



Будівельна

механіка

машин

**Проф. Пискунов Сергій Олегович**

**Кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів**

**Освітня програма “Динаміка і міцність машин”**

**Освітньо-кваліфікаційний рівень “Бакалавр”**

# Лекція 1. Предмет, задачі і порядок вивчення дисципліни

**Механіка** - від грец. Μηχανική, mechane — знаряддя, споруда, мистецтво побудови машин) — в загальному розумінні наука (розділ фізики) про механічний рух та рівновагу тіл і взаємодію, що виникає при цьому між тілами. Термін «механіка» ввів у науку Арістотель (384 — 322 год до н. е.).

Класична механіка - Ісак Ньютон ( 1642 — 1727 )

- Теоретична механіка
  - Статика — вивчення умов рівноваги фізичних тіл
  - Кінематика — вивчення руху об'єктів без врахування сил
  - Динаміка — вивчення руху об'єктів під впливом сил
- Аналітична механіка

Небесна механіка  
Балістика  
Теорія гіроскопів

Квантова механіка  
Релятивістська механіка

- Теорія стійкості руху
- Теорія коливань

- Механіка суцільних середовищ

Гідромеханіка

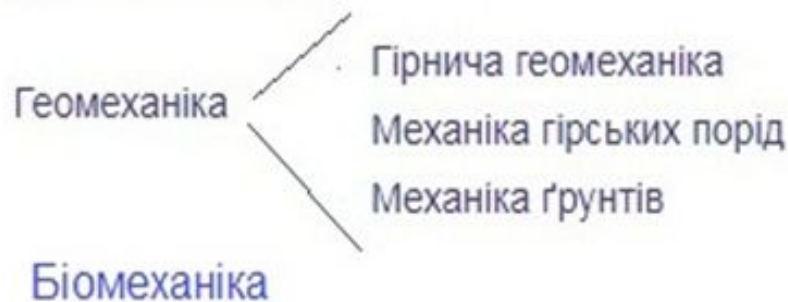
Гідростатика

Гідродинаміка

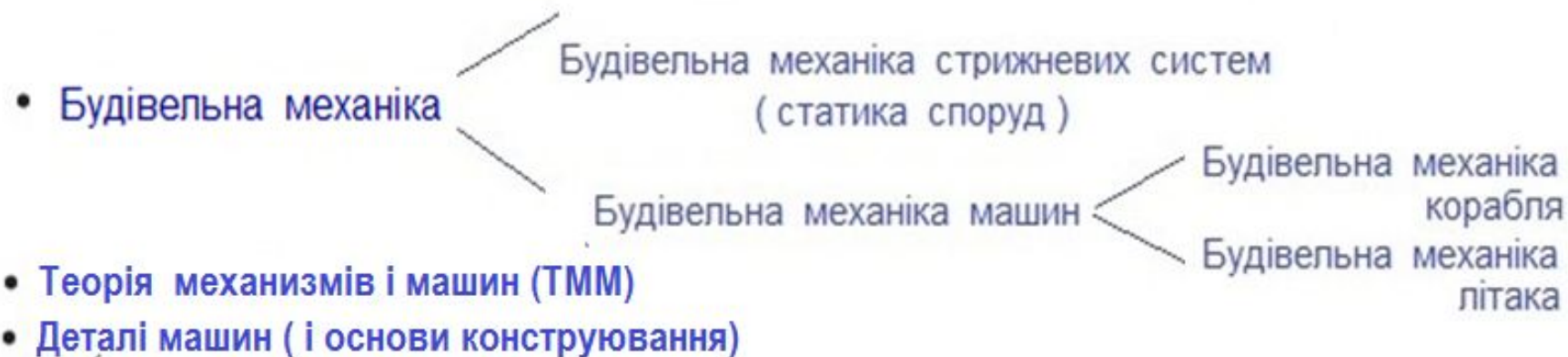
Газодинаміка

- Механіка деформівного твердого тіла
  - Теорія пружності
  - Теорія пластичності
  - Теорія повзучості
  - Механіка руйнування

- Прикладна механіка



- Опір матеріалів ( Механіка матеріалів і конструкцій )



- Теорія механізмів і машин (ТММ)

- Деталі машин ( і основи конструювання)

### Теоретична механіка:

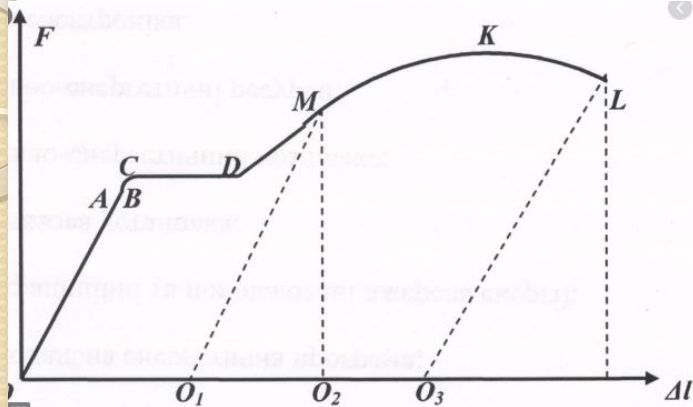
об'єкт дослідження – абсолютно тверде (недеформоване) тіло (або матеріальна точка )

Статика – умови рівноваги тіла ( точки ) – рівняння рівноваги

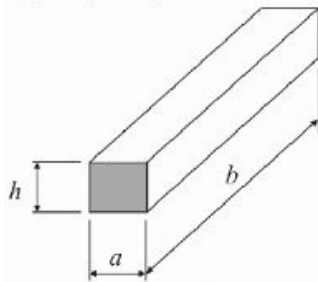
# Опір матеріалів (механіка матеріалів і конструкцій)

об'єкти дослідження

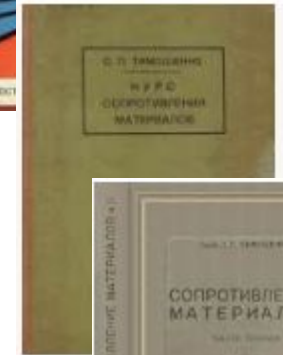
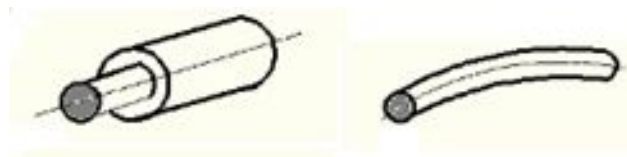
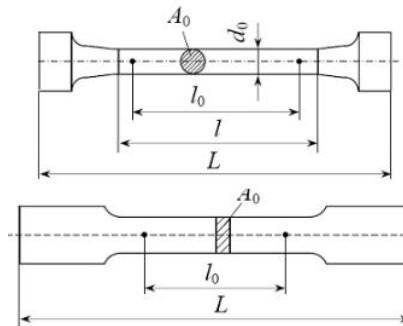
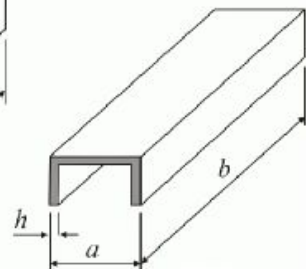
- фізико-механічні властивості матеріалу
- деформоване тіло, стержень



$a \sim h \ll b$



$h \ll a \ll b$



Зв'язок між внутрішніми зусиллями і напруженнями

напруження =  $\frac{\text{внутрішнє зусилля}}{\text{геометрична характеристика}}$

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{F} \leq [\sigma]$$

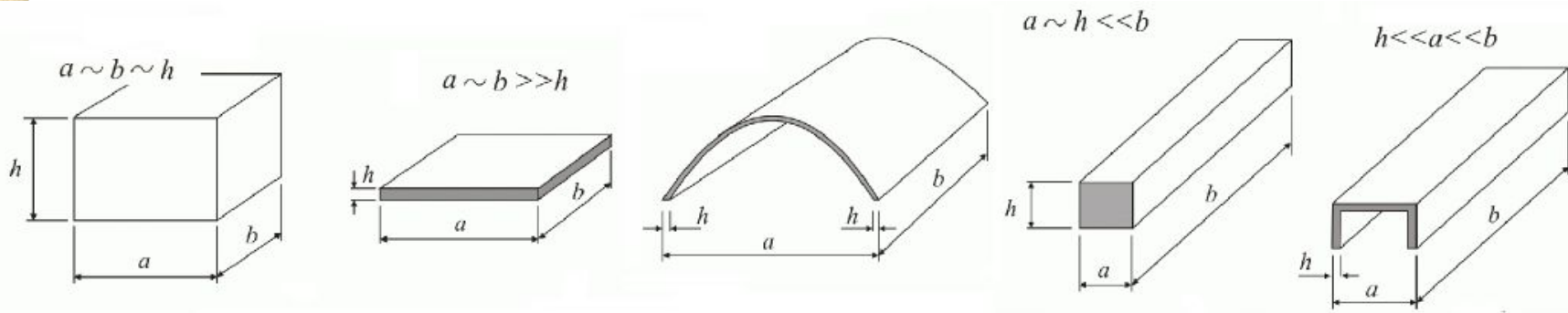
$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} \leq [\sigma]$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S_x(y)}{b(y) \cdot J_x}$$

Основні задачі (критерії несучої здатності) – міцність, жорсткість, стійкість

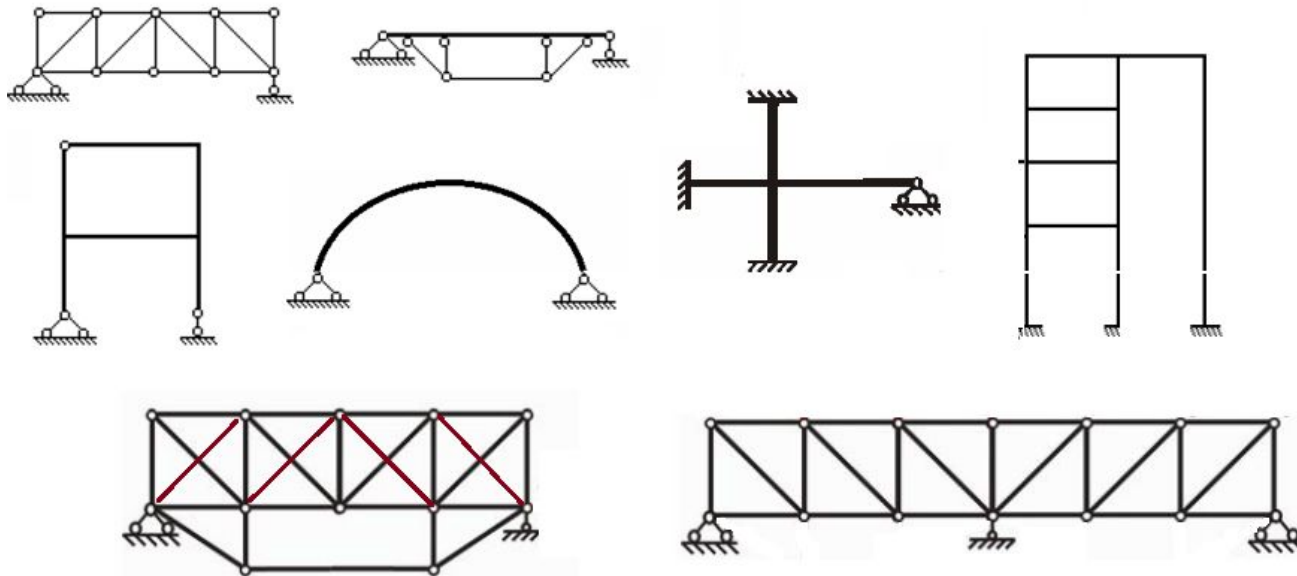
# Будівельна механіка

Будівельна механіка – наука про методи розрахунку несучої здатності складних механічних систем (споруд), до яких входять елементи різних типів - масивні тіла, пластини, оболонки, стрижні - на міцність, жорсткість стійкість

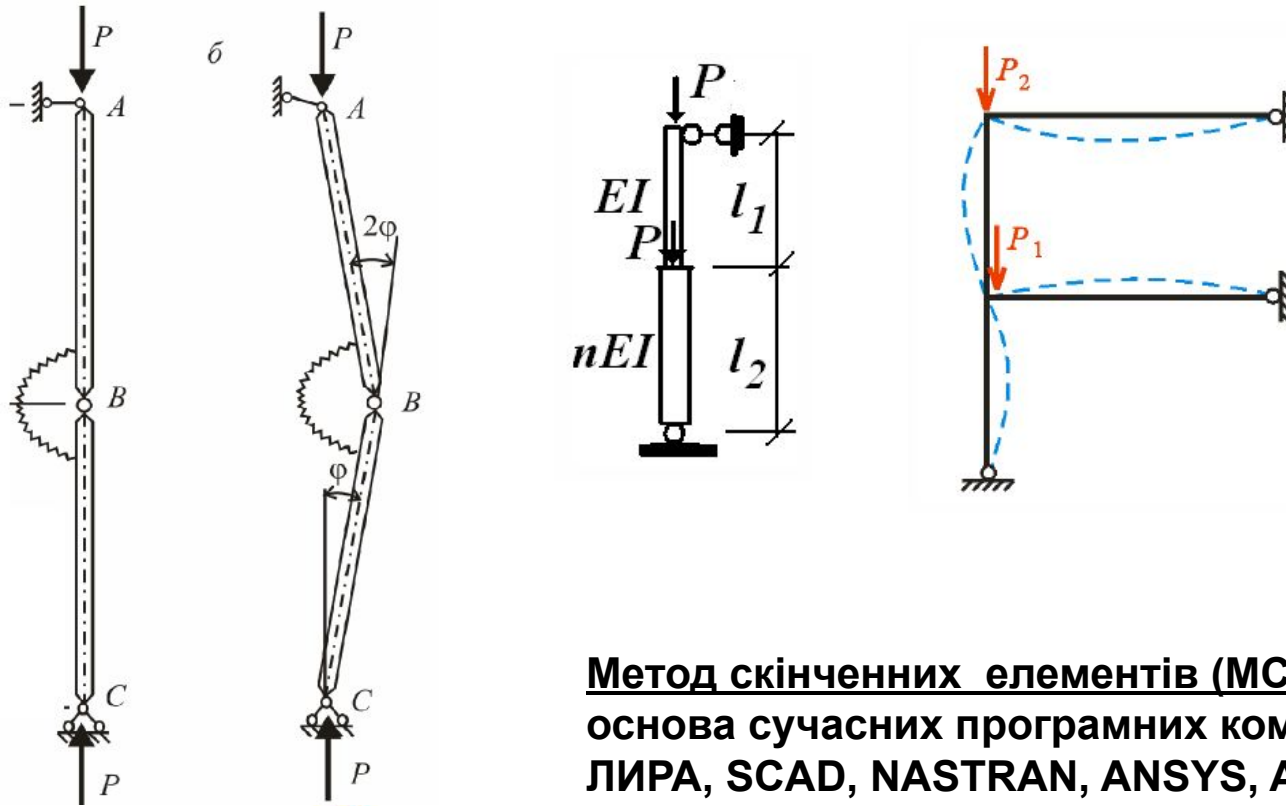


## Будівельна механіка стрижневих систем

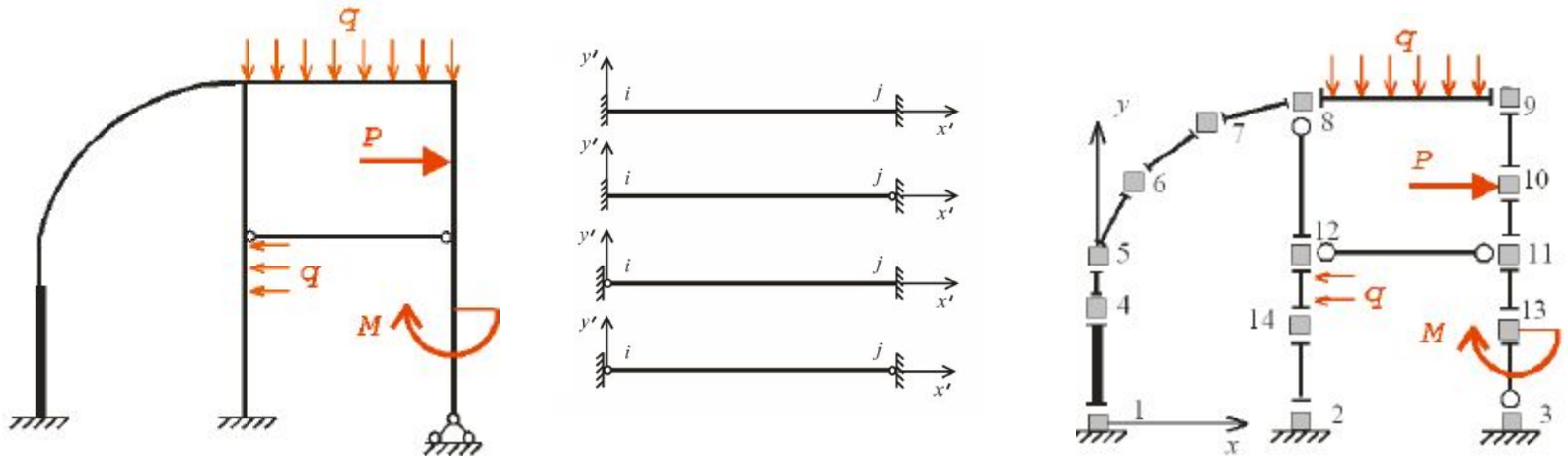
об'єкти дослідження



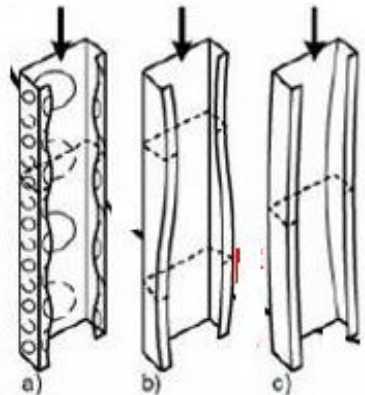
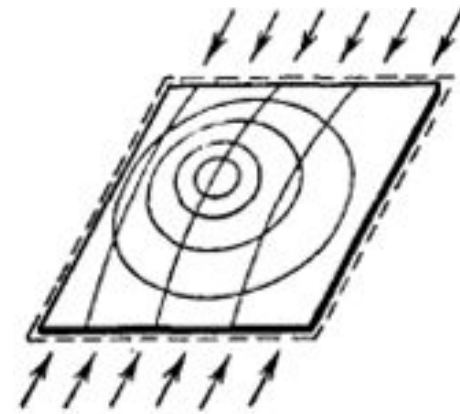
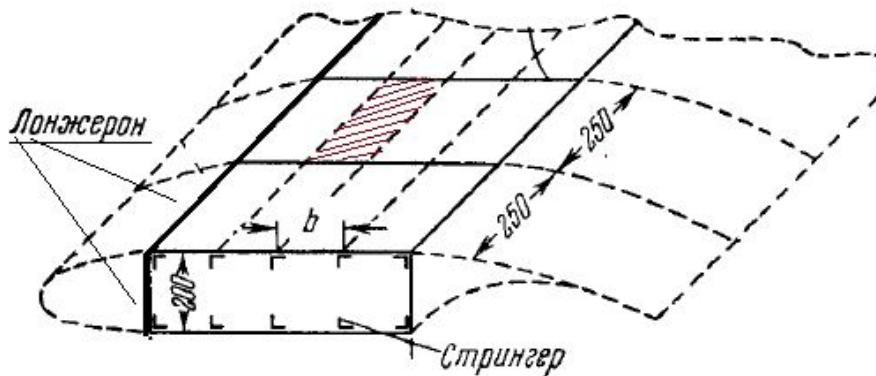
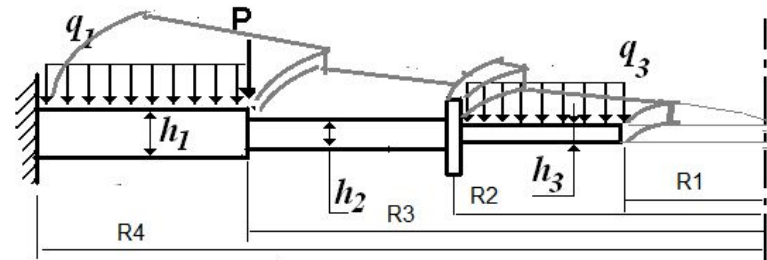
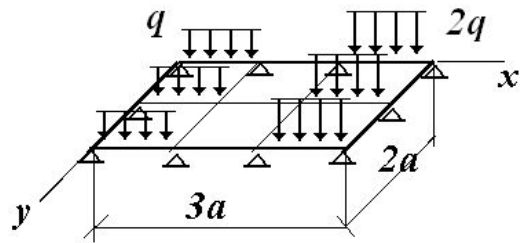
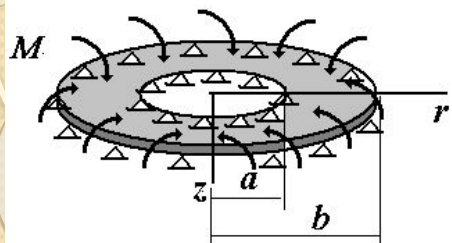
# Будівельна механіка стержневих систем - стійкість



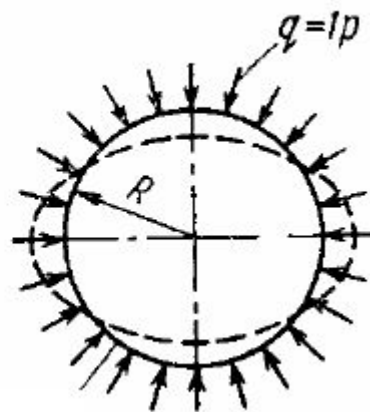
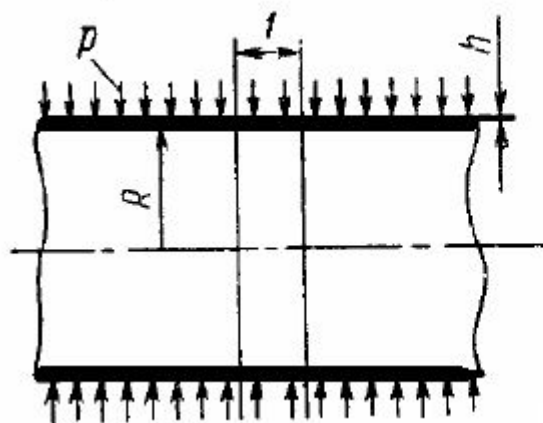
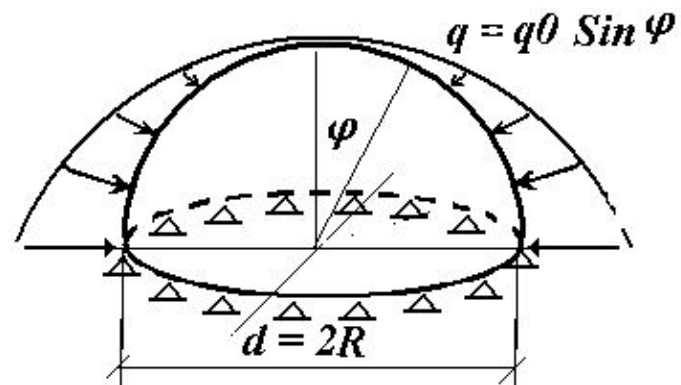
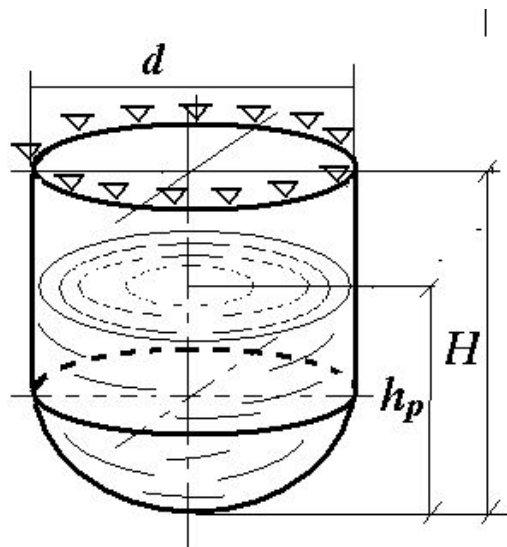
**Метод скінченних елементів (МСЕ) – основа сучасних програмних комплексів: ЛИРА, SCAD, NASTRAN, ANSYS, ABAQUS**



# Пластини – міцність, жорсткість, стійкість



# Оболонки – міцність, жорсткість, стійкість





# Предмет і задачі дисципліни

Предмет навчальної дисципліни – напружено-деформований стан та оцінка несучої здатності (міцності, жорсткості і стійкості) елементів машинобудівних конструкцій (стержнів і стержневих систем, пластинок, оболонок) під впливом зовнішніх силових і температурних навантажень.

## 1. Будівельна механіка стрижневих систем

## 2. Метод скінченних елементів в механіці стрижневих систем

## 3. Пластини і оболонки

Метою навчальної дисципліни є формування здатностей :

- побудова розрахункових схем конструкцій;
- постановка задачі і вибір методу її розв'язання;
- використання методів математичного аналізу в інженерних розрахунках елементів конструкцій машин, приладів і апаратури на міцність, жорсткість і стійкість;
- прогнозування напруженого стану стрижневих систем, пластин і оболонок під дією силових і температурних навантажень; оцінка адекватності отриманих результатів;
- визначення небезпечних з точки зору втрати несучої здатності конструкції параметрів навантаження.

# РСО і контрольні заходи

## Рейтингова система оцінювання результатів навчання

Навчальна дисципліна - Будівельна механіка стержневих систем

Рейтинг ( $R=100$ ) = Стартовий рейтинг ( $R_c=50$ ) + Рейтинг екзаменаційних балів ( $R_e=50$ )

### Контрольні роботи

**Контрольна робота 1. «Кінематичний аналіз і розрахунок стержневих систем»**

- 1) *Теоретичні питання:* Основні положення кінематичного аналізу
- 2) *Задача:* Кінематичний аналіз і визначення зусиль в стержневих і комбінованих системах

**Контрольна робота 2. «Розрахунок статично невизначуваних стержневих систем»**

- 1) *Теоретичні питання:* Основні теоретичні положення методу сил і методу переміщень
- 2) *Задача:* Визначення внутрішніх зусиль в статично-невизначуваній рамі методом переміщень

**Контрольна робота 3. «Стійкість стержневих систем»**

- 1) *Теоретичні питання:* Основні теоретичні положення теорії стійкості
- 2) *Задача:* Визначення критичного навантаження для стиснутого ступінчастого стержня

### Індивідуальне завдання

**Розрахунок статично-невизначуваної рами на стійкість методом переміщень.**

Визначення критичних значень параметрів навантаження для статично-невизначуваної рами. Побудова області стійкості.

### Обчислення стартового рейтингу ( $R_c=50$ )

**1. Контрольні роботи 1-4** - загальний бал 8, у т.ч. п.1 – 2 бали, п.2 (задача) – 6 балів.

Максимальна кількість балів за всі контрольні роботи : 32 бали.

**Критерії оцінювання п.1 контрольних робіт №№1-4 (теоретичні питання):**

- 66 % і більше правильних відповідей на питання ..... 2 бали;
- від 30 % до 65 % правильних відповідей на питання ..... 1 бал;
- менше 30 % правильних відповідей на питання ..... 0 балів;

**Критерії оцінювання п.2 контрольних робіт 1-4 (задача):**

- задача виконана правильно ..... 6 балів;
- хід розв'язання правильний, незначні помилки в обчисленнях ..... 5 балів;
- хід розв'язання правильний, суттєві помилки в обчисленнях ..... 2-4 балів;
- помилки в методиці розв'язання задачі ..... 1 бал;
- відсутність розв'язання задачі ..... 0 балів

Виправлення помилок в ході співбесіди по результатах перевірки контрольних робіт + 1-2 бали

**2. Індивідуальне завдання 12 балів («Розрахунок рами на стійкість»)**

**Критерії оцінювання індивідуального завдання**

- задача виконана правильно, викладення розв'язку повне і послідовне ..... 12 балів;
- хід розв'язання правильний, викладення розв'язку неповне ..... 10 балів;
- хід розв'язання правильний, помилки в обчисленнях ..... 7 балів;
- помилки в методиці розв'язання задачі ..... 3-5 балів;
- відсутність розв'язання задачі ..... 0 балів

Виправлення помилок в ході співбесіди по перевірці індивідуального завдання + 2-3 бали

Контрольна робота, виконана з оцінкою «0 балів» має бути виконана повторно.

### 3. Інші критерії

Відвідування лекційних і практичних занять - 5 балів

90-100%	5 балів
70-90%	4 бали
50-70%	2 бали
Менше 50 %	0 балів

Участь в розв'язанні задач на практичних заняттях, за семестр, заохочувально до 10 балів

**3. Розрахунок шкали ( $R_c$ ) стартового рейтингу  $R = 32 + 12 + 5 + (0 \dots 10) = 49 \dots 59$  балів.**

### Обчислення рейтингу екзаменаційних балів ( $R_e=50$ )

Необхідною умовою допуску до екзамену є зарахування всіх контрольних робіт, виконання індивідуального завдання, відвідування не менше 50% занять а також стартовий рейтинг не менший 50% від  $R$ , тобто 25 балів.

Екзаменаційний білет складається з двох теоретичних питань і двох задач

**Критерії оцінювання відповідей на теоретичні питання:**

Відповідь на одне питання - 5 балів (всього два питання):

- правильна і повна відповідь - 5 балів;
- принципово правильна відповідь - 4 бали;
- неповна відповідь з помилками - 1-3 бали;
- відсутність відповіді - 0 балів.

**Критерії оцінювання розв'язків задач:**

Розв'язання однієї задачі - 20 балів (всього дві задачі):

- правильне розв'язання задачі із наданням пояснень про хід розв'язання задачі, 20 балів;
- правильне розв'язання задачі, помилки в наданні пояснень - 15 балів;
- розв'язання з незначними помилками - 12 балів;
- розв'язання зі значними помилками - 8 балів;
- розв'язання з помилками в методиці розв'язання задач - 2-6 балів;
- відсутність розв'язку - 0 балів.

Сума екзаменаційних балів  $R = 5 + 5 + 20 + 20 = 50$  балів.

### Обчислення сумарного рейтингу ( $R=100$ )

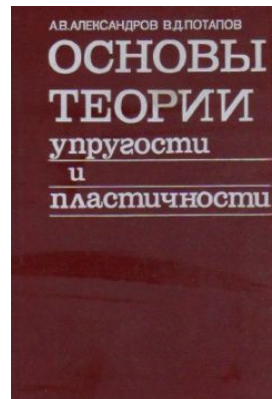
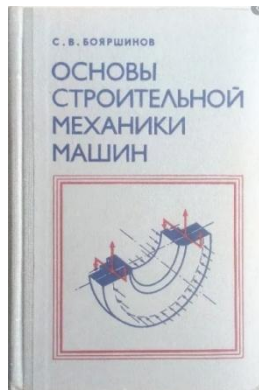
Для отримання студентом відповідних оцінок (ECTS та традиційних) його сумарна рейтингова оцінка ( $R = R_c + R_e$ ) переводиться згідно з таблицею:

Кількість балів	Оцінка ECTS	Традиційна оцінка
95 - 100	A	зараховано
85 - 94	B	
75 - 84	C	
65 - 74	D	
60 - 64	E	
< 60	Fx	не зараховано
< 30 балів або не виконані інші умови допуску до заліку	F	не допущений

Студенти, які отримали оцінку <F, до складання екзамену не допускаються і повинні підвищити свій рейтинг шляхом додаткового виконання контрольних робіт, співбесіди з індивідуальних завдань протягом додаткової сесії.

# Література

- **Баженов В.А.,** Перельмутер А.В., Шишов О.В. Будівельна механіка. Комп'ютерні технології і моделювання // Підручник для студентів вищих навчальних закладів Київ, ВІПОЛ, 2013 р. – 89б с.
- Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика / Учеб. для строит. спец. вузов - 8е изд. перед. и допол. / - М.: Высш. шк. 1986 – 606 с.
- **Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин / Учеб. для машиностроит. спец. вузов . - М.: «Машиностроение», 1973. - 456 с.**
- Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. – М. Машиностроение, 1978. – 313 с.
- Вольмир А.С. и др. Устойчивость деформируемых систем. - М.: ФМЛ, 1988.- 984 с.
- Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности // Учеб. для строит. спец. Вузов / - М.: Высш. шк., 1990 - 400 с.
- Тимошенко С.П и др.. Пластинки и оболочки.- М.: ГИФМЛ, 1963.- 635 с.



**Будівельна механіка машин. Розд. I: Стрижневі системи** [Електронний ресурс] : конспект лекцій для студентів напряму підготовки 6.050501 «Прикладна механіка» / НТУУ «КПІ» ; уклад. О. М. Чемерис. – Електронні текстові дані (1 файл: 922,94 Кбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2012

Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/2238>

**Чемерис О.М. Будівельна механіка машин Розділ II: «Пластинки і оболонки»** [Електронний ресурс] : конспект лекцій для студентів напряму підготовки 6.090501 «Прикладна механіка». / НТУУ «КПІ» ; уклад. О. М. Чемерис – Електронні текстові дані (1 файл: 2,29 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 52 с.

Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/5290>

**Чемерис О.М. Конспект лекцій з дисципліни «Будівельна механіка машин» Розділ 3. Стійкість пружних систем / для спеціальності «Динаміка і міцність машин»** К.НТУУ «КПІ» 2010, 76 с.

## Основні гіпотези і припущення

- **Гіпотеза суцільності** – тіло вважається суцільним, таким, що неперервно заповнює свій об'єм. На цій підставі деформації і переміщення точок елемента можуть вважатися неперервними функціями координат.
- **Гіпотеза однорідності та ізотропності:** властивості матеріалу однакові в усіх точках і по усіх напрямках.
- **Гіпотеза ідеальної пружності:** матеріал конструкцій вважається ідеально пружним. Це означає, що після зняття навантаження деформація усувається, споруда сповна поновлює форму, яку мала до початку навантаження і повертає енергію, яку було витрачено на її деформацію.
- **Гіпотеза лінійної залежності між деформаціями і напруженнями:** вважається, що між напруженнями і деформаціями в усіх точках зберігається лінійна залежність (закон Гука).

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \quad \epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)], \quad \epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)],$$
$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}.$$

$$G = E/2(1 + \nu).$$

- **Гіпотеза малих переміщень:** переміщення точок системи, які зумовлені пружними деформаціями, є малими, тобто такими, що допускають лінійну залежність між деформаціями і переміщеннями в рівняннях геометричного аспекту задачі, а також складання рівнянь рівноваги для недеформованого стану.
- **Гіпотеза природного ненапруженого стану:** початкові напруження в тілі вважаються такими, що дорівнюють нулю. Це означає, що напруження і зусилля, які визначаються в результаті розрахунку, становлять лише їхній приріст над тими, що були спочатку.

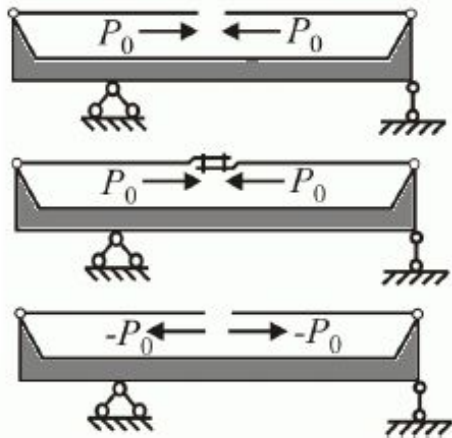
Із наведених гіпотез впливає **принцип незалежності дії сил (принцип суперпозиції):**  
в лінійно деформівних системах сумарний ефект від дії кількох сил

- дорівнює сумі ефектів від дії кожної сили окремо.
- не залежить від порядку їх прикладання.

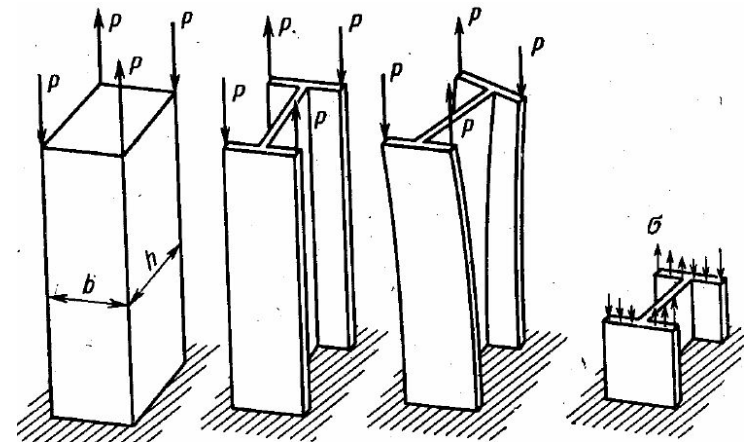
- **Принцип Сен-Венана:** якщо до будь-якої малої частини споруди прикладено зрівноважену систему сил, то вона викликає напруження, які швидко зменшуються в міру віддалення від цієї частини.

...іноді не можуть бути використані або не виконуються :

### Гіпотеза природного ненапруженого стану



### Принцип Сен-Венана



# Розрахункова схема

спрощене зображення конструкції яке (нехтуючи другорядними факторами) відображає :

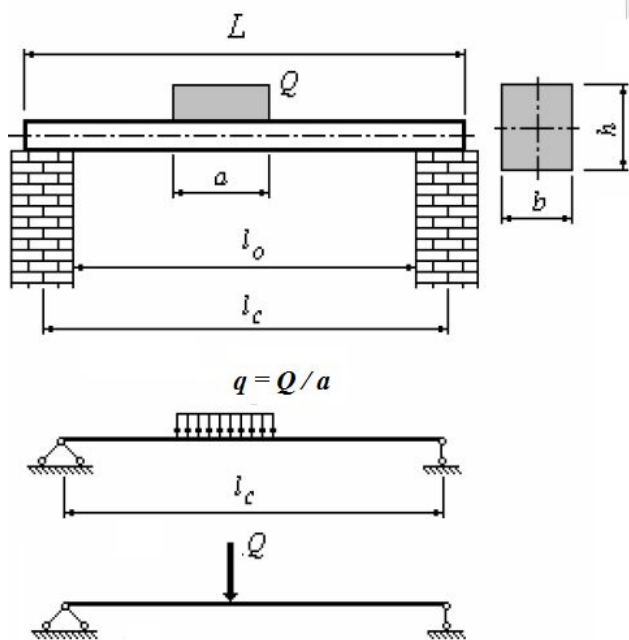
- характерні розміри конструкції;
- умови взаємодії з оточуючим середовищем (явищами, об'єктами або частинами цієї ж конструкції)

- навантаження:
  - обмеження переміщень (в'язі),

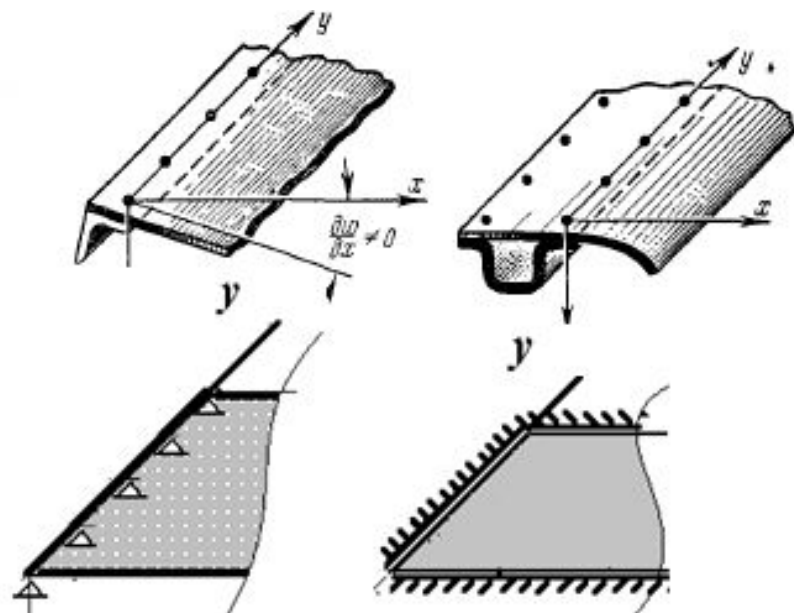
Забезпечує:

- прийнятність трудомісткості розрахунку;
- достовірність результатів.

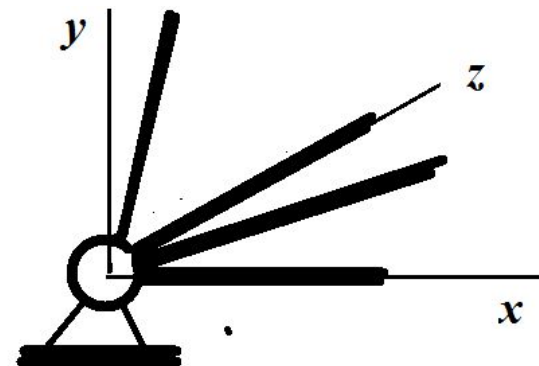
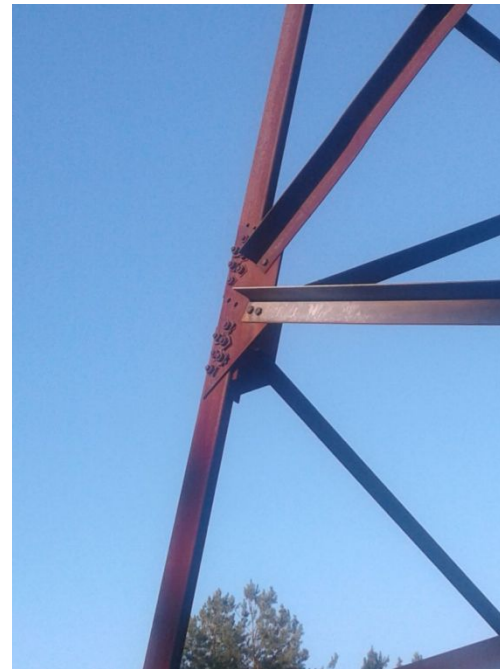
## Балка (плита перекриття)



## Умови опирання пластини



# Ферма (опора ЛЭП – просторова ферма)





# Лекція 2. Кінематичний аналіз розрахункових схем.

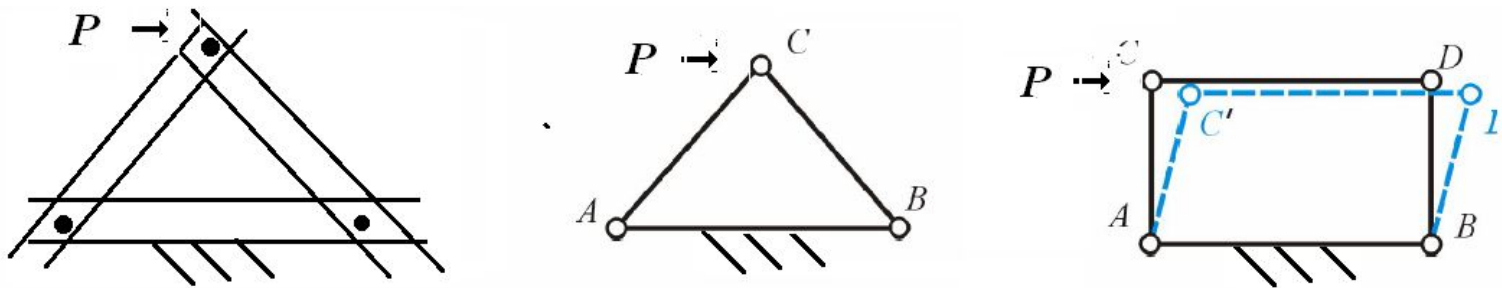
Кінематичний аналіз:

- визначення складу розрахункової схеми (РС) та можливості зміни її геометричної форми;
- дослідження взаємного розташування складових частин РС і вязей;
- визначення послідовності розрахунку (обчислення зусиль взаємодії частин РС)

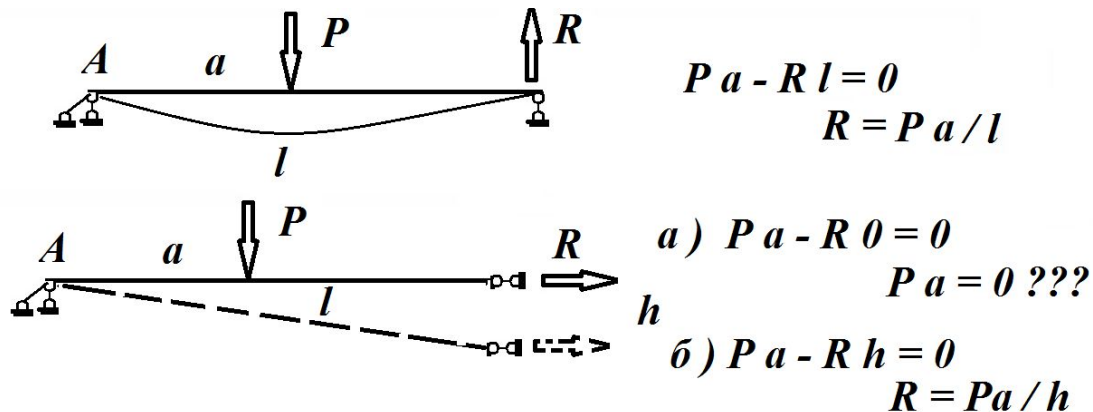
1) кількісний етап

2) якісний етап

Геометрично незмінні і геометрично змінні системи

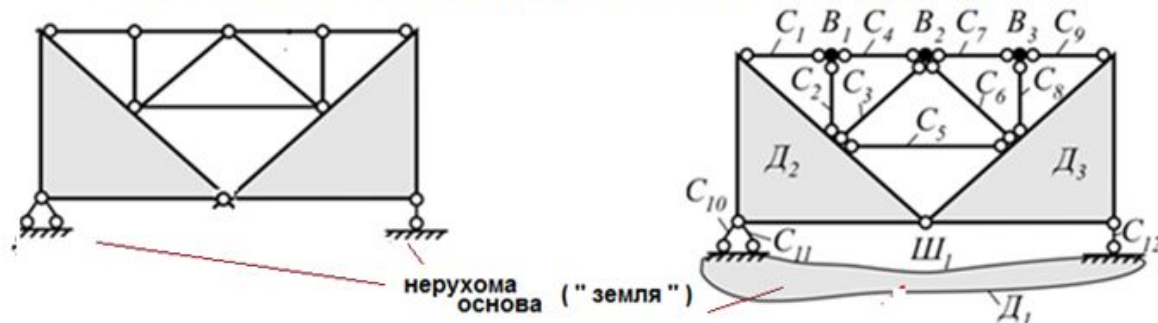


Миттєво змінні системи



**Кількісний етап кінематичного аналізу** – визначення кількості ступенів вільності розрахункової схеми за кількістю складових (конструктивних) елементів.

**Розрахункова і структурна схема конструкції**

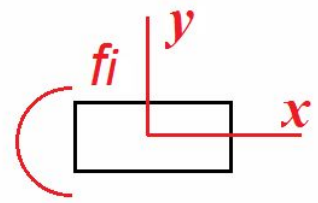


**Конструктивні елементи розрахункових схем**

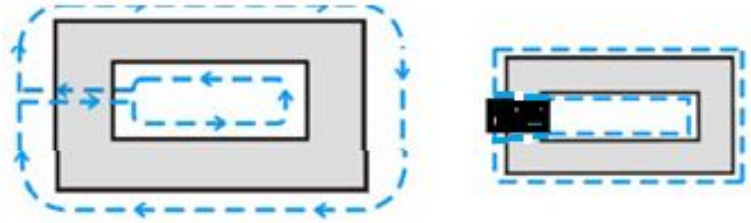
мають ступені вільності

обмежують ступені вільності

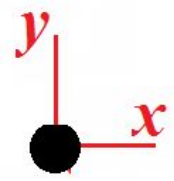
**Диски (= тверде тіло)** -- мають 3 ступені вільності - "**Д<sub>i</sub>**",



*Замкнений контур: статично невизначуваний, не є диском*



**Вузли (= матеріальні точки)** -- мають 2 ступені вільності - "**В<sub>i</sub>**"



## З'єднувальні пристрої ( = в'язі ) - обмежують ступені вільності

Назва	Умовне позначення	Реакції	Дозволені переміщення	Кількість обмежених переміщень	позначення
Стержень, кінематична в'язь, шарнірно-рухома опора				1	$C_i$
Шарнірно-нерухома опора				2	$Ш_i$
Ірипайка (зашемлення)				3	$П_i$
Муфта (ползун)				2	

Кількість з'єднувальних пристроїв в РС :

С - кількість дисків

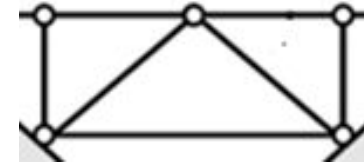
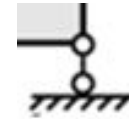
Ш – кількість простих шарнірів

П – кількість простих припайок

## Стержень:

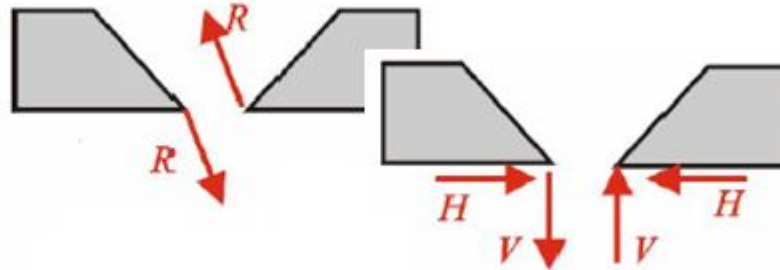
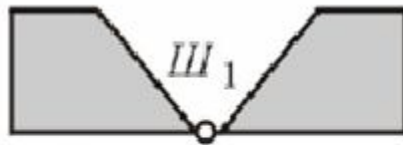


- модель шарнірно-рухомої опори – нескінчено-малої довжини
- складова частина конструкції (наприклад у фермах) –
  - скінченої довжини



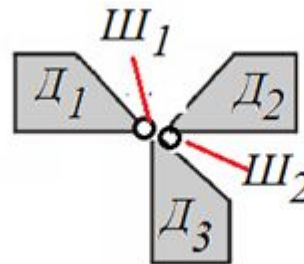
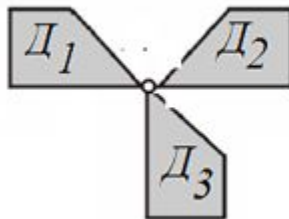
## Шарнір:

- простий шарнір – з'єднує два (!!!) диски



$$\bar{R} = \bar{V} + \bar{H}$$

- складений шарнір - з'єднує декілька дисків, може бути замінений простими

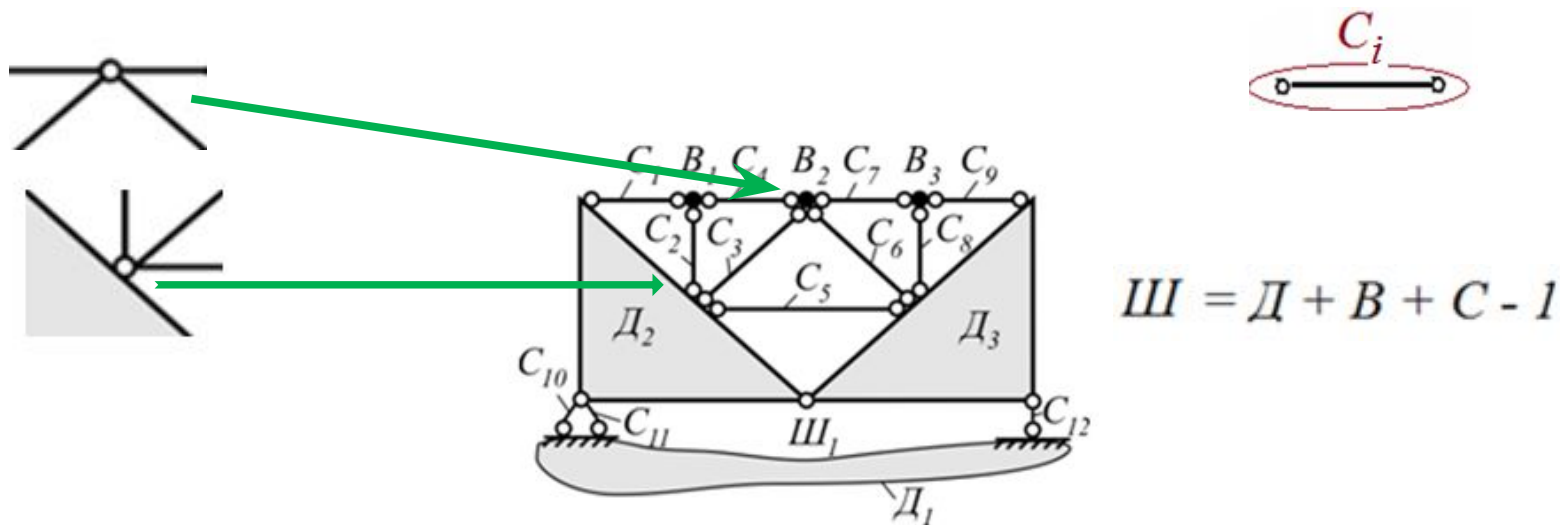


Кількість простих шарнірів

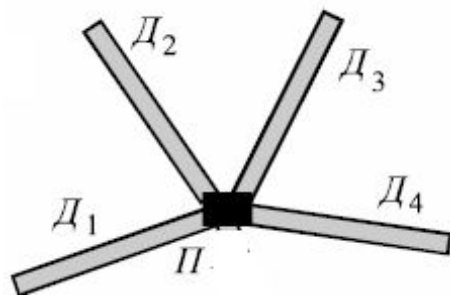
$$Ш_{\Pi} = D - 1$$

$D$  - кількість зєднаних дисків

При підрахунку кількості простих шарнірів ураховуються лише ті, що з'єднують диски. Шарніри на кінцях стержнів ураховуються.



### Складена припайка



$$\text{П} = \text{Д} - 1$$

# Формула Чебишова

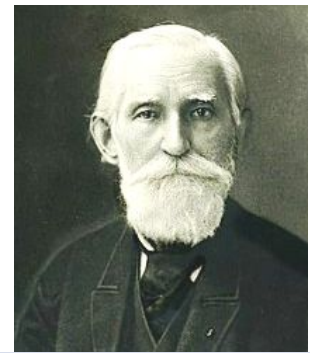
$\Gamma$  – кількість ступенів вільності (ступінь геометричної змінності) РС

$$\Gamma = 3D + 2B - 3\Pi - 2Ш_{\text{п}} - C - 3$$

Ступені вільності, наявні у елементів РС

Ступені вільності, обмежені в'язями РС

3 ступені вільності, яких не має "земля"



**Пафнутій Львович Чебишов ( 1821 - 1894 )**

математик і механік, засновник Петербурзької математичної школи,

1876 - створив «безперервний сумувальний апарат» (передача десятків).

1881 – розширив дію на множення і ділення (Арифмометр Чебишова).

$\Gamma > 0$  – РС є геометрично-змінною (має ступені вільності, в загальному випадку не може чинити опір навантаженню, потребує додавання в'язей)

$\Gamma = 0$  – РС є статично визначуваною (розрахунок може бути проведений із використанням рівнянь рівноваги) і може бути геометрично незмінною (має достатню кількість в'язей для усунення всіх наявних ступенів вільності)



$\Gamma < 0$  – РС є статично НЕ визначуваною (має кількість в'язей, що перевищує кількість наявних ступенів вільності) і може бути геометрично незмінною



!!!!

**Остаточний висновок про геометричну незмінність виконується на основі якісного етапу кінематичного аналізу**