2.4) визначається найменше додатне значення ΔF^i і переріз, де утворюється пластичний шарнір.

8. Будується еюра моментів $M_{гр}^i$, що відповідає параметру навантаження $F = \sum_{k=1}^i \Delta F^k$:

$$M_{гр,j}^i = M_{гр,j}^{i-1} + \Delta F^i M_j \quad (2.5)$$

9. Розрахунок повторюється, починаючи з п. 4.

10. Параметр навантаження і еюра моментів, одержані в п. 8, є граничними для даної рами.

Приклад 1. Розрахунок рами прямим методом

Визначити параметр граничного навантаження, побудувати граничну епюру моментів і механізм пластичного руйнування для рами, зображеної на рис. 2.1, а.

Ступінь статичної невизначуваності рами $n=1$. Для утворення повного пластичного механізму руйнування необхідно виникнення двох пластичних шарнірів.

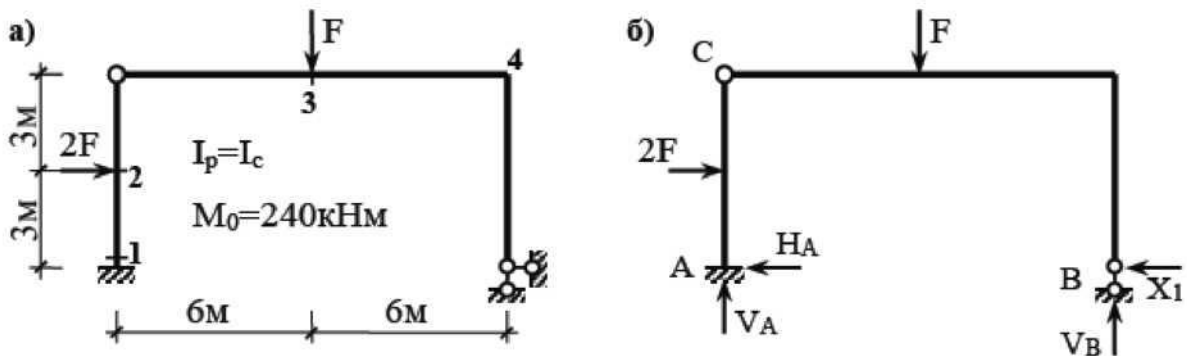


Рис. 6.1. Вихідні дані для розрахунку (а) і основна система методу сил (б)

Перший етап розрахунку

Основна система методу сил показана на рис. 2.1б, одинична і вантажна епюри моментів – на рис. 2.2а.

Канонічне рівняння методу сил:

$$\delta_{11} X_1 + \Delta_{1f} = 0.$$

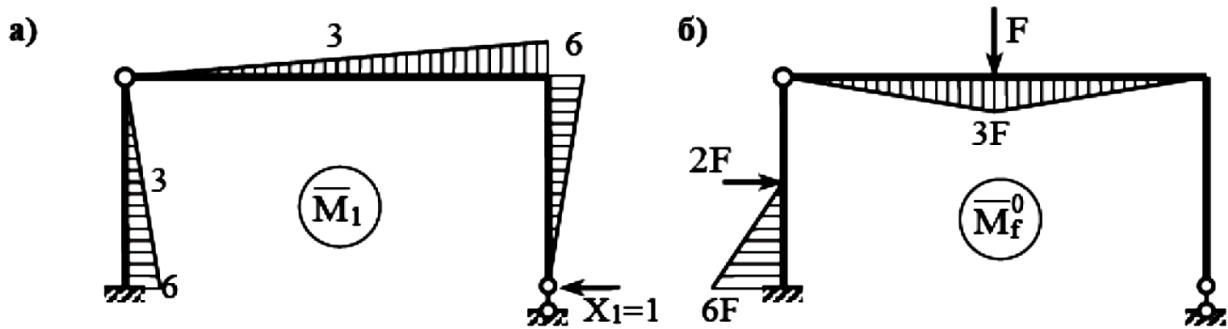
Обчислюємо одиничне і вантажне переміщення:

$$\delta_{11} = \sum \int_0^l \frac{\bar{M}_1^2}{EI} dx = \frac{1}{EI} \left[\left(\frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 6 \cdot \frac{2}{3} \cdot 6 \right) \cdot 2 + \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 12 \cdot \frac{2}{3} \cdot 6 \right] = \frac{288}{EI};$$

$$\Delta_{1f} = \sum \int_0^l \frac{\bar{M}_1 M_f^0}{EI} dx =$$

$$= -\frac{1}{EI} \left[\frac{1}{2} \cdot 6F \cdot 3 \cdot \left(3 + \frac{2}{3} \cdot 3 \right) + \frac{1}{2} \cdot 3F \cdot 6 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3 + \frac{1}{2} \cdot 3F \cdot 6 \cdot \left(3 + \frac{1}{3} \cdot 3 \right) \right] = -\frac{99F}{EI}.$$

Рис. 6.2. Одинична (а) і вантажна (б) епюри моментів



Визначаємо невідоме методу сил:

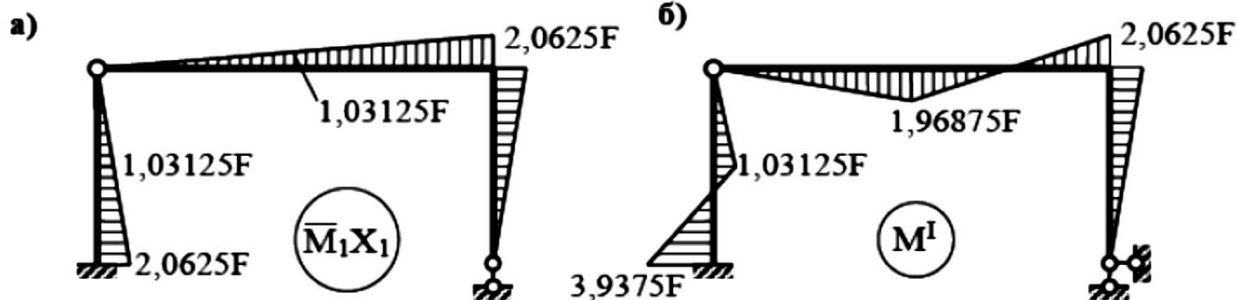
$$X_1 = -\frac{\Delta_{1f}}{\delta_{11}} = \frac{99F}{288} = 0,34375F.$$

Будуємо «пружну»
моментів першого етапу

$$M^1 = \bar{M}_1 X_1 + M_f^0 \quad \text{епюру (рис. 2.3).}$$

Рис. 6.3. «Пружна» епюра моментів першого етапу

Визначаємо параметр граничного навантаження першого етапу. Максимальний згинальний момент виникає в перерізі 1, значить, перший пластичний шарнір утворюється в цьому ж перерізі.



Прирівнюємо згинальний момент у перерізі 1 до граничного моменту і визначаємо граничне навантаження першого етапу F^I .

$$3,9375F^I = M_0;$$

$$F^I = \frac{M_0}{M_1^1} = \frac{240}{3,9375} = 60,95238 \text{ кН}.$$

$$M_{cp}^I = M^I F^I.$$

Будуємо граничну епюру моментів першого етапу розрахунку (рис. 6.4).

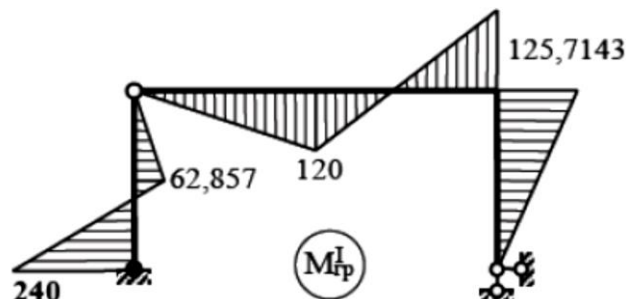


Рис. 6.4. Гранична епюра моментів першого стану

Другий етап розрахунку

Встановлюємо в перерізі 1, де утворився пластичний шарнір, простий шарнір і будуємо «пружну» епюру моментів від завантаження рами приростом навантаження ΔF (рис. 6.5). після установки простого шарніра рама стала статично визначувана.

Опорні реакції:

$$\sum m_C^{нес} = 6H_A - 3 \cdot 2\Delta F = 0;$$

$$H_A = \Delta F.$$

$$\sum X = 2\Delta F - \Delta F - H_B = 0;$$

$$H_B = \Delta F.$$

$$\sum m_A = 3 \cdot 2\Delta$$

$$V_B = \Delta F.$$

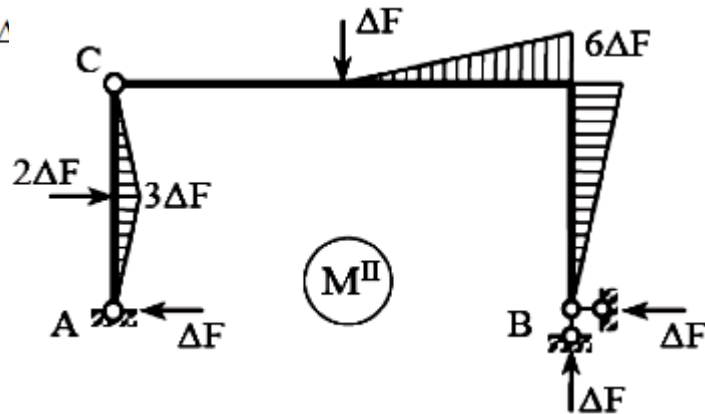


Рис. 6.5. «Пружна» епюра моментів другого етапу

Аналізуючи епюри моментів $M_{гр}^I$ і M^II , відмічаємо, що найбільші моменти виникають у перерізі 4. Виходячи із цього, визначаємо приріст параметру навантаження, при якому створюється другий пластичний шарнір:

Параметр граничного навантаження дорівнює:

$$6\Delta F + 125,7143 = 240 \Rightarrow \Delta F = 19,04762 \text{ кН}.$$

$$F_0 = F^I + \Delta F = 80 \text{ кН}.$$

Будуємо граничну епюру згинальних моментів (рис. 6.6).

$$M_{сп} = M^II \Delta F + M_{сп}^I$$

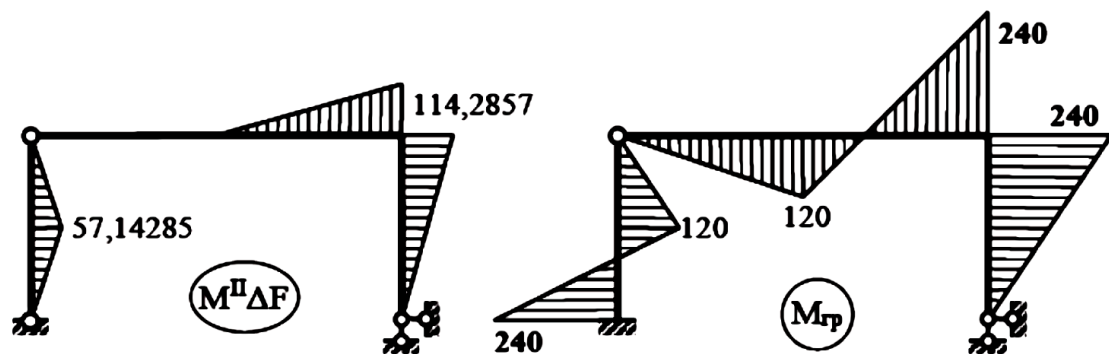


Рис. 6.6. Гранична епюра згинальних моментів

Зображаємо пластичний механізм руйнування рами (рис. 6.7) і будуємо залишкову епюру згинальних моментів (рис. 6.8), яка виникає в процесі пластичного деформування рами і не зникає після зняття зовнішнього навантаження.

$$M_{зал} = M_{сп} - M^I$$



Рис. 2.7. Пластичний механізм руйнування рами

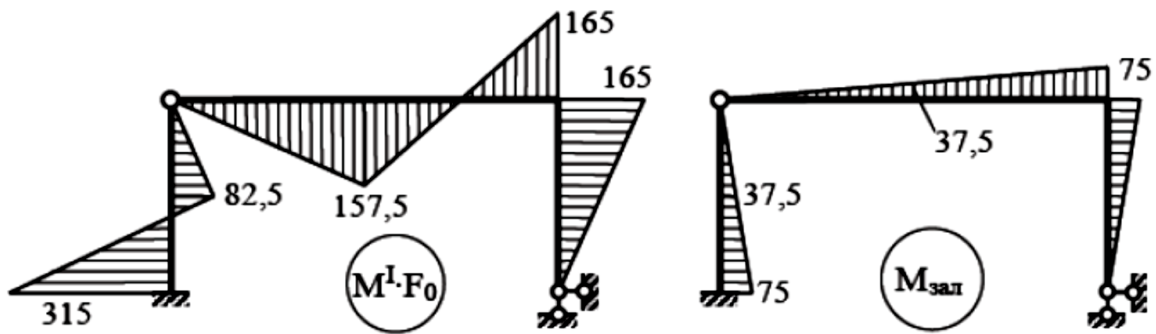


Рис. 6.8. Залишкова епюра моментів

Так епюра $M_{зал}$ створюється після зняття навантаження, то в місцях, де були прикладені зосереджені сили, не повинно бути зломів.

3. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ПК ЛІРА-САПР

У програмному комплексі ЛІРА-САПР [3] граничні зусилля у перерізах конструкції контролюються за допомогою спеціального двохвузлового елемента СЕ-255, який дозволяє моделювати як лінійну, так і кутову податливість відносно місцевих координатних осей. Величини граничних зусиль, після перевищення яких у даному елементі почнеться текучість, вводяться у параметрах жорсткості елемента. Такі елементи потрібно вводити в розрахункову модель у тих місцях, де прогнозується утворення пластичних шарнірів.

Для знаходження граничного навантаження використовується ітераційний процес оснований на простому кроковому методі. Точність розрахунку залежить від кількості ітерацій і кроку навантаження.

Приклад 2. Розрахунок рами з використанням ПК ЛІРА-САПР

Виконати розрахунок рами, зображеної на рис. 2.1.а.

До виконання розрахунку потрібно провести деяку підготовчу роботу. Визначаємо перерізи рами де можливе утворення пластичних шарнірів. Це місця, де встановлені жорсткі в'язи, місця прикладення зосереджених сил, місця жорсткого з'єднання стрижнів рами. У таких місцях потрібно створити два вузли, розташовані на відстані 1 см один від одного (рис. 3.1)

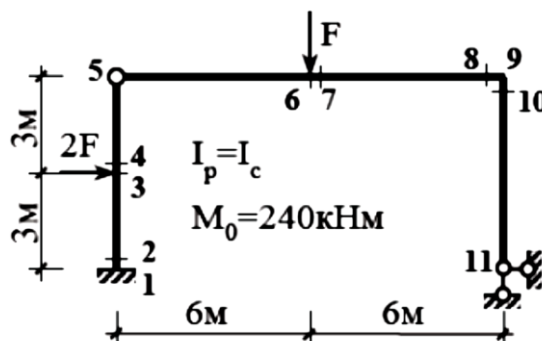


Рис. 3.1 Нумерація вузлів рами

Призначивши початок координат у вузлі 1, формуємо таблицю координат вузлів рами (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

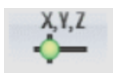
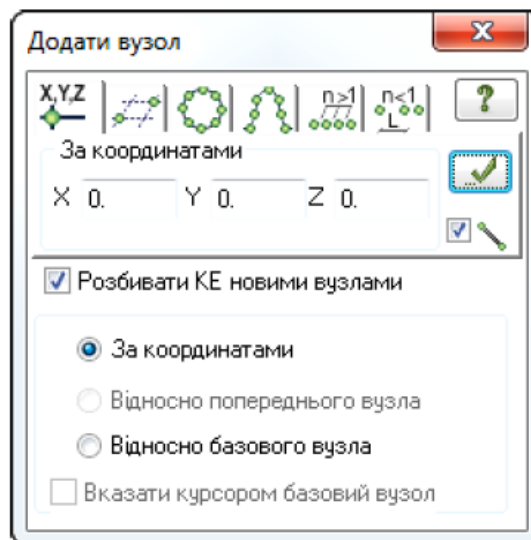
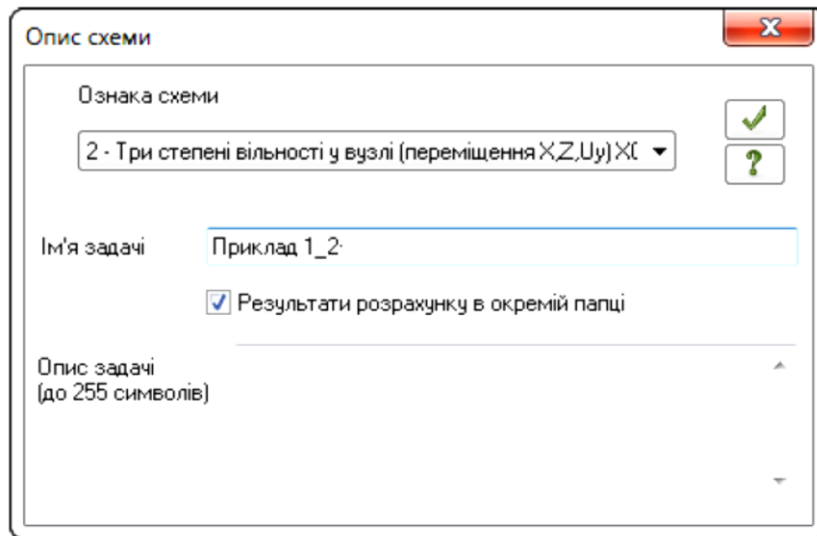
Координати вузлів рами		
№ вузла	Координати вузла (м)	
	x	z
1	0,00	0,00
2	0,00	0,01

3	0,00	3,00
4	0,00	3,01
5	0,00	6,00
6	6,00	6,00
7	6,01	6,00
8	11,99	6,00
9	12,00	6,00
10	12,00	5,99
11	12,00	0,00

Після запуску ПК ЛІРА-САПР вибираємо тип схеми – 2 (рис. 3.2), вводимо ім'я задачі і натискаємо кнопку .

Рис. 3.2 Вікно вибору типу схеми

На панелі «Створення» (закладка «Створення та редагування») натискаємо кнопку



і послідовно вводимо координати вузлів із табл. 3.1 (рис. 2.11). після вводу координат чергового вузла натискаємо кнопку .

Рис. 3.3 Вікно введення координат вузлів

На панелі «Створення» натискаємо кнопку  і з'єднуємо стрижнями вузли 1-5, 5-9, 9-11. Таким чином, у рамі створюються стрижні, що мають «нормальну» довжину і стрижні довжиною 1 см.

У вузлі 1 встановлюємо жорстке закріплення. Для цього виділяємо вузол 1 (кнопка на нижній панелі) натискаємо кнопку  – «В'язі»  вибираємо в'язі по X, Z,



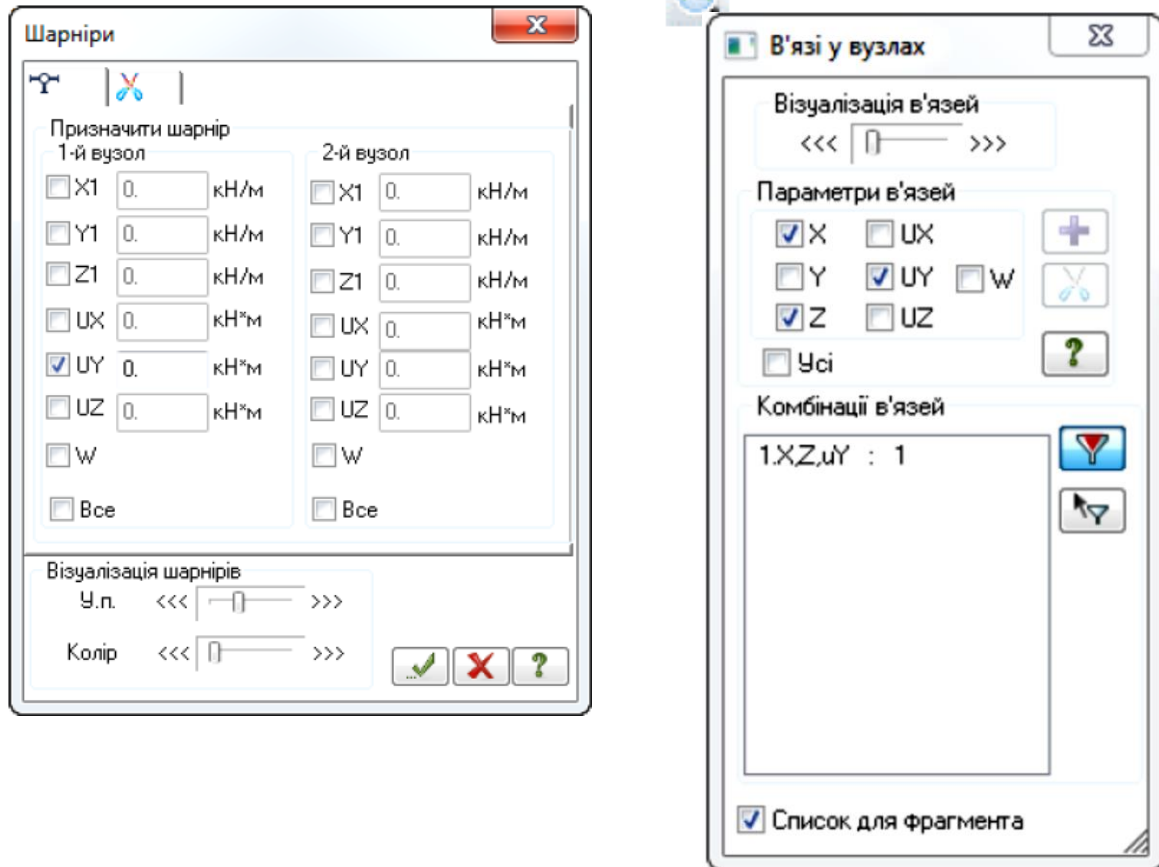
UY і натискаємо кнопку (рис. 3.4). У вузлі 11 встановлюємо лінійні в'язи по X і Z. Для цього виділяємо вузол 11, у вікні «В'язі у вузлах» знімаємо позначку із в'язи UY і натискаємо кнопку .

Рис. 3.4 Вікно введення опорних в'язів

Встановлюємо шарнір у вузлі 5. Шарнір може бути встановлений, або в стояку, або в ригелі. Виділяємо стрижень ригеля, переходимо на закладку «Стержні», натискаємо кнопку , ставимо позначку UY у 1-му вузлі (рис. 3.5) і натискаємо кнопку .

Рис. 3.5 Вікно встановлення шарнірів

Виділяємо усі стрижні рами (кнопка на  нижній панелі), переходимо на



закладку «Розширене редагування» і натискаємо кнопку  . У вікні (рис. 3.6) вибираємо «Тип 2 – СЕ плоскої рами» і натискаємо кнопку .

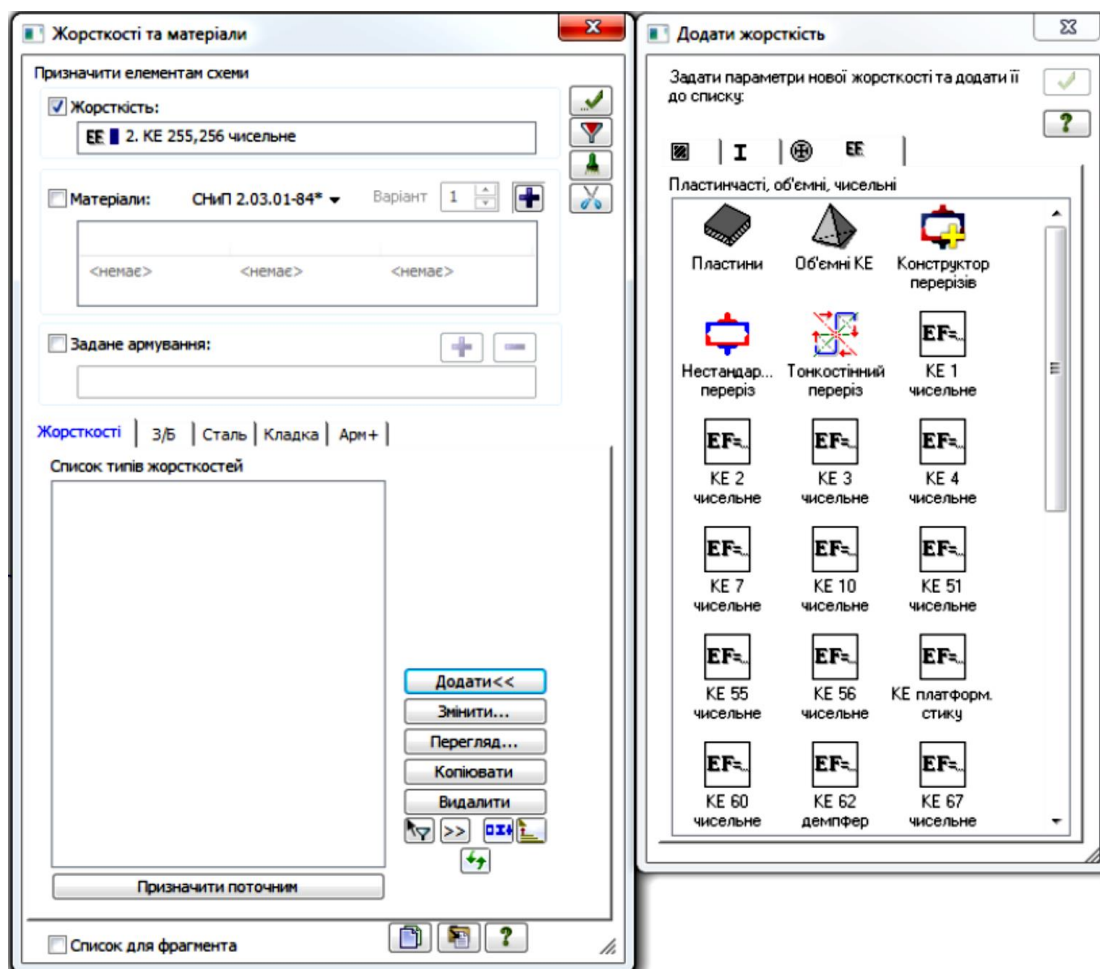


Рис. 3.7 Вікно введення жорсткостей скінченних елементів

Стрижневим СЕ, що мають довжину 1см, потрібно змінити тип на СЕ255. Для їх виділення на нижній панелі натискаємо кнопку  «Поліфільтр». У вікні «Поліфільтр» переходимо на закладку «Фільтр для елементів», ставимо позначку «За типом жорсткості», вибираємо «Ні» і натискаємо кнопку (рис. 3.9). Це призведе до того, що будуть виділені стрижні, яким не була присвоєна жорсткість, тобто, стрижні довжиною 1 см. Далі переходимо на закладку «Розширене редагування» і натискаємо кнопку  У вікні (рис. 3.6) вибираємо «Тип 255 - двовузловий СЕ пружних в'язів з урахуванням граничних зусиль» і натискаємо кнопку .

KE 2 чисельне

X

EF	1e8	кН
Ely	1e6	кН*м ²
Elz	0	кН*м ²
Glk	0	кН*м ²
Y1	0	см
Y2	0	см
Z1	0	см
Z2	0	см
Ru_Y	0	см
Ru_Z	0	см
Elw	0	кН*м ⁴
q	0	кН/м

Врахування

☐ GF
 GFy 0 кН
 GFz 0 кН

Коментар

Колір

✓

✗

?

Рис. 3.8 Вікно введення значень жорсткостей

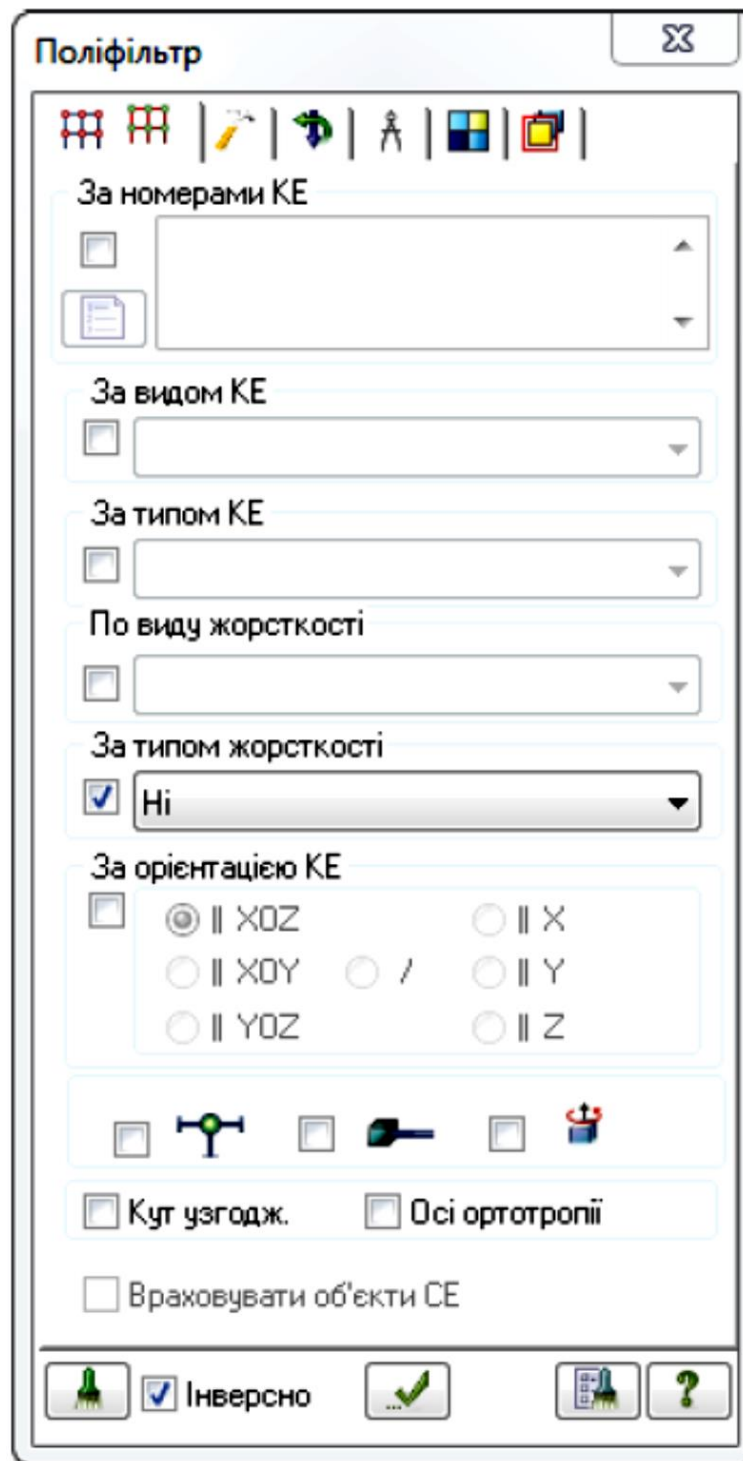
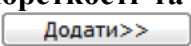


Рис. 3.9 Вікно фільтра для елементів

Виділяємо CE 255. Для цього натискаємо кнопку – «Поліфільтр». У вікні «Поліфільтр» переходимо на закладку «Фільтр для елементів», ставимо  позначку «За типом CE», вибираємо «Тип 255 - двовузловий...» і натискаємо кнопку .

Переходимо на закладку «Створення та редагування» і натискаємо кнопку  на панелі «Жорсткості та в'язі». У вікні «Жорсткості та матеріали» натискаємо кнопку , переходимо на закладку EF і два рази вводимо номери елементів KE 255,256.

Вводимо жорсткості CE 255 (рис. 3.10) і натискаємо кнопку . Погонні жорсткості R і граничне значення поздовжніх сил вводяться довільно, але потрібно слідкувати, щоб граничні значення поздовжніх сил були значно більшими, ніж виникаючі у стрижнях поздовжні сили від навантаження. У вікні «Жорсткості та матеріали» натискаємо кнопку .

Чисельний опис KE 255,256

	R (кН/м)	N+ (кН)	N- (кН)
X	10000	1000	-1000
Z	10000	1000	-1000
Uy	10000	240	-240

Колір

Коментар

✓ ✗ ?

Рис. 3.10 Вікно введення жорсткостей SE 255

Переходимо на закладку «Створення та редагування» і натискаємо кнопку – «Навантаження на вузли» на панелі «Навантаження». Для введення горизонтальної зосередженої сили у вузлі 3 вибираємо напрям сили X, натискаємо



кнопку

, вводимо значення сили -2 (рис. 3.11) і натискаємо кнопку . Виділяємо вузол 3 і натискаємо кнопку у вікні «Завдання навантажень».

Задання навантажень

Навантаження у вузлах

Система координат

☒ Глобальна ☐ Місцева

Напрямок

☒ X ☐ Y ☐ Z ☐ W

Тип навантаження

Поточне навантаження

✓ ?

Параметри навантаження

Значення -2 кН

✓ ✗ ?

Рис. 3.11 Вікно введення навантаження

Для введення вертикальної сили у вузлі 6 вибираємо напрям сили Z, натискаємо кнопку



, вводимо значення сили -1 і натискаємо кнопку



Виділяємо вузол 6 і натискаємо кнопку у вікні «Завдання навантажень».

Далі переходимо на закладку  «Розрахунок», на панелі «Нелінійність»

вибираємо тип нелінійної процедури . У вікні «Моделювання

нелінійних завантажень конструкції» натискаємо кнопку  для того, щоб додати нелінійне завантаження, вводимо номер завантаження - 1, вводимо кількість кроків - 500, вибираємо вводимо сумарний коефіцієнт 200, який, в даному випадку, означає максимальне значення навантаження, що може бути досягнуте в процесі розрахунку (рис. 3.12).

☒ Рівномірні кроки

Оскільки величина граничного навантаження попередньо невідома, в якості сумарного коефіцієнту вводимо значення, що завідомо перевищує граничне навантаження. Так як програма не припиняє розрахунок при досягненні граничного навантаження, коли рама перетворюється у механізм, а продовжує розрахунок до досягнення заданого навантаження, потрібно зберегти проміжні результати, аналіз яких дозволить визначити граничне навантаження. Для цього у меню «Виведення проміжних результатів» встановлюємо «Виводити все». Встановлюємо позначку «_Считать пошагово, даже если отсутствуют шаговые элементы» і натискаємо кнопку «Підтвердити».

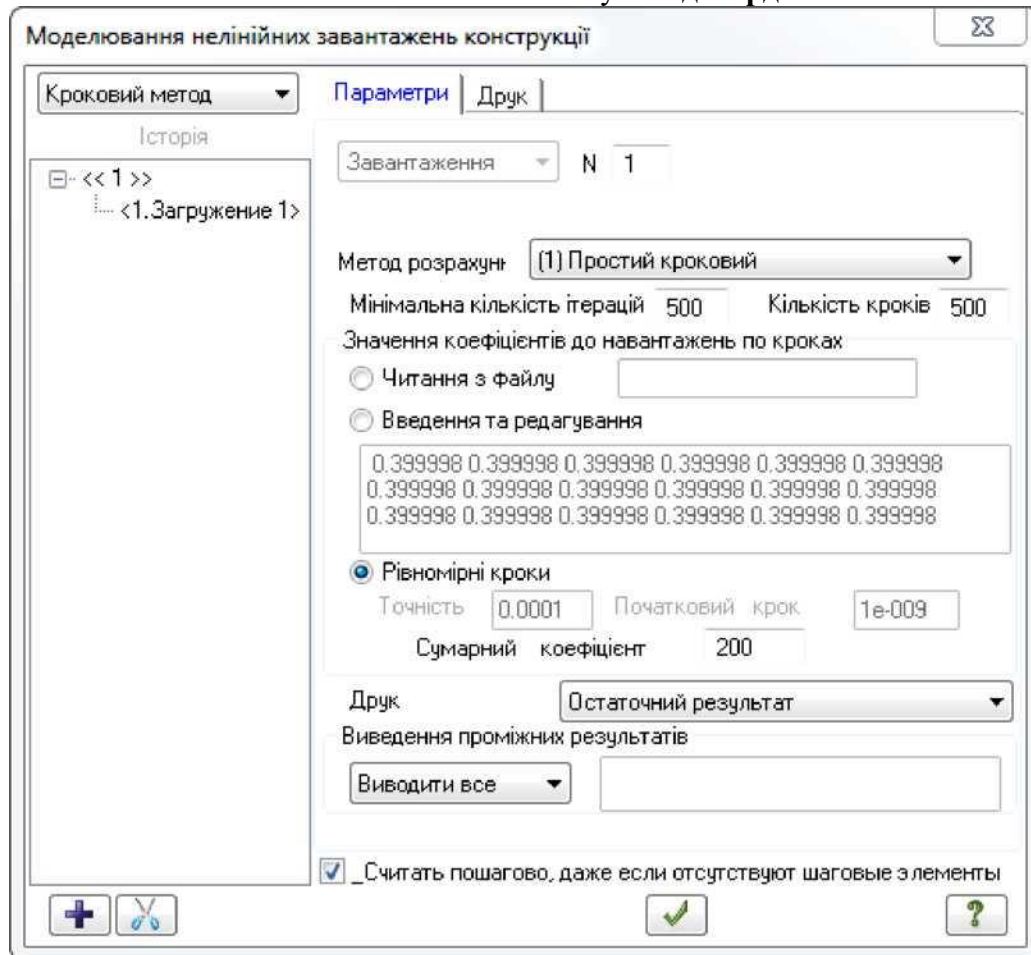


Рис. 3.12 Вікно моделювання нелінійних навантажень

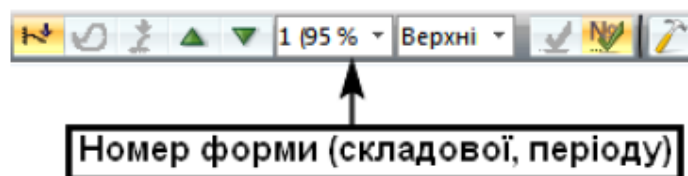
На панелі «Розрахунок», або на панелі швидкого доступу, натискаємо кнопку  – «Виконати повний розрахунок», і чекаємо завершення розрахунку. При невдалому завданні «сумарного коефіцієнту» (рис. 3.12) розрахунок може виконуватись досить тривалий час оскільки після досягнення граничного навантаження програма буде намагатись виконувати розрахунок геометрично змінної системи. Для економії часу можна зупинити розрахунок і у протоколі знайти останнє навантаження, при якому ітераційний процес закінчився успішно. Це навантаження із збільшенням на величину кроку навантаження потрібно ввести в якості «сумарного коефіцієнту»

(рис. 3.12) і виконати розрахунок. Після завершення розрахунку переходимо на закладку «Аналіз» і виводимо на екран епюру згинальних моментів (кнопка M_x на панелі «Зусилля у стержнях»).

Далі на нижній панелі відкриваємо меню (рис. 3.13), де вибираємо навантаження, яке вказане у відсотках від «сумарного коефіцієнту».

Рис. 3.13 Вибір проміжних результатів розрахунку

Відповідно до вибраного навантаження на екрані буде змінюватись епюра згинальних



моментів. Визначивши із протоколу розв'язку задачі найбільше навантаження, при якому ітераційний процес закінчився успішно, вибираємо відповідний відсоток навантаження у меню «Номер форми (складової, періоду)». Для уточнення результату вибираємо сусідні (більші) значення відсотку навантаження і слідкуємо за тим, щоб згинальні моменти у рамі не перевищували граничних моментів. Найбільше навантаження, при якому згинальні моменти не перевищують граничних, приймаємо в якості граничного. Оскільки на екрані відображається навантаження, яке було введене в якості «сумарного коефіцієнту», величину граничного навантаження одержимо як відсоток від «сумарного коефіцієнту». Для даного прикладу граничне навантаження $F_0 = 200 \cdot 0,4 = 80 \text{ кН}$ співпадає із результатом аналітичного розрахунку. Пластичні шарніри утворюються у перерізах 1-2, де $M = 240 \text{ кНм}$, і у перерізах 8-10, де $M = 239 \text{ кНм}$ (рис. 3.14).

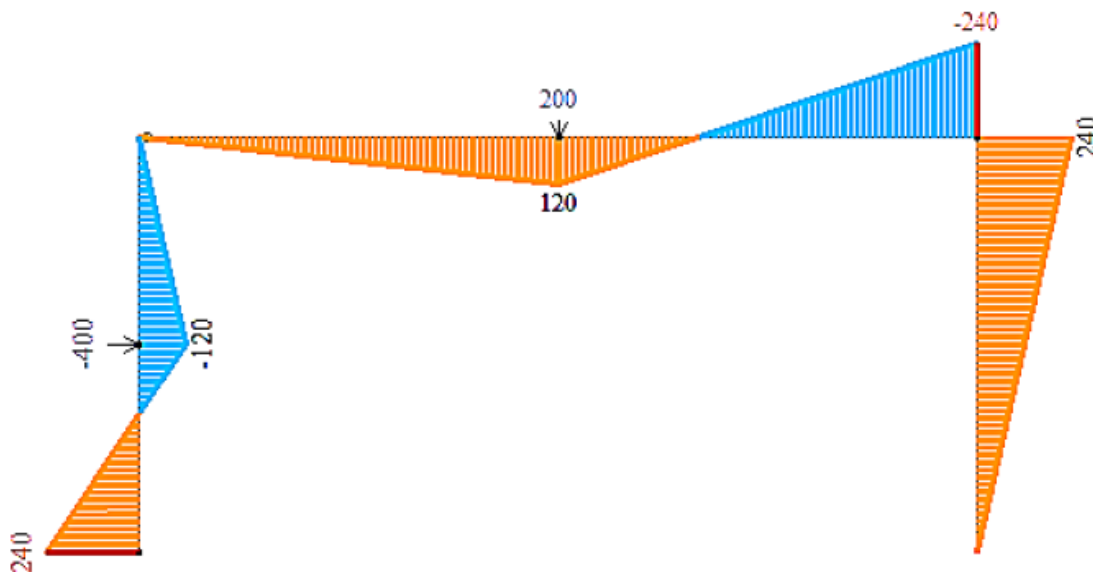


Рис. 3.14 Епюра згинальних моментів у граничному стані (кНм)

Схема пластичного руйнування рами показані на рис. 3.15.

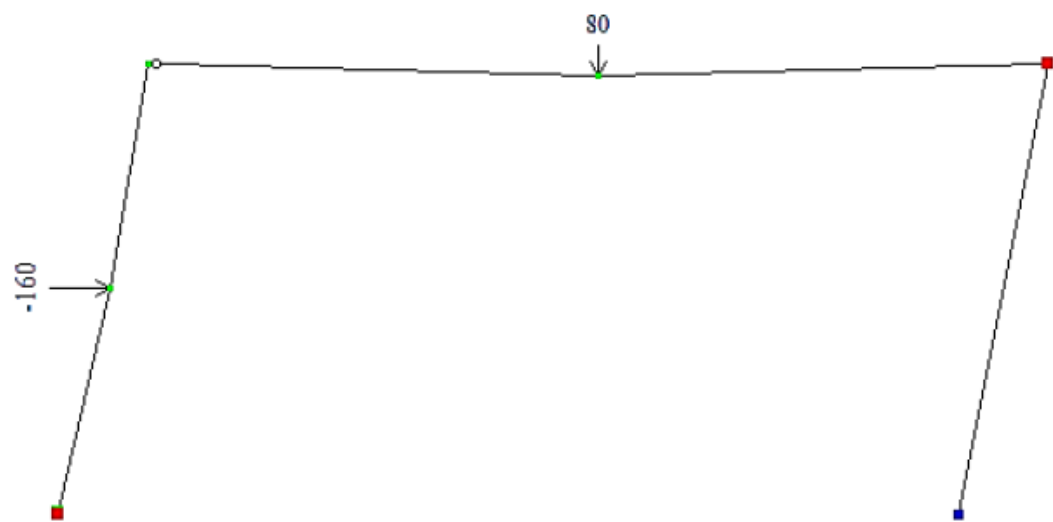


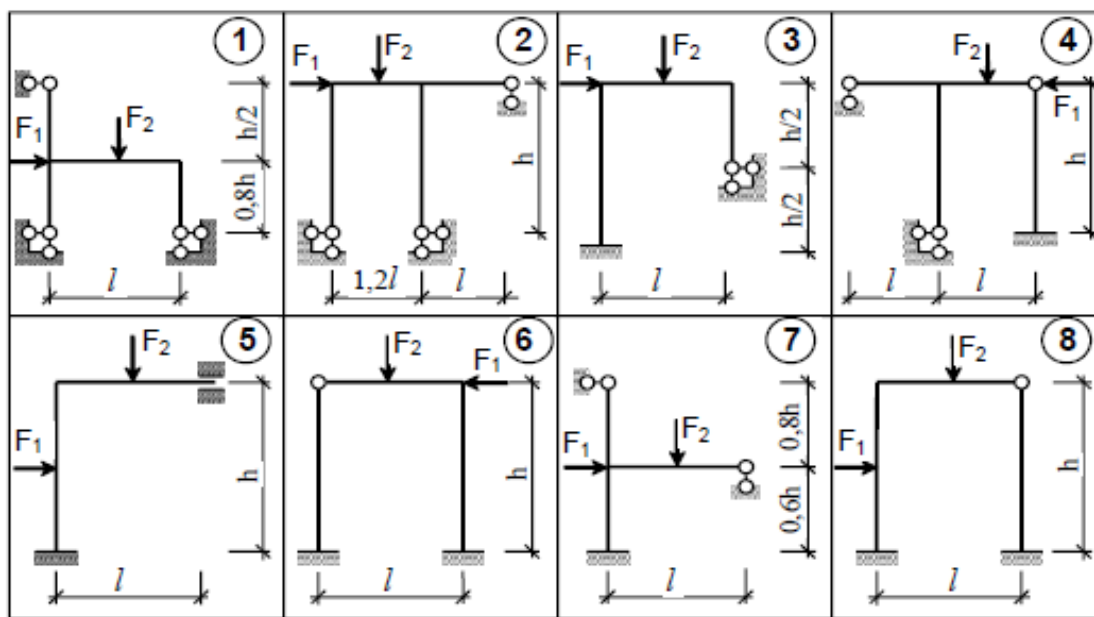
Рис. 3.15 Схема пластичного руйнування рами

ЛІТЕРАТУРА

1. Чихладзе Е.Д. Будівельна механіка: Підручник. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – 320 с., рис. 234, табл. 14
2. Нелінійна будівельна механіка з ПК ЛІРА-САПР. М.С. Барабаш, М.М. Сорока, М.Г. Сур'янінов. – Київ, 2018. -246 с.
3. Программный комплекс ЛИРА-САПР. Руководство пользователя. Обучающие примеры. Водопьянов Р.Ю., Титок В.П., Артамонова А.Е., Ромашкина М.А. Под ред. академика РААСН Городецкого А.С. Электронное издание. — 2017. — 535с.

Схеми та вихідні дані до розрахунково-проектувальної роботи

Розрахункові схеми



Вихідні дані

Таблиця 1

Таблиця 2

№ з/п	Розміри					Коефіцієнти армування (ар-ра класу А400С)	
	l (м)	h (м)	$bp=bc$ (м)	h_p (м)	h_c (м)	ρ_p	ρ_c
1	4	4	0,20	0,40	0,30	0,012	0,013
2	6	5	0,30	0,40	0,30	0,015	0,015
3	8	6	0,30	0,40	0,35	0,013	0,012
4	9	8	0,30	0,40	0,35	0,014	0,014
5	10	5	0,40	0,45	0,40	0,016	0,013
6	12	8	0,35	0,45	0,40	0,015	0,014
7	6	6	0,35	0,40	0,30	0,014	0,017
8	12	10	0,40	0,40	0,35	0,013	0,016

Клас бетону	F_1/F_2
C16/20	2,0
C20/25	0,4
C20/30	3,0
C30/35	0,8
C32/40	2,0
C16/20	0,5
C20/25	2,5
C25/30	0,25

Характеристики бетону

Для арматури класу А400С $f_{yd}=365000 \text{ кН/м}^2$.

Клас бетону	$E_{cm} \text{ (кН/м}^2\text{)}$	f_{cd}
C16/20	$2.7 \cdot 10^7$	11500
C20/25	$3.0 \cdot 10^7$	14500
C20/30	$3.2 \cdot 10^7$	17000
C30/35	$3.45 \cdot 10^7$	19500
C32/40	$3.6 \cdot 10^7$	22000