

РОЗДІЛ 2. ДИНАМІКА

одні молекулярні шари зміщуються відносно інших — це деформація зсуву; якщо молекулярні шари повертаються одні відносно інших — це деформація кручення.

Якщо після припинення дії на тіло зовнішніх сил деформації повністю зникають, — це пружні деформації; якщо деформації зберігаються, — це пластичні деформації.

?

Контрольні запитання

1. Що таке деформація? У чому причина її виникнення? 2. Які види деформацій ви знаєте? 3. За яких умов виникає деформація розтягнення? стиснення? зсуву? вигину? кручення? Наведіть приклади. 4. Які фізичні величини характеризують деформації розтягнення та стиснення? Дайте їхні визначення. 5. Які деформації називають пружними? пластичними? Наведіть приклади.

§ 25. СИЛА ПРУЖНОСТІ. МЕХАНІЧНА НАПРУГА. ЗАКОН ГУКА

?!

Якщо ви стискаєте еспандер, натягаєте тятину лука, натискаєте на м'яч або згинаєте гілку дерева, тобто деформуєте ці тіла, ви відчуваєте їхній опір: з боку цих тіл на руку починає діяти сила, яка чинить опір дії вашої руки. Цей параграф допоможе вам згадати, що це за сила, яку природу вона має і як її можна обчислити.

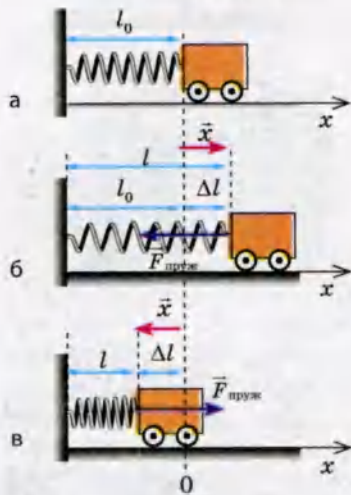


Рис. 25.1. Сила пружності $\vec{F}_{\text{пруж}}$ завжди прагне повернути тіло в попередній (недеформований) стан: а — недеформована пружина ($\Delta l = 0$, $F_{\text{пруж}} = 0$); б — розтягнута пружина ($\Delta l > 0$, $F_{\text{пруж}x} < 0$, $\vec{x} \uparrow \downarrow \vec{F}_{\text{пруж}}$); в — стиснута пружина ($\Delta l < 0$, $F_{\text{пруж}x} > 0$, $\vec{x} \uparrow \downarrow \vec{F}_{\text{пруж}}$). Тут \vec{x} — вектор зміщення кінця пружини; l_0 — довжина недеформованої пружини; l — довжина деформованої пружини; Δl — видовження пружини

1

Коли виникає сила пружності

У випадку пружної деформації завжди виникає сила, що прагне відновити той стан тіла, у якому тіло перебувало до деформації. Цю силу називають силою пружності (рис. 25.1).

Сила пружності — це сила, яка виникає під час пружної деформації тіла і напрямлена протилежно напрямку зміщення частин (частинок) цього тіла в процесі деформації.

Зазвичай силу пружності позначають символом $\vec{F}_{\text{пруж}}$. Однак є сили пружності, які для позначення мають власні символи.

Якщо тіло розташувати на опорі, то опора деформується (прогнеться). Деформація опори викликає появу сили пружності, яка діє на тіло *перпендикулярно до поверхні опори*. Силу пружності, яка діє на тіло з боку опори, називають *силою нормальної реакції опори* та позначають символом \vec{N} (рис. 25.2).

Якщо тіло закріпити на підвісі (нитці, джгуті, шнурі), то під дією тіла підвіс деформується (розтягнеться) і почне діяти на тіло з певною силою пружності, напрямленою *вдоль підвісу*. Силу пружності, яка діє

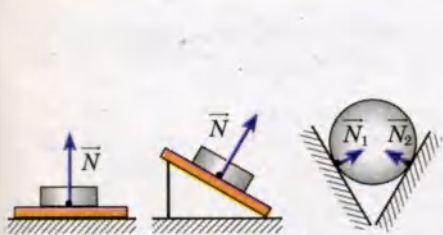


Рис. 25.2. Сила нормальної реакції опори \vec{N} завжди напрямлена перпендикулярно до поверхні опори

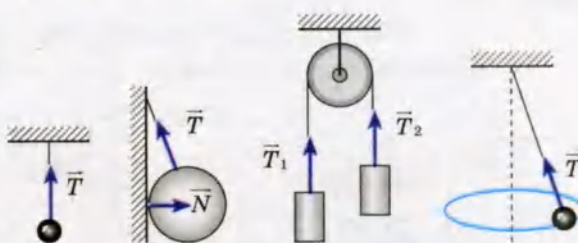


Рис. 25.3. Сила натягу підвісу (\vec{T}) завжди напрямлена вздовж підвісу

на тіло з боку підвісу, називають *силою натягу підвісу* та позначають символом \vec{T} (рис. 25.3).

2 Що таке механічна напруга

Стан деформованого тіла характеризують фізичною величиною, яка називається механічною напругою.

Механічна напруга σ — це фізична величина, яка характеризує деформоване тіло й дорівнює відношенню модуля сили пружності $F_{\text{пруж}}$ до площі S поперечного перерізу тіла (рис. 25.4):

$$\sigma = \frac{F_{\text{пруж}}}{S}$$

(Далі ми розглядатимемо тільки тіла з однаковою площею поперечного перерізу, наприклад стрижні.)

Одиниця механічної напруги в СІ — **паскаль** ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$).

Експериментально встановлено, що механічна напруга залежить від відносного видовження. Цю залежність виражає **закон Гука** (рис. 25.5):

У випадку малих пружних деформацій розтягнення та стиснення механічна напруга σ прямо пропорційна відносному видовженню ϵ :

$$\sigma = E |\epsilon|,$$

де E — **модуль Юнга (модуль пружності)**.

Відносне видовження ϵ — величина, яка не має розмірності, тому **одиниця модуля Юнга в СІ — паскаль** (як і одиниця механічної напруги).



Рис. 25.4. У будь-якому перерізі деформованого тіла виникають сили пружності, які перешкоджають руйнуванню тіла



Рис. 25.5. Роберт Гук (1635–1703) — англійський натураліст, учений-енциклопедист, один із засновників експериментальної фізики. Винайдений Гуком кардан застосовують у сучасному автомобілебудуванні, а запропонований ним пружинний балансир і зараз є основною частиною механічного годинника

РОЗДІЛ 2. ДИНАМІКА

Модуль Юнга характеризує пружні властивості матеріалу; його визначають експериментально та фіксують у таблицях:

Модулі Юнга деяких матеріалів

Матеріал	Модуль Юнга E , ГПа	Матеріал	Модуль Юнга E , ГПа
Алюміній	63–70	Гума м'яка	$15 \cdot 10^{-3}$ – $50 \cdot 10^{-3}$
Бетон	15–40	Срібло	82,7
Каучук	$7,9 \cdot 10^{-3}$	Сталь (легована)	206
Константан	160	Скло	49–78
Мідь (лиття)	82	Целулоїд	1,7–1,9
Мідь прокатна	108	Чавун ковкий	150

3 Ще одне формулювання закону Гука

Існує ще одне формулювання закону Гука:

У випадку малих пружних деформацій розтягнення та стиснення виникає сила пружності $\vec{F}_{\text{пруж}}$, яка прямо пропорційна видовженню тіла і діє в напрямку, протилежному напрямку зміщення частин (частинок) тіла під час деформації:

$$\vec{F}_{\text{пруж}} = -k\vec{x},$$

де k — жорсткість тіла (пружини*); \vec{x} — зміщення кінця тіла ($|x| = |\Delta l|$, $\Delta l = l - l_0$ — видовження тіла). Знак « $-$ » показує, що сила пружності завжди напрямлена в бік, протилежний напрямку зміщення ($\vec{F}_{\text{пруж}} \uparrow \downarrow \vec{x}$).

Закон Гука можна записати і в проекціях: $F_{\text{пруж}x} = -kx$, і для модулів: $F_{\text{пруж}} = k|x| = k|\Delta l|$.

Наслідки із закону Гука

1. Графік залежності проекції сили пружності від модуля видовження тіла — пряма, тангенс кута нахилу якої до осі абсцис дорівнює жорсткості тіла (рис. 25.6).

2. Жорсткість тіла залежить від пружних властивостей матеріалу, з якого виготовлене тіло, і від геометричних параметрів тіла.

Справді, закон Гука, записаний у вигляді:

$$\sigma = E|\varepsilon|, \quad (1)$$

легко привести до вигляду:

$$F_{\text{пруж}} = k|\Delta l|.$$

* У техніці та фізичному експерименті часто застосовують спіралевидні пружини. Під час їх розтягнення та стиснення виникають сили пружності, які теж підпорядковуються закону Гука.

Підставивши вирази $\sigma = \frac{F_{\text{пруж}}}{S}$, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ у формулу (1), маємо: $\frac{F_{\text{пруж}}}{S} = E \frac{|\Delta l|}{l_0}$, звідки $F_{\text{пруж}} = \frac{ES}{l_0} |\Delta l| = k |\Delta l|$. Таким чином: $k = \frac{ES}{l_0}$.

3. Одиниця жорсткості в СІ — **НЬЮТОН на метр** $\left(\frac{\text{Н}}{\text{м}}\right)$, оскільки $k = \frac{F_{\text{пруж}}}{|x|}$.

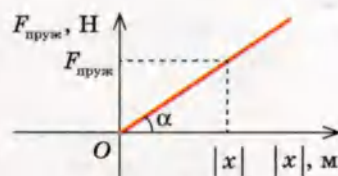


Рис. 25.6. Оскільки $F_{\text{пруж}} = k|x|$, то графіком залежності сили пружності від модуля видовження тіла є пряма, що проходить через точку перетину осей $F_{\text{пруж}}$ і $|x|$; $\text{tg} \alpha = \frac{F_{\text{пруж}}}{|x|} = k$

4 Яку природу має сила пружності

Відомо, що всі тіла складаються з атомів (молекул, йонів), а ті в свою чергу — з ядра, яке має позитивний заряд, і електронної хмари, заряд якої негативний. Між зарядженими частинками існують сили електромагнітного притягання та відштовхування.

Якщо тіло не деформоване, то сили притягання частинок дорівнюють силам відштовхування. У разі деформації взаємне розташування атомів (молекул, йонів) у тілі змінюється. Якщо відстань між ними збільшується, то електромагнітні сили притягання стають більшими, ніж сили відштовхування, і в результаті атоми (молекули, йони) притягуються одне до одного. Якщо відстань між частинками зменшується, то більшими стають електромагнітні сили відштовхування. Інакше кажучи, частинки речовини «прагнуть» повернутися до стану рівноваги.

Таким чином, сила пружності — прояв електромагнітної взаємодії частинок речовини.

5 Учимося розв'язувати задачі

Задача. З вертольота, який «висить» на певній висоті над поверхнею Землі, спускають сталевий трос. Якою може бути найбільша довжина троса, щоб він не обірвався під власною вагою? Максимальна механічна напруга, яку може витримати сталь (межа міцності сталі), — 320 МПа.

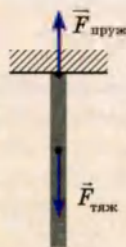
Дано:

$$\sigma_{\text{max}} = 3,2 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$$

l — ?



Аналіз фізичної проблеми. Виконаємо пояснювальний рисунок. На трос діють дві сили: сила тяжіння та сила пружності. Очевидно: якщо трос розірветься, то в якнайвищому перерізі. Оскільки трос перебуває у стані спокою, то за модулем сила тяжіння дорівнює силі пружності:

$$F_{\text{тяж}} = F_{\text{пруж}} \quad (1)$$

Пошук математичної моделі, розв'язання. Знайдемо силу тяжіння: $F_{\text{тяж}} = mg$, де $m = \rho V$, а $V = Sl$. Таким чином:

$$F_{\text{тяж}} = \rho Slg. \quad (2)$$

З визначення механічної напруги: $\sigma = \frac{F_{\text{пруж}}}{S}$ — випливає, що

$$F_{\text{пруж}} = \sigma S. \quad (3)$$

Підставимо вирази (2) і (3) у рівність (1):

$$\rho Slg = \sigma S, \text{ звідси } l = \frac{\sigma}{\rho g}.$$

Густина сталі визначимо за таблицею.

Визначимо значення шуканої величини:

$$[l] = \frac{\text{Па}}{\text{кг/м}^3 \cdot \text{м/с}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{кг}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{кг}} = \text{м};$$

$$\{l\} = \frac{3,2 \cdot 10^8}{7,8 \cdot 10^3 \cdot 10} = 4,1 \cdot 10^3; \quad l = 4,1 \cdot 10^3 \text{ м} = 4,1 \text{ км}.$$

Відповідь: найбільша довжина троса $l = 4,1$ км.



Підбиваємо підсумки

Сила, яка виникає у тілі в разі його пружної деформації та напрямлена протилежно напрямку зміщення частин (частинок) тіла в процесі деформації, називається силою пружності. Ця сила виникає в результаті електромагнітної взаємодії частинок речовини.

Фізична величина, яка характеризує деформоване тіло й дорівнює відношенню модуля сили пружності $F_{\text{пруж}}$ до площі S поперечного перерізу тіла, називається механічною напругою σ : $\sigma = \frac{F_{\text{пруж}}}{S}$.

Закон Гука: для малих пружних деформацій розтягнення та стиснення механічна напруга σ прямо пропорційна відносному видовженню $|\varepsilon|$: $\sigma = E|\varepsilon|$, де E — модуль Юнга (модуль пружності), який характеризує пружні властивості речовини.

Закон Гука можна сформулювати й так: у разі малих пружних деформацій розтягнення та стиснення виникає сила пружності, яка прямо пропорційна видовженню тіла та діє в напрямку, протилежному напрямку зміщення частин (частинок) тіла під час деформації: $\vec{F}_{\text{пруж}} = -k\vec{x}$, де k — жорсткість тіла, що залежить від матеріалу, з якого виготовлене тіло, і геометричних розмірів тіла.



Контрольні запитання

1. Дайте визначення сили пружності. Як напрямлена ця сила?
2. Яку силу називають силою нормальної реакції опори? Як вона напрямлена? Наведіть приклади.
3. Яку силу називають силою натягу підвісу? Як вона напрямлена? Наведіть приклади.
4. Дайте визначення механічної напруги. Схарактеризуйте її.
5. Подайте два формулювання закону Гука та доведіть їхню ідентичність.
6. Якими є межі застосовності закону Гука (за яких умов він виконується)?
7. Що характеризує модуль Юнга? Якою є його одиниця в СІ?
8. Від чого залежить жорсткість тіла? Яка її одиниця в СІ?
9. Яку природу має сила пружності? Поясніть причину її виникнення.

Вправа № 21

1. На скільки видовжиться гумовий шнур під дією сили 5 Н, якщо його жорсткість 25 Н/м?
2. Визначте силу пружності, прикладену до стрижня вздовж його осі, якщо в стрижні виникла механічна напруга 150 МПа. Радіус перерізу стрижня 2 мм.
3. Яку силу потрібно прикласти до сталевго дроту завдовжки 3,6 м і площею поперечного перерізу 1 мм², щоб збільшити його довжину на 2 мм?
4. Під дією тягаря масою 10 кг дріт завдовжки 5 м видовжився на 1 мм. Визначте модуль Юнга та механічну напругу, яка виникла в дроті. Площа поперечного перерізу дроту 2,5 мм².
- 5*. Жорсткість гумового шнура 10 Н/м. Якою буде жорсткість системи двох таких шнурів, якщо їх з'єднати послідовно? паралельно?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Тема. Вимірювання жорсткості пружини.

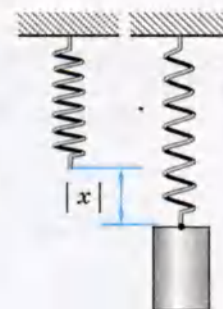
Мета: виміряти жорсткість пружини динамометра.

Обладнання: динамометр зі шкалою, заклеєною папером, штатив із муфтою та лапкою, набір тягарців масою по 100 г, лінійка з міліметровими поділками.

ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ**II Підготовка до експерименту**

1. Перш ніж почати виконувати роботу, пригадайте відповіді на подані нижче запитання та розв'яжіть задачу.
 - 1) Що таке жорсткість? Яка одиниця жорсткості в СІ?
 - 2) Чи залежить у разі пружної деформації жорсткість пружини від її видовження?
 - 3) Як обчислити силу тяжіння, яка діє на тіло відомої маси?

Задача. Тіло масою m підвісили на пружині; довжина пружини збільшилася на $|x|$ (див. рисунок). Зобразіть сили, що діють на тіло, визначте жорсткість пружини.



2. Проаналізувавши одержану в результаті розв'язання задачі формулу, з'ясуйте, які фізичні величини необхідно виміряти в ході лабораторної роботи та які прилади для цього потрібні.
3. Закріпіть динамометр у лапці штатива.
4. Позначте на папері, що наклеєний на шкалі динамометра, початкове положення покажчика динамометра.

III Експеримент

Результати вимірювань відразу заносьте до таблиці.

1. Підвісьте до пружини динамометра один тягарець. Позначте положення покажчика динамометра.
2. Додаючи по черзі до першого тягарця другий, третій, четвертий тягарці, щоразу позначайте положення покажчика динамометра.

3. Зніміть динамометр. Лінійкою виміряйте відстані від першої до другої позначки, від першої до третьої позначки і т. д. Ці відстані дорівнюють видовженню пружини динамометра відповідно з одним, двома і т. д. тягарцями.

Опрацювання результатів експерименту

1. Обчисліть середнє значення жорсткості пружини динамометра. Для цього виконайте такі дії.
- 1) За результатами дослідів побудуйте графік залежності модуля сили пружності від модуля видовження.
(Зверніть увагу: у моменти вимірювань тягарці були в стані спокою, отже, $F_{\text{пруж}} = F_{\text{тяж}}$; якщо тягарці відсутні, пружина недеформована, тож графік проходить через точку ($|x|=0$, $F_{\text{пруж}}=0$); графік слід проводити так, щоб з різних боків від прямої була приблизно однакова кількість точок (див. § 4).)
- 2) Виберіть на графіку довільну точку, визначте відповідні їй значення сили пружності $F_{\text{пруж}}$ та видовження пружини $|x|$, за формулою $k_{\text{сер}} = \frac{F_{\text{пруж}}}{|x|}$ обчисліть середнє значення жорсткості пружини.
2. Оцініть відносну та абсолютну похибки вимірювання жорсткості. Для цього виконайте такі дії.
- 1) Обчисліть відносну похибку вимірювання сили пружності.
Оскільки $F_{\text{пруж}} = mg$, то $\epsilon_F = \epsilon_m + \epsilon_g = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta g}{g}$. Вважайте, що $\Delta m = 0,002$ кг; $\Delta g = 0,02$ м/с²; $g = 9,8$ м/с².
- 2) Обчисліть абсолютну та відносну похибки вимірювання модуля видовження пружини: $\Delta|x| = \sqrt{\Delta x_{\text{прил}}^2 + \Delta x_{\text{вимп}}^2}$; $\epsilon_{|x|} = \frac{\Delta|x|}{|x|}$.
- 3) Обчисліть абсолютну та відносну похибки вимірювання жорсткості. Оскільки $k = \frac{F_{\text{пруж}}}{|x|}$, то $\epsilon_k = \epsilon_F + \epsilon_{|x|}$, відповідно $\Delta k = \epsilon_k k_{\text{сер}}$.
3. Округліть результати й запишіть результат вимірювання жорсткості пружини у вигляді: $k = k_{\text{сер}} \pm \Delta k$.
4. Закінчіть заповнення таблиці.

Но- мер до- сліду	Маса тягаря m , кг	Модуль сили пружності $F_{\text{пруж}} = mg$, Н	Видов- ження пружини $ x $, м	Жорсткість			
				Середнє значення $k_{\text{сер}}$, Н/м	Похибка вимірювання		Результат вимірю- вання $k = k_{\text{сер}} \pm \Delta k$, Н/м
					відносна ϵ_k , %	абсолютна Δk , Н/м	

Аналіз експерименту та його результатів

Проаналізуйте експеримент і його результати. Зробіть висновок, у якому зазначте, яку величину ви вимірювали, яким є результат вимірювання, у чому причина похибки.

Творче завдання

Запишіть план проведення експерименту з визначення модуля Юнга гуми. Які фізичні величини вам слід для цього виміряти? Які прилади вам будуть потрібні?

§ 26. ВАГА ТІЛА. ВАГА ТІЛА, ЯКЕ РУХАЄТЬСЯ З ПРИСКОРЕННЯМ. НЕВАГОМІСТЬ. ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ

Зі спогадів Ю. О. Гагаріна: «Я відчув, що якась нездоланна сила дедалі більше втискає мене в крісло. І хоч воно було розташоване так, щоб максимально зменшити вплив велетенської ваги, яка навалилася на моє тіло, було важко ворухнути рукою й ногою».

Про те, як і чому виникають перевантаження, за яких умов тіло перебуває у стані невагомості, ви дізнаєтеся з цього параграфа.

Що таке вага тіла

У результаті притягання до Землі всі тіла стискають або прогинають опору, розтягують підвіс. Сила, яка характеризує таку дію тіл, називається *вагою*.

Вага тіла \vec{P} — це сила пружності, з якою внаслідок притягання до Землі тіло діє на горизонтальну опору або вертикальний підвіс.

У СІ одиниця ваги, як і будь-якої іншої сили, — **ньютон (Н)**.

На відміну від сили тяжіння, яка прикладена до тіла, *вага прикладена до опори або підвісу* (рис. 26.1). Вага тіла і сила тяжіння відрізняються й своєю природою: сила тяжіння має гравітаційну природу; вага тіла — це сила пружності, тому *вага має електромагнітну природу*.

З'ясуємо причину виникнення ваги тіла. Для цього розглянемо тіло, що лежить на горизонтальній опорі (рис. 26.2), і тіло, розміщене на вертикальному підвісі (рис. 26.3). На кожне тіло діють дві сили: у першому випадку — сила тяжіння $m\vec{g}$ та сила реакції опори \vec{N} ; у другому випадку — сила тяжіння $m\vec{g}$ та сила натягу

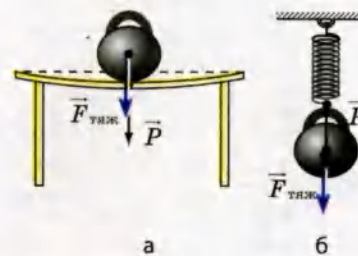


Рис. 26.1. Сила тяжіння $\vec{F}_{\text{тяж}}$ діє на тіло (прикладена до центра тяжіння тіла); вага тіла \vec{P} діє на опору (а) або підвіс (б)

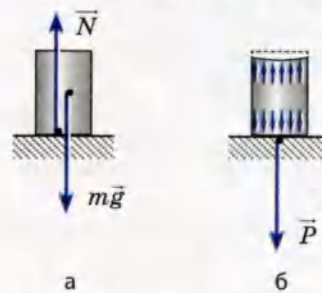


Рис. 26.2. Дії сили тяжіння $m\vec{g}$ та сили реакції опори \vec{N} спричинюють деформацію стиснення (а). У результаті тіло, прагнучи повернутись у недеформований стан, тисне на опору із силою пружності \vec{P} (б)