

# С В І Т

# ФІЗИКИ

науково-популярний журнал

№2  
2012

ВЕНЕРА

СОНЦЕ



*Кожне нове відкриття не є межею,  
далі якої не можна йти, а навпаки,  
веде до нових наукових досліджень*

*Джозеф Джон Томсон*

*швидкість*

*рух*

*траєкторія*

*потужність*

ЄВРО  
2012



# ТРАНЗИТ ВЕНЕРИ ПО ДИСКУ СОНЦЯ



Венера – це друга від Сонця планета Сонячної системи з періодом обертання в 224,7 земних діб. Її назвали Венерою на честь римської богині любові. У грецькій міфології називають Афродітою.

Венера – третя за яскравістю на небі після Сонця і Місяця. Атмосфера Венери містить непрозорі хмари з сірчаної кислоти, що робить неможливим проведення оптичних спостережень поверхні. Атмосфера планети перебуває в стані сильної циркуляції та обертання. Повний цикл обертання атмосфери складає чотири земних дні, а повний оборот довкола Сонця Венера здійснює за 243 дні.

Проходження Венери по диску Сонця траплялося чотири рази за 243 роки. Транзити Венери завжди проходять парою, і ця пара (тобто два проходження з інтервалом лише в декілька років) трапляється раз у 115 років або раз у 121 рік. Це відбувається тому, що орбіти Венери та Землі лежать у різних площинах. І транзит стає можливим лише тоді, коли Венера, Земля і Сонце опиняються на одній лінії.

Із Землі дослідники спостерігали проходження Венери по диску Сонця лише сім разів: у 1631, 1639, 1761, 1769, 1874, 1882 і 2004 роках. Тривалість проходження триває декілька годин.

У ніч на середу, 7 червня 2012 року, астрономи у різних частинах Землі спостерігати унікальне астрономічне явище – проходження Венери по диску Сонця. Транзит планети розпочався о 22 годині за Гринвічем у вівторок і тривав понад шість годин. Наступне таке явище можна буде побачити лише за 105 років – 2117-го, далі у грудні 2125 році.

Дослідження цього явища дуже важливе для розвитку науки. У XVII і XVIII ст., спостерігаючи проходження Венери по сонячному диску, вчені змогли обчислити відстань від Землі до Сонця та отримати перші дані про атмосферу Венери.

Сучасне обладнання допомагає отримати дуже точну інформацію про місцезнаходження планет та їхні маси, а також про відстань від них до Землі й Сонця. Спостерігаючи за Венерою цього року, дослідники зможуть налаштувати точніше прилади та уточнити методики пошуку планет поблизу інших зір і ознаки життя на них.

Ще Йоганн Кеплер 1630 року передбачив точну дату першого проходження Венери по диску Сонця, що було видно із Землі.

У Європі тисячі людей спостерігали транзит Венери на спеціально організованих майданчиках, де проходження планети трансливали на великий екран. Пряму трансляцію події вели і кілька інтернет-сайтів. На Гаваях університетський Інститут астрономії встановив телескопи на одному з пляжів.

Українські астрономи також спостерігали за цим унікальним явищем. На території України максимум фази, коли Венера перебувала найближче до центра диску Сонця, можна було спостерігати на світанку у Луганській області.

Журнал "СВІТ ФІЗИКИ",  
заснований 1996 року,  
реєстраційне свідоцтво № КВ 3180  
від 06.11.1997 р.

Виходить 4 рази на рік

**Засновники:**

Львівський національний університет  
імені Івана Франка,  
Львівський фіз.-мат. ліцей,  
СП "Євросвіт"

Головний редактор

**Іван Вакарчук**

заступники гол. редактора:

**Олександр Гальчинський**

**Галина Шопа**

Редакційна колегія:

**Ігор Анісімов**

**Михайло Бродин**

**Петро Голод**

**Семен Гончаренко**

**Ярослав Довгий**

**Іван Климишин**

**Юрій Ключковський**

**Богдан Лукіянець**

**Олег Орлянський**

**Максим Стріха**

**Юрій Ранюк**

**Ярослав Яцків**

Художник **Володимир Гавло**

Комп'ютерне макетування та друк  
СП "Євросвіт"

**Адреса редакції:**

Редакція журналу "Світ фізики"

вул. Саксаганського, 1,  
м. Львів 79005, Україна

тел. у Львові 380 (0322) 39 46 73

у Києві 380 (044) 416 60 68

phworld@franko.lviv.ua

www.franko.lviv.ua/publish/phworld

Американські вчені з Ліверморської національної лабораторії випробували найпотужніший у світі лазер. Імпульс, створений за допомогою 192 променів, з піковою потужністю 500 трильйонів ( $500 \cdot 10^{12}$ ) Вт вразив мішень діаметром 2 мм. Імпульс проіснував лише 23 мільярдних долі секунди, та його потужність у тисячу разів більша від потужності, яку споживають усі жителі США.

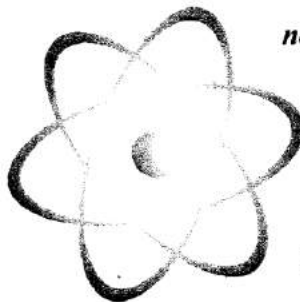
У США створено Національний комплекс лазерних термоядерних реакцій (National Ignition Facility, NIF) для здійснення керованого термоядерного синтезу за допомогою лазерів.

Основна мета проекту – вивчення контрольованої термоядерної реакції. Для цього на мішень, яку заповнено дейтерієм і тритієм, скеровують потужний лазерний імпульс. Під час експерименту ультрафіолетові промені донесли до цілі 1,85 МДж енергії.

Під впливом лазерного імпульсу гранула має стискатися в кілька сотень разів. Атоми дейтерію перетворюватимуться в атоми гелію, при цьому вивільнятимуться нейтрони, і виділятиметься велика кількість енергії.

Директор комплексу Едвард Мозес (Edward Moses) вважає ці випробування історичними і називає їх першим серйозним кроком до отримання чистої термоядерної енергії.

Уперше в лабораторних умовах здійснено те, що відбувається лише в надрах зір. Це можна порівняти з процесами ядерного синтезу, що відбуваються у водневій бомбі. Та на відміну від бомби, реакцію за участю лазера повністю можна контролювати. Про потужність лазера у 500 терават учені мріяли ще від 1990-і роки, коли планували майбутню роботу NIF.



*Не забудьте  
передплатити журнал  
"Світ фізики"*

**Передплатний індекс  
22577**

Передрук матеріалів дозволяється лише з письмової згоди редакції та з обов'язковим посиланням на журнал "Світ фізики"

© СП "Євросвіт"

# ЗМІСТ

## 1. Нові та маловідомі явища фізики

<i>Айнштайн Альберт.</i> Елементарна теорія броунівського руху	3
<i>Смолуховський Мар'ян.</i> Межі застосовності другого начала теорії теплоти	9
<i>Шопа Ярослав.</i> Шапка-невидимка реальна вже сьогодні	12

## 2. Фізика світу

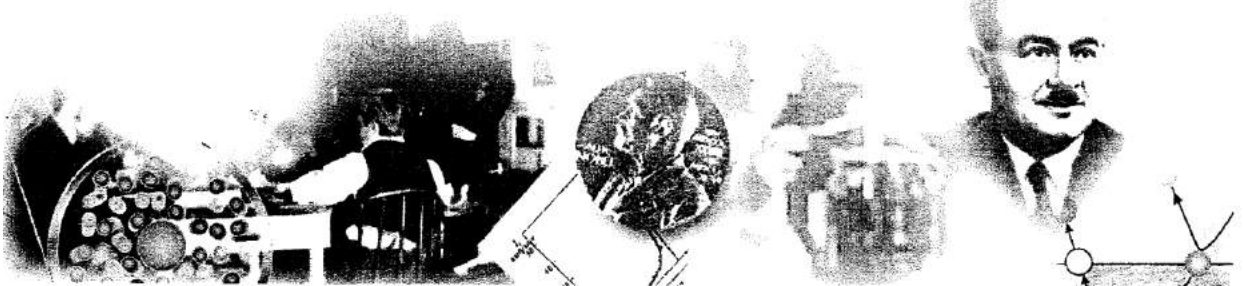
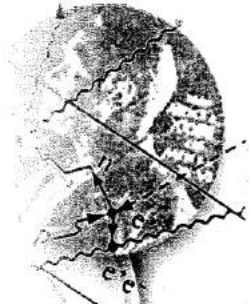
Роки життя та наукова діяльність Мар'яна Смолуховського	21
<i>Анрі Віктор.</i> Мар'ян фон Смолуховський	23
<i>Пляцко Роман.</i> Професор, академік Олекса-Мирон Біланюк і концепція тахіонів	26

## 3. Олімпіади, турніри...

<i>Федоренко Анатолій.</i> Деякі задачі та розв'язки Всеукраїнської олімпіади з фізики (Львів, 2012 р.)	31
---	----

## 4. Реальність і фантастика

Чи міг Архімед підняти Землю?	42
Байка про лебедя, рака і щуку	44
Ще про м'яч	46







# ЕЛЕМЕНТАРНА ТЕОРІЯ БРОУНІВСЬКОГО РУХУ<sup>1</sup>

*Альберт Айнштайн*

Професор Р. Лоренц під час однієї з розмов зі мною зауважив, що багатьом хемікам було б корисно елементарне викладення теорії броунівського руху. Слідуючи його пораді, я подаю в цій праці просту теорію цього явища.

Хід міркувань коротко такий. Насамперед ми дослідимо, як залежить процес дифузії в слабкому недисоційованому розчині від розподілу в ньому осмотичного тиску і від рухомості розчиненої речовини відносно розчинника. Ми отримаємо вираз для коефіцієнта дифузії для випадку, коли молекула розчиненої речовини велика порівняно з молекулою розчинника. У цей вираз входить лише в'язкість розчинника і діаметр розчинених молекул. Ніякі інші величини, що залежать від природи розчину, не входять.

Далі розглянемо замість процесу дифузії хаотичний рух розчинених молекул і знайдемо, як можна обчислити середню величину цього хаотичного руху, виходячи з коефіцієнта дифузії, тобто, за попереднім результатом, із в'язкості розчинника і величини розчинених молекул. Отриманий таким шляхом результат справджується не лише для власне розчинених молекул, а також і для довільних, зважених у рідині невеликих частинок.

<sup>1</sup>A. Einstein. – Elektrochemie, 1908. – 14. – S. 235–239.

На початку минулого сторіччя з'явилася низка праць з питань броунівського руху, над якими працювали незалежно один від одного відомі фізики А. Айнштайн і М. Смолуховський. Пропонуємо читачам ознайомитися з деякими з них.

## 1. Дифузія та осмотичний тиск

Нехай циліндрична посудина  $Z$  (рис. 1) заповнена розбавленим розчином. Всередині посудини розміщено рухомий поршень  $K$ , який зроблений як напівпрозора перегородка, що розділяє середину циліндра на дві частини  $A$  і  $B$ .

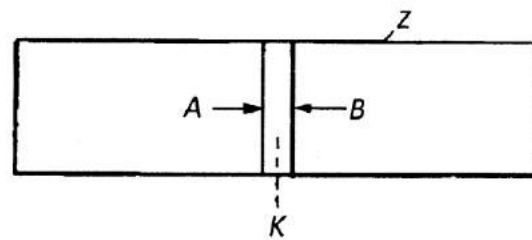


Рис. 1

Якщо у  $A$  концентрація розчину більша, ніж у  $B$ , то для того, щоб підтримати його в рівновазі, на поршень має діяти зовнішня сила, напрямлена ліворуч. Ця сила дорівнює різниці осмотичних тисків, спричинених розчиною зліва і справа від поршня.

Якщо ж ця зовнішня сила не діятиме на поршень, то під впливом сильнішого осмотичного тиску розчин, який є в  $A$ , рухатиметься направо доти, поки концентрації в  $A$  і  $B$  не вирівняються. З цього міркування випливає, що саме сили осмотичного тиску зумовлюють під час дифузії вирівнювання концентрацій.

Справді, можна чинити опір процесові дифузії, тобто вирівнювання концентрацій, якщо різниця осмотичних тисків, що відповідає різниці концентрацій, протиставити рівну їй зовнішню силу, що діє на напівпрозору перегородку.



родку. Те, що під час дифузійних процесів осмотичний тиск можна розглядати як рухому силу, давно відомо.

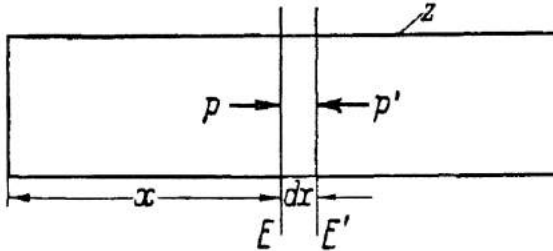


Рис. 2.

Нернст, як відомо, обґрунтував на цьому своє дослідження про зв'язок між рухомістю іонів, коефіцієнтом дифузії та електрорушійною силою концентрованих елементів.

Всередині циліндра *A* (рис. 2), переріз якого, як ми вважаємо, дорівнює одиниці, відбувається процес дифузії вздовж його осі. Нас цікавлять насамперед осмотичні сили, які викликають дифузійний рух розчиненої речовини, що знаходиться між нескінченно близькими площинами *E* і *E'*. Зліва на граничну поверхню *E* шару діє сила осмотичного тиску *p*, справа на граничну поверхню *E'* – сила *p'*.

Відтак результативна сила тиску дорівнює

$$p - p'.$$

Позначимо тепер відстань площини *E* від лівого кінця посудини через *x*, а відстань площини *E'* від того ж кінця – через *x + dx*, тоді об'єм шару рідини, яку розглядаємо, дорівнює *dx*.

Осмотична сила, що діє на об'єм *dx* розчиненої речовини

$$K = \frac{p - p'}{dx} = - \frac{p' - p}{dx} = - \frac{dp}{dx}$$

є осмотичною силою, що діє на розчинену речовину, яка розміщена в одиниці об'єму.

Оскільки далі осмотичний тиск виражається рівнянням

$$p = RT\nu,$$

де *R* – газова стала ( $8,31 \cdot 10^7$ ); *T* – абсолютна температура; *ν* – кількість розчинених грам-молекул на одиницю об'єму.

Остаточно отримуємо такі вирази для осмотичної сили *K*, що діє на речовину, розчинену в одиниці об'єму:

$$K = -RT \frac{d\nu}{dx}. \quad (1)$$

Щоб розрахувати тепер дифузійний рух, який викликано цими рухомими силами, треба ще знати, який опір чиниться рухові розчиненої речовини з боку розчинника. Якщо на молекулу діє рухома сила *k*, то вона надає молекулі пропорційну швидкість *υ*, згідно з рівнянням

$$\nu = \frac{k}{\mathfrak{R}}, \quad (2)$$

де *ℜ* – стала, яку ми назвемо опором тертя для молекули.

Загалом цей опір не піддається теоретичному обліку. Однак, якщо розчинену молекулу подати приблизно у вигляді кулі, великої порівняно з молекулою розчинника, то опір тертя для розчиненої молекули можна визначити за методами звичайної гідродинаміки, що не враховує молекулярної будови рідини. У межах застосування звичайної гідродинаміки для кулі, що рухається у рідині, справджується рівняння (2), до того ж має дорівнювати

$$\mathfrak{R} = 6\pi\eta\rho. \quad (3)$$

Тут *η* – коефіцієнт в'язкості рідини; *ρ* – радіус кулі.

Якщо припустити, що молекули розчиненої речовини приблизно мають сферичну форму і великі порівняно з молекулами розчинника, то рівняння (3) можна застосувати до окремих розчинених молекул.





Тепер ми можемо обчислити кількість розчиненої речовини, що дифундує крізь поперечний переріз циліндра за одиницю часу.

Нехай в одиниці об'ємі перебуває  $\nu$  граммолекул, тобто  $\nu N$  реальних молекул, де  $N$  – кількість реальних молекул в одній граммолекулі.

Якщо сила  $K$  розподіляється на ці  $\nu N$  молекул, які перебувають в одиниці об'єму, то вона надає їм швидкість у  $\nu N$  разів меншу порівняно з тією, яку вона надала б окремій молекулі, якщо б вона діяла лише на неї. Тому, беручи до уваги рівняння (2), отримаємо такий вираз для швидкості  $\nu$ , що надає  $\nu N$  молекулам силу  $K$ :

$$\nu = \frac{1}{\nu N} \cdot \frac{K}{\mathfrak{R}}$$

У цьому випадку  $K$  дорівнює обчисленій вище осмотичній силі, що діє на  $\nu N$  молекул одиниці об'єму.

Відтак, користуючись рівнянням (1), отримаємо:

$$\nu \nu = - \frac{RT}{N} \cdot \frac{1}{\mathfrak{R}} \cdot \frac{d\nu}{dx} \quad (4)$$

У лівій частині стоїть добуток із концентрації  $\nu$  розчиненої речовини на швидкість, з якою рухається розчинена речовина в процесі дифузії. Отже, цей добуток – це кількість розчиненої речовини (у граммолекулах), яка пройшла в процесі дифузії через одиницю пере-

різу за одну секунду. Тому множники біля  $\frac{d\nu}{dx}$  у правій частині цього рівняння є не що іншим, як коефіцієнт дифузії  $D$  розчину, який ми розглядаємо.

Відтак маємо:

$$D = \frac{RT}{N} \cdot \frac{1}{\mathfrak{R}}, \quad (5)$$

у випадку, якщо молекули, що дифундують, можна вважати сферичними і великими порівняно з молекулами розчинника, за рівнянням (3):

$$D = \frac{RT}{N} \cdot \frac{1}{6\pi\eta\rho} \quad (5a)$$

В останньому випадку коефіцієнт дифузії не залежить ні від яких сталих, які характеризують цю речовину, крім в'язкості  $\eta$  розчинника і радіуса  $\rho$  молекули.

## 2. Дифузія і хаотичний рух молекул

Молекулярна теорія теплоти розкриває ще один погляд на процес дифузії. Хаотичний процес руху, яким ми маємо уявити собі теплоту, що зберігається у речовині, приводить до того, що окремі молекули рідини змінюють свої місця якось неправильно. Таке хаотичне блукання молекул розчиненої речовини у розчині веде до того, що початковий, нерівномірний розподіл концентрації розчиненої речовини поступово поступається місцем рівномірному.

Дослідимо трохи докладніше цей процес, до того ж обмежимося знову випадком, який було розглянуто в параграфі 1, коли беруть до уваги дифузію лише в одному напрямку, тобто в напрямку осі циліндра  $Z$  (вісь  $x$ ).

Уявімо собі, що в деякий певний момент часу  $t$  координати  $x$  усіх розчинених молекул нам відомі і точно так у момент часу  $(t + \tau)$ , де  $\tau$  настільки малий проміжок часу, що співвідношення концентрацій нашого розчину змінюється за цей проміжок дуже мало. Нехай упродовж цього проміжка часу  $\tau$ , внаслідок неправильного теплового руху, координата  $x$  першої молекули зміниться на деяку величину  $\Delta_1$ , другої – на  $\Delta_2$  і т. д. Ці переміщення  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  і т. д. будуть частково від'ємні (напрявлені ліворуч), частково позитивні



(направлені праворуч). Далі, величина цих переміщень в окремих молекулах буде різна. Однак через те, що розчин розбавлений, як це було вище запропоновано, ці переміщення зумовлені лише оточуючим розчинником, останніми ж розчиненими молекулами лише в незначній мірі. Тому ці переміщення  $\Delta$  у різних за концентрацією частинах розчину в середньому будуть однаковою величиною і настільки часто будуть позитивні, як і від'ємні.

Визначимо тепер кількість речовини, що дифундує через одиницю поперечного перерізу нашого розчину за час  $\tau$ , якщо вважати відомими величини переміщення  $\Delta$  у напрямку осі циліндра, що відчували у середньому розчинені молекули. Для спрощення обчислень вважатимемо, що всі молекули відчували переміщення  $\Delta$  однакової величини, тобто половина молекул переміщення  $+\Delta$  (тобто праворуч), і половина переміщення  $-\Delta$  (тобто ліворуч). Ми замінимо окремі переміщення  $\Delta_1, \Delta_2, \dots$  і т. д. їхнім середнім значенням  $\Delta$ .

У силу нашого спрощеного припущення крізь площину  $E$  нашого циліндра (рис. 3) за час  $\tau$  можуть пройти зліва направо лише ті молекули, які до початку цього проміжку  $\tau$  знаходились зліва від  $E$  і до того ж на відстані, меншій, ніж  $\Delta$ . Всі ці молекули розташовані між площинами  $Q_1$  і  $E$  (рис. 3).

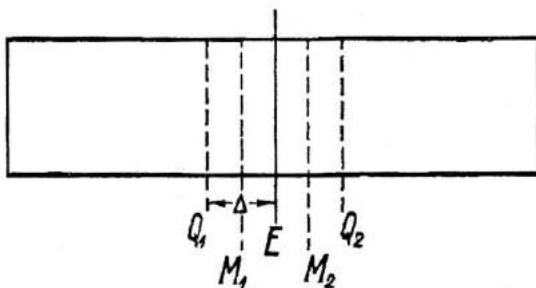


Рис. 3.

Лише половина з цих молекул відчуває переміщення  $+\Delta$ , і, відповідно, лише половина з них пройде крізь площину  $E$ . Але половина розчиненої речовини, що розташована між  $Q_1$  і  $E$ , вираженої в граммамолекулах, дорівнює

$$\frac{1}{2}v_1\Delta,$$

де  $v_1$  – середня концентрація в об'ємі  $Q_1E$ , тобто концентрація в середній площині  $M_1$ .

Оскільки поперечний переріз циліндра дорівнює одиниці, то  $\Delta$  дорівнює об'ємові, що розташований між  $Q_1$  і  $E$ , який, будучи помножений на середню концентрацію, дасть нам кількість розчиненої речовини, що знаходиться у цьому об'ємі, у граммамолекулах.

Шляхом аналогічного міркування отримаємо, що кількість розчиненої речовини, яка пройшла за час  $\tau$  справа наліво крізь площину  $E$ , дорівнює

$$\frac{1}{2}v_2\Delta,$$

де  $v_2$  – концентрація в середній площині  $M_2$ .

Кількість речовини, що дифундує за час  $\tau$  зліва направо крізь площину  $E$ , дорівнює очевидно різниці обох цих значень, тобто дорівнює:

$$\frac{1}{2}\Delta(v_1 - v_2), \quad (6)$$

де  $v_1$  і  $v_2$  – концентрація у двох перерізах, які відстають на дуже малі відстані  $\Delta$ .

Позначаючи знову відстань перерізу від лівого краю циліндра через  $x$ , матимемо, за визначенням похідної,

$$\frac{v_2 - v_1}{\Delta} = \frac{dv}{dx},$$

відповідно

$$v_1 - v_2 = -\Delta \frac{dv}{dx}.$$





Відтак кількість речовини, що дифундує за час  $\tau$  крізь  $E$ , дорівнює:

$$-\frac{1}{2} \Delta^2 \frac{dv}{dx}. \quad (6a)$$

Відповідно, кількість речовини, вираженої в граммолекулах, дифундує крізь  $E$  за одиницю часу, дорівнює:

$$-\frac{1}{2} \frac{\Delta^2}{\tau} \frac{dv}{dx}.$$

Ми отримали інше значення для коефіцієнта дифузії  $D$ :

$$D = \frac{1}{2} \frac{\Delta^2}{\tau}, \quad (7)$$

де  $\Delta$  – це середня довжина шляху, який проходить розчинена молекула за час  $\tau$  у напрямку осі  $x$ .

Розв'язуючи (7) відносно  $\Delta$ , отримаємо:

$$\Delta = \sqrt{2D} \cdot \sqrt{\tau}. \quad (7a)$$

### 3. Рух окремих молекул, броунівський рух

Прирівнюючи одне з одним знайдені значення для коефіцієнтів дифузії у рівняннях (5) і (7), і розв'язуючи отримані рівняння відносно  $\Delta$ , отримаємо:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2RT}{N\eta}} \cdot \sqrt{\tau}. \quad (8)$$

Із цієї формули ми бачимо, що середній шлях, який проходить молекула, пропорційний не часові, а кореню квадратному з часу. Це відбувається через те, що два шляхи, які проходять послідовно, йдучи один за одним дві одиниці часу, не завжди додаються, а також часто віднімаються. Середнє переміщення молекули, що відбувається завдяки неправильному молекулярному рухові, можна обчислити за рівнянням (7a), із коефіцієнта ди-

фузії або з рівняння (8) із сили опору  $\eta$ , яка протидіє вимушеному рухові швидкістю  $v = 1$ .

Підставляючи в рівняння (8) значення  $\eta$  із рівняння (3) для випадку, коли розчинена молекула кулеподібна і велика порівняно з молекулою розчинника, отримаємо:

$$\Delta = \sqrt{\frac{RT}{N} \cdot \frac{1}{3\pi\eta\rho}} \cdot \sqrt{\tau}. \quad (8a)$$

Ці рівняння дають змогу обчислити середнє переміщення  $\Delta$ , знаючи температуру  $T$ , в'язкість розчинника  $\eta$  і радіус молекули  $\rho$ .

За молекулярно-кінетичного представлення не існує ніякої принципової відмінності між розчиненою молекулою й зваженою частинкою. Тому рівняння (8a) можемо вважати справжнім також і у тому випадку, коли мова йде про будь-які зважені кулеподібні частинки.

Обчислимо шлях  $\Delta$ , який проходить у середньому частинка з діаметром у 1 мікрон у воді за кімнатної температури за 1 секунду в певному напрямку.

Відтак маємо:

$$R = 8,31 \cdot 10^7, \quad \eta = 0,0135,$$

$$T = 290, \quad \rho = 0,5 \cdot 10^{-4},$$

$$N = 6 \cdot 10^{28}, \quad \tau = 1.$$

Отримаємо:

$$\Delta = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 0,8 \text{ мікрона}.$$

Це число, завдяки невеликій точності, з якої відомо число  $N$ , може містити в собі помилку приблизно  $\pm 25\%$ .

Цікаво порівняти лише, що обчислений середній власний рух мікроскопічних частинок із рухом розчинених молекул чи йонів. Для недисоційованої розчиненої речовини, коефіцієнт дифузії якого відомий, можемо обчислити  $\Delta$  за рівнянням (7a).



Для цукру за кімнатної температури:

$$D = \frac{0,33}{24 \cdot 60 \cdot 60}$$

Звідси за рівнянням (7а) для  $\tau = 1$ , отримаємо:

$$\Delta = 27,6 \text{ мікрона.}$$

Виходячи з числа  $N$  і молекулярного об'єму твердого цукру, можна зробити висновок, що діаметр молекули цукру буде порядку тисячної частки мікрона, а відтак приблизно в тисячу разів менший від діаметра зваженої частинки, яку ми розглядали раніше. Відповідно до рівняння (8а) можна очікувати, що у цукрі  $\Delta$  приблизно в  $\sqrt{1000}$  разів більший, ніж у частинки з діаметром в 1 мікрон. Як бачимо, приблизно це справді так.

Для йонів, користуючись швидкістю їхнього зміщення, можна обчислити  $l$ , виходячи з рівняння (8). Величина  $l$  дорівнює кількості електрики в кулонах, що проходить крізь 1 кв. см за 1 с за концентрації цього йона  $\nu = 1$  і падінні напруги в 1 В/см.

За цього уявного процесу швидкість руху йонів  $\nu$  (у см/с) можна визначити з рівняння:

$$l = \nu \cdot 96000.$$

Оскільки 1 В містить  $10^8$  електромагнетних одиниць, і заряд одного (одновалентного) йона дорівнює  $9600/N$  електромагнетних оди-

ниць, то за цього уявного процесу на йон діє сила:

$$k = \frac{10^8 \cdot 9600}{N}$$

Підставляючи це значення  $k$  і значення  $\nu$  із рівняння, що знайдено раніше,

$$\nu = \frac{l}{96000}$$

у рівняння (2), отримаємо:

$$\mathfrak{R} = \frac{k}{\nu} = \frac{10^8 \cdot 9600 \cdot 96000}{l \cdot N}$$

Ця формула за звичайного визначення  $l$  справджується також і для багатовалентних йонів.

Підставляючи це значення  $\mathfrak{R}$  у рівняння (8), отримаємо:

Для кімнатної температури і  $\tau = 1$  ця формула дає:

Назва йона	$l$	$\Delta$ , мкм
H	300	125
F	65	58
C <sub>10</sub> H <sub>24</sub> N	24	35

Для Вас, шановні Читачі,

### ПОРТРЕТИ ВИДАТНИХ УЧЕНИХ!

З нагоди 15-річчя журналу "Світ фізики", починаючи з № 2 за 2011 р., видання містить вкладку з портретами видатних учених, які можна використати окремо для оформлення фізичних кабінетів, тематичних стендів у школах, ліцеях, університетах тощо чи для колекції портретів. Уже надруковано портрети Альберта Айнштейна, Марії Склодовської-Кюрі, Нільса Бора, Івана Пулюя. Вартість видання не змінилася.

Якщо Ви бажаєте придбати окремо портрет чи будь-яке число журналу "Світ фізики" звертайтеся до редакції (вул. Саксаганського, 1, м. Львів 79005; phworld@franko.lviv.ua).





## МЕЖІ ЗАСТОСОВНОСТІ ДРУГОГО НАЧАЛА ТЕОРІЇ ТЕПЛОТИ<sup>1</sup>

Доклад у Геттінгені у 1913 р.

*Мар'ян Смолуховський*

Якщо друге начало виразити в одній зі своїх звичних форм, як, наприклад, “теплота не може сама собою переходити від холодного тіла до нагрітого”, або “замкнутий процес, за якого виконувалася б робота завдяки теплоті тіла з нижчою температурою, неможливий”, або “ентропія замкнутої системи з часом може тільки зростати”, то тут безперечно є протиріччя з атомістично-кінетичною теорією, що вимагає принципової оборотності всіх процесів.

Больцман, як відомо, намагався все ж довести, що за кінетичною теорією процеси мали б взагалі протікати за термодинамікою, і що очікувані теоретично винятки з цього, завдяки своїй незначній ймовірності, були б взагалі непомітні. З іншого боку, феноменологи відкидають абсолютну правильність кінетичної теорії.

Нині вже доведено, що в існує ціла низка мікроявищ, які експериментально легко спостерігати (як, наприклад, броунівський молекулярний рух, явище опалесценції, автоматичні флуктуації концентрації в емульсіях), які ґрунтуються якраз на тому, що справжній стан помітно відхиляється від термодинамічно очікуваної “нормальної рівноваги”.

Отже, абсолютне значення законів термодинаміки спростовується досвідом і точка зору догматичної термодинаміки стає безпідставною. Наскільки все-таки цю останню слід вважати наближено справедливою, можна судити нині лише з погляду статистичної механіки Максвелла–Больцмана–Гіббса, що отримала у явищах, які згадані вище, відчутне підтвердження, а частково й подальший розвиток.

Назвемо сукупність координат і моментів усіх молекул системи, яку аналізуємо, “мікростаном” молекулярної системи. У такому випадку для можливості застосування статистичної механіки істотна та умова, що розглянута система з плином часу як завгодно близько підходить до будь-якого мікростану (кінематично можливого і сумісного з принципом енергії).

З цього випливає, по-перше, теорема Пуанкаре, яка полягає в тому, що мікростан у відомому сенсі квазіперіодичний, тобто, що завжди існує кінцевий проміжок часу, після якого стан підходить як завгодно близько до початкового. Тривалість цього циклу Пуанкаре–Цермело визначається, природно, тільки величиною області збігу.

Обчислення Больцмана, хоча і не зовсім строгі, у всякому разі показали, що вже для одного кубічного сантиметра газу виходить при цьому величезний проміжок часу. Випадки, коли є точний збіг, тобто коли рух строго періодичний, утворюють особливі винятки,

<sup>1</sup>Smoluchowski M. *Bull. Intern. de l'Ac. De Sciences de Cracovie*, (A) 1913. 418-434.



які виявляють поведінку, що уникає законів статистичної механіки, оскільки вони не задовольняють умові, про яку вже згадано раніше.

По-друге, звідси випливає, що коли скористатися теоремою Ліувілля, всі мікростани, що розглядаються упродовж дуже великих проміжків часу, однаково ймовірні.

Навпаки, для макростанів, які спостерігаємо експериментально, є щось зовсім інше. Макроспостерігачу два стани здаються однаковими, якщо тільки в найдрібніших, фізично помітних ділянках стану перебуває однакова кількість молекул, абсолютно незалежно від їхньої індивідуальності.

Отже, упродовж одного такого циклу Пуанкаре спостережувані макростани наближено повторюються взагалі велику кількість разів, але з неоднаковою частотою. Набагато частіше спостерігаються стани, близькі до найбільшої кількості сприятливих перестановок (тобто в ідеальному максимумі ентропії), що відповідає термодинамічному “нормального стану”. Середнє відхилення координати, яке відрізняє стан від нормального, обчислюють за допомогою простих формул. Відповідна цьому відхиленню робота дорівнює (у звичайному випадку стійкого нормального положення) половині середньої кінетичної енергії молекули.

Однак з плином часу відбуваються також великі, навіть доволно великі, відхилення від нормального стану, яким відповідають аномально малі значення ентропії, і саме упродовж одного циклу Пуанкаре кожний такий стан однаково часто проходить і через стадію зростаючої, і через стадію спадної ентропії. Отже, всі ці процеси оборотні, тобто можуть протікати і у зворотному напрямку.

У невеликому масштабі це можна спостерігати безпосередньо на досліді. Найпрості-

ше простежити, наприклад, як автоматично змінюється кількість зважених частинок, що перебувають у заданому об’ємі емульсії. Подібний дослід, який виконав Сведберг, можна розглядати просто як демонстрацію оборотності процесів дифузії. Та обставина, що під час процесів дифузії, тертя і теплопровідності спостерігається звичайно тільки необоротна поведінка, відбувається внаслідок того, що в макроскопічній практиці виходять переважно з початкових станів, які відхиляються від нормального стану далеко від значень середніх флуктуацій. Тобто надзвичайно неймовірні. У сенсі атомістичної теорії в більшості випадків вони повертаються до своїх первинних значень лише після надзвичайно великого проміжку часу і практично це майже ніколи не спостерігається.

Через кожний такий “аномальний” стан криві стану проходять по всіляких напрямках, проте щільність сімейства цих кривих дуже сильно спадає зі зростанням відхилення, так що вже за дуже короткий позитивний або негативний проміжок часу з великою ймовірністю можна очікувати зростання ентропії. Цю середню ймовірну поведінку можна описати диференціальними рівняннями феноменологічних теорій дифузії, тертя і теплопровідності. Природно, що за таких здавалося б незворотних процесів відбуваються випадкові молекулярні відхилення від нормальних феноменологічних законів, які однак досі менше досліджені і менш чудові, ніж описані вище відхилення від нормального стану рівноваги.

Якщо мова заходить про абсолютне значення відхилення від нормального стану, то ці теорії застосовні загалом лише до станів, що далеко виходять за межі середнього відхилення. Для станів, що лежать всередині цих меж, може бути зміна навіть у знаку (відповідно до зменшення ентропії).





Отже, статистична механіка приводить загалом до результату, що ентропія може і зростати, і зменшуватися, тобто, що теплота сама собою може переходити від холодного тіла до нагрітого – може навіть всю сонячну теплоту слід розглядати лише як скупчення теплоти, що само з'явилося всередині системи, яка перебуває в стані рівноваги. Однак, якщо вийти за межі середніх флуктуацій, то ймовірність такого скупчення зменшується незрівнянно швидше, ніж його величина.

Та оскільки ймовірність відповідає “середньому за часом”, то закони звичайної термодинаміки зберігають своє значення в дещо видозміненому, обмеженому формулюванні. Наприклад, “теплота не може упродовж тривалого часу сама собою переходити від холодного тіла до нагрітого”, або “не можна побудувати автоматично діючу машину, що споживає теплоту нижчої температури, яка упродовж тривалого часу була б джерелом корисної роботи скінченої потужності”. Таке формулювання достатнє також для звичайних застосувань, у відповідно обмеженому вигляді.

Можна також шляхом безпосереднього розгляду зробити правдоподібним, що ці флуктуації справді не можна використовувати для влаштування тривало діючого вічного двигуна другого роду, ні за допомогою механіч-

ного клапана, ні, наприклад, за допомогою автоматичного, оптичного або електричного керованого пристосування.

Наскільки дають змогу судити наші сучасні знання, для цього був би потрібен “демон”, який, по-перше, без всякої допомоги в будь-який момент знав би, у якому мікростані перебуває ця молекулярна система і як вона рухатиметься далі, і по-друге, він має так керувати молекулярними процесами, щоб не здійснюючи роботи, досить часто приводити їх у дію і зупиняти. Жива істота молекулярної будови не задовольняє ні тій, ні іншій умові.

Можна було б подумати, що для реалізації вічного двигуна тривало діючої потужності, досить спостерігати макроскопічний стан рівноважного молекулярного процесу, перериваючи його щоразу, коли випадково саме собою з'являється певне відхилення енергії в один бік, і повторюючи таку гру через правильні проміжки часу. Та це ґрунтується очевидно на неправильному висновку, так само як і в аналогічному випадку азартної гри.

Справді, легко показати в останньому випадку, що для отримання певного, заданого наперед виграшу, потрібна для цього середня кількість очок не прямує до кінцевого граничного значення.

---

*Найвищим обов'язком фізиків є пошук тих загальних елементарних законів, із яких шляхом чистої дедукції можна одержати картину світу... Душевний стан, що сприяє такій праці, подібний до почуття віруючого або закоханого: зусилля кожного дня здійснюються не за якоюсь програмою, не за якимись визначеними намірами, а за велінням серця.*

**Альберт Айнштайн**



# ШАПКА-НЕВИДИМКА РЕАЛЬНА ВЖЕ СЬОГОДНІ?

Ярослав ШОПА,

*доктор фізико-математичних наук, професор,  
Львівський національний університет імені Івана Франка*

## Невидимість – давня мрія

Технології зменшення помітності “Стелс” (англ. Stealth technology) – комплекс методів для зниження помітності бойових машин для радіохвиль чи оптичного випромінювання. Військові служби завжди працюють над тим, як можна приховати корабель, автомобіль, літак від очей чи приладів противника.

Добре відомим став так званий Філадельфійський експеримент, який восени 1943 року зробив нібито невидимим корабель “Елдрідж” (Eldridge) військово-морського флоту США. очевидці розповідали про те, як корабель зникав з поля зору на декілька хвилин і переміщався на кілька сотень миль вниз по узбережжю з американського порту Філадельфії в Пенсильванії до порту Норфолк у Вірджинії.

Нині цю історію вважають вигадкою, оскільки, за офіційними даними військово-морського флоту, корабель “Елдрідж” упродовж того часу, 1943 року не перебував поблизу Філадельфії. Однак чинник невидимості давно став важливим під час військових дій. “Мистецтво війни”, трактат китайського генерала Сунь Цзи, що датований 450 до Р. Х., вважають найстарішим світовим трактатом з військової стратегії, що ґрунтується на обмані противника.

У грецькій міфології також добре відомі розповіді про пошуки засобів невидимості, такі як шолом Персея.

А хто не читав, чи принаймні не чув про фантастичний роман англійського письменника Герберта Веллса “Невидимець” (The Invisible Man)?

Сьогодні такі явища вже не фантастика, оскільки на озброєнні армій найрозвинутіших держав світу є складна секретна техніка, яка дає змогу сховатись від очей та приладів противника. Найперше технології “Стелс” застосували для кораблів, літаків, автомобілів, зробивши їх малопомітними для радарів, оптичних та магнетних сенсорів, знижуючи рівень відбивальної здатності радіохвиль, і водночас, зменшуючи рівень власного випромінювання у різних діапазонах довжин хвиль.

## Часи маскування

Перші кораблі з ознаками малої помітності з’явилися під час Першої світової війни. Спершу британські військові пробували сховати свої лінійні кораблі, фарбуючи їх та маскуючи у тон довколишнього середовища, зазвичай ці тони були темно-сірі. Та ця технологія не мала великого успіху і багато сірих кораблів було втрачено у Північній Атлантиці від торпед німецьких підводних човнів.

У квітні 1917 року британський художник і військово-морський офіцер Норман Вілкінсон (Norman Wilkinson) винайшов нову схему маскування, яка ґрунтувалася на модних напрямках образотворчого мистецтва того часу, зокрема – кубізмі. Ідея Вілкінсона полягала в тому, щоб замаскувати корабель різноманітними фі-



гурами довільної форми так, щоб розбити його корпус несподіваними лініями. Попри скептицизм до ідеї камуфляжу, згодом, після успішних випробувань, було перефарбовано кілька тисяч військово-морських та торговельних кораблів. Ця технологія добре працювала біля берегів, та вводила в оману капітанів німецьких субмарин в Атлантиці, вони часто не могли з'ясувати, як швидко і куди рухається корабель. У підсумку, до кінця Першої світової війни менше одного відсотка кораблів, замаскованих під камуфляж (рис. 1), були затоплені.



Рис. 1. Французький крейсер "Gloire" з камуфляжем.

Важко встановити навіть зблизка тип корабля та його озброєння.

А з віддалі у декілька кілометрів, з підводного човна, крізь перископ?

Маскувальний камуфляж є пасивною технологією, тому що під час розфарбовування форма та й сама структура поверхні об'єкта не змінюються. Нині камуфляж став невід'ємним елементом одягу військових підрозділів, його навіть полюбляють використовувати дизайнери, створюючи ефектні та успішні моделі для своїх колекцій.

Існують й активні методи маскування, коли об'єкт захисту від стороннього ока змінює

свій зовнішній вигляд. Цього ефекту досягали, екіпіруючи кораблі та літаки яскравими електричними лампами, розташованими у відповідних місцях на їхньому корпусі. У часи Другої світової війни таку техніку маскування вперше застосовували американці, а згодом – британці. Вони успішно ховали літак в умовах денного світла від пильних спостерігачів з німецьких підводних човнів, запобігаючи так швидкому зануренню ворожих субмарин.

У часи холодної війни військово-морські флоти по всьому світу переважно були сконцентровані на операціях з глибокого занурення човнів і цікавість до камуфляжу пропала. Попри це, останніми роками багато військових кораблів було перепрофільовано для гуманітарних чи антитерористичних місій у прибережних водах, і камуфляж, як елемент захисту від терористів, знову став актуальним.

### Антирадарні технології

Створити об'єкт малопомітним для очей недостатньо, щоб він став невидимим. Після Першої світової війни було винайдено декілька абсолютно нових методів виявлення кораблів, найважливішим з яких є радар. Цей пристрій з'явився у 1930-х роках, коли фізики та радіоінженери усвідомили, що радіохвилі можна використати для виявлення кораблів і літаків, які неможливо побачити неозброєним оком.

Радіолокаційна система складається з передавача і приймача радіохвиль. Передавач посилає імпульси радіохвиль, які частково відбиваються об'єктом у зворотному напрямку. Саме ці радіохвилі збирає приймач, а час затримки між прийнятим і початковим імпульсом використовують для визначення відстані до цілі. Переваги радару вирішальним чином проявилися під час Другої світової війни.





Однак існує й зворотний бік цих очевидних військових переваг. Якщо противник також має радіолокаційну систему, то він легко може визначити координати радіолокаторів, через що вони стають уразливими для атак. Під час війни у В'єтнамі (1965–1973) та численних війн на Близькому Сході воюючі сторони часто використовували антирадіолокаційні ракети, які самі наводились на місця розташування радіолокаторів і знищували їх.

Існує три основні шляхи маскуванню об'єктів від радарів: вони мають поглинати радіоімпульси; запобігати їхньому дзеркальному відбиванню до приймача противника, або активно редукувати їх, надсилаючи радіохвилі, фаза яких є протилежною до фази відбитої хвилі.

Однак реалізувати будь-який із цих шляхів не так просто, оскільки радіоімпульси досить складно взаємодіють із кораблями, літаками чи іншими об'єктами. Потрібно враховувати два основні параметри:

– ефективну площу розсіяння (ЕПР) – це площа певної ізотропно відбивальної модельної поверхні, яка створює таку ж густину потужності, що й реальний об'єкт. ЕПР має розмірність площі, її вимірюють у квадратних метрах;

– радарний підпис, що є докладною формою хвильового фронту відбитого сигналу і його можна використовувати, щоб ідентифікувати цілі.

ЕПР залежить від низки важливих чинників, серед них розмір, форма корабля чи літака, кут, під яким радіолокаційні імпульси потрапляють на його поверхню. Навіть пластинка металева пластинка площею 1 кв. м може мати ЕПР у кілька тисяч кв. м, за умови, що радіохвилі радара падають на неї перпендикулярно. Однак, коли пластинка нахилена, кількість енергії, яку вона відбиває і повертає

назад до приймача є меншою, а, отже, й ЕПР стає суттєво меншим.

Хоча ЕПР залежить від багатьох чинників, важко визначити, який саме об'єкт виявив радіолокатор, тому конструктори можуть використовувати цей факт, намагаючись створити малопомітний для радарів корабель чи літак. Військові кораблі переважно мають дуже велику ЕПР. Літаки є меншими за кораблі, і це означає, що їхні ЕПР можуть бути настільки малими, що вони ставатимуть майже не помітними для радарів.

Існує кілька способів зменшення ЕПР корабля. Можна зменшити енергію сигналу, який відбивається, покриваючи корабель речовиною, що вбирає радіохвилі. Для цього можна застосувати фарбу, що перетворює енергію радіохвиль на тепло.

Можна застосовувати й спеціальне покриття завтовшки в одну четверту довжини радіохвиль, тоді відбиті від поверхні покриття і від корпусу хвилі у результаті інтерференції погашатимуть одна одну. Правда, такий шар вже неефективний проти радарів з іншою робочою довжиною хвилі.

Зниження ЕПР корабля досягатиметься й застосуванням матеріалів, які мають мінімальну здатність відбивати радіохвилі: волоконне скло, карбоно-волоконні матеріали, або склобетонний пластик.

Дуже важливою є форма корабля чи літака. Найсильніше відбивають радіосигнали ті місця конструкції, де під прямим кутом перетинаються металеві площини чи плити, або де три грані зустрічаються під кутом 90 градусів. Вони відбивають енергію точно у напрямку до передавача, незалежно від початкового кута падіння радіохвилі.

Так, навіть звичайний бульдозер, у якого маса подібних місць у конструкції, може мати ЕПР до 200 кв. м.



Зауважмо, що коли у 1980-х роках літаки F-15 чи Су-27 мали ЕПР більше від 10 кв. м, то у сучасних винищувачів п'ятого покоління, таких як F-22 – лише до 0,3 кв. м, можливо й менше, адже це поки таємниця ВПС США. У малопомітного ударного літака F-117 (рис. 2) фронтальна ЕПР за деякими даними не перевищує 0,025 кв. м, навіть птахи можуть мати таку ЕПР, у людини вона дорівнює приблизно 1 кв. м.

Однак американські ВПС все ж втратили кілька літаків-невидимок під час війни НАТО проти Югославії 1999 року. Вважають, що їх могли вразити застарілі ракетні комплекси, від яких F-117 не був добре захищеним.

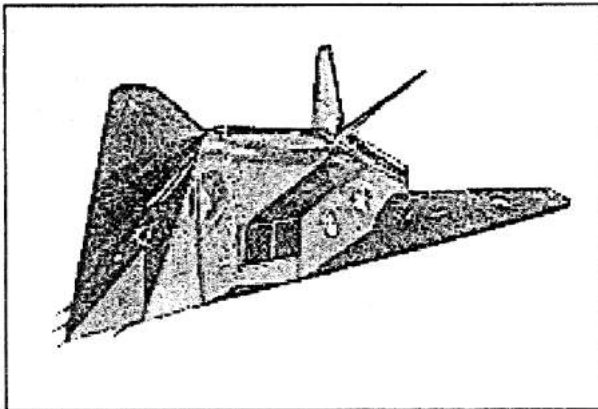


Рис. 2. Локхід F-117 – американський малопомітний ударний літак. Добре видно, наскільки продумані його форми для зменшення фронтальної ЕПР

З'ясувалося, що ЕПР також сильно залежить від робочої довжини хвилі електромагнетного випромінювання радіолокатора. У метровому діапазоні ЕПР приблизно у 10 разів більша, ніж у сантиметровому, а старі радіолокатори югославської системи протиповітряної оборони якраз належали до метрових.

Спочатку у військових кораблях прямі кути конструкції заглушували металевими пластинами, а нові розробляють без жодного прямого кута (рис. 3). Схилені боки спрямовують енергію в бік від радіолокаційного приймача.

Корпус корвета "Вісб'ю" виконано із композитного пластика – на основі вуглецевих джгутів. Окрім поглинання радіохвиль, вуглецеві джгути розсіюють їх, що сприяє зменшенню ЕПР корабля. Надводна частина корпусу скомбінована з великих плоских поверхонь, розташованих під різними кутами, що також сприяє відбиванню радіохвиль. "Вісб'ю" розфарбований нерівномірними сіро-білими візерунками, що є ідеальним варіантом камуфляжу на воді.

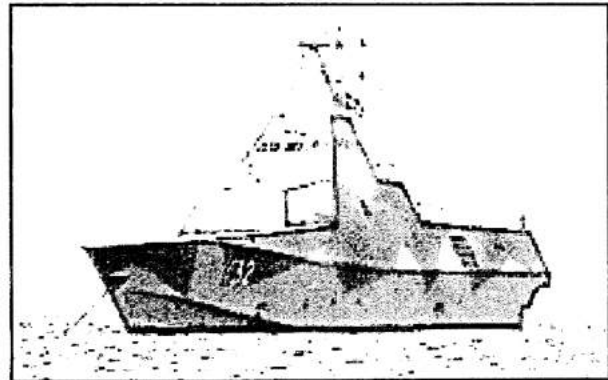


Рис. 3. Корвет Шведського Королівського Флоту "Вісб'ю" (Visby) називають першим у світі бойовим кораблем, побудованим за технологією "Стелс". Окрім правильних форм для зменшення ЕПР, застосовано також камуфляж

Однак кораблі- та літаки-невидимки все ж мають суттєву проблему – їм не лише потрібно бути непомітними для ворогів, а й самим використовувати радіолокаційні системи для викриття тих самих ворожих цілей та знищувати



їх. Металеві антени радіолокаційних систем та озброєння випромінюють радіосигнали та сильно відбивають радіохвилі. Їх потрібно ховати всередину корпусу, виводячи назовні лише для пошуку цілі чи наведення на неї систем зброї. У фільмі про агента Джеймса Бонда "Завтра не помре ніколи" (Tomorrow Never Dies) також можна побачити прототип корабля-невидимки з мінімальною ЕПР.

Проте навіть, коли військовий корабель чи літак обладнані найкращою технологією зменшення радіолокаційної помітності, завдяки широкому вибору частот радіосигналу та достатньо високій його потужності противник теоретично без проблем може визначити його місцезнаходження. Існують також системи пасивної радіолокації, як ось українська "Кольчуга". Її не можна виявити засобами радіоелектронної розвідки, водночас "Кольчуга" реєструє та аналізує усі радіосигнали, які випромінює кожний військовий об'єкт під час своєї роботи й таким способом визначає його розташування.

### Шукачі тепла

У розпалі холодної війни 1960–1980-их роках зросло зацікавлення технологіями, які надавали змогу визначаючи місце розташування бойових машин ворога і відстежувати їх за інфрачервоною радіацією, яку вони випромінюють. Перші зразки ракет AIM-9 з інфрачервоним самонаведенням на ціль поступили на озброєння ВПС США ще 1956 року. AIM-9 "Сайдвіндер" (англ. Sidewinder) стала першою у світі ефективною керованою ракетою класу "повітря-повітря". Ракета (рис. 4) зазнала низки модернізацій і її досі широко використовують військово-повітряні сили багатьох країн світу.

Назву Sidewinder ракета одержала тому, що використовує принцип пошуку цілі за тепло-

вим інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням, як це робить американська рогата гримуча змія – Sidewinder.

У передній частині ракети AIM-9 змонтована оптична система, у фокальній площині якої матриця ІЧ-детекторів розміром 128x128 елементів (пікселів) сприймає зображення цілі та аналізує його. Через те, що потужні двигуни всіх сучасних літаків випромінюють багато інфрачервоної радіації, виявити їх за допомогою таких детекторів неважко.

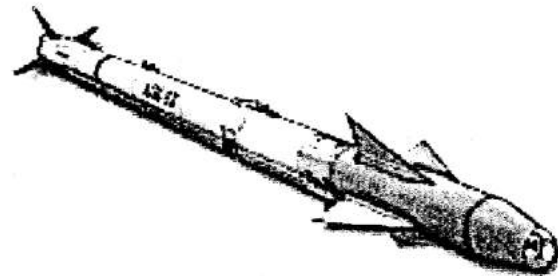


Рис. 4. AIM-9 "Сайдвіндер" з тепловою головкою самонаведення у носовій частині має довжину приблизно 3 м і масу майже 80 кг. Така ракета вражати повітряні цілі на відстанях від сотень метрів до кількох десятків кілометрів

Теплові детектори мають переваги над радіолокаційними системами, які потребують, щоб радіоімпульси відбивались від цілі. Тому, ракети-шукачі тепла, на відміну від радіолокаційних ракет, набагато важче розпізнати і визначити місце їхнього розташування.

Проте досить швидко винайшли способи, як обманути ракети з тепловими головками самонаведення (ТГСН). Яскравий піротехнічний спалах неподалік від цілі легко заманював у пастку перші зразки ракет із ТГСН. Тому найновіші зразки ракет обладнані сенсорами короткохвильових (2–3 мкм) і довгохвильових (майже 10 мкм) ІЧ-діапазонів.





У довгохвильовому діапазоні довжин хвиль добре розпізнаються деталі з температурою трохи вищою від кімнатної. Такі сенсори дають змогу розрізняти справжні цілі з індивідуальними розподілами нагрітих деталей від пасток, які не мають слабо нагрітих поверхонь.

У відомому фільмі “Хижак” (англ. Predator) позаземна істота за сценарієм бачить в ІЧ-діапазоні. Потрапивши до багнюки, Шефер головний герой фільму (актор Арнольд Шварценегер) з’ясовує це і, покривши себе багнюкою як камуфляжем, стає невидимим для Хижака й згодом знищує його.

Можна тут посперечатися з сценаристами фільму та їхніми науковими консультантами, адже багнюка не затримує ІЧ-випромінювання, оскільки швидко нагрівається до температури людського тіла, або принаймні вищої від довкілля. До того ж, за законом Кірхгофа чорне тіло (багнюка) є інтенсивнішим джерелом теплового випромінювання від світлого (чиста шкіра). Отже, Хижак все-таки мав би бачити Шефера. Але як Хижак орієнтувався на місцевості, де усі предмети і рослини мають майже однакову температуру? Цікаво, що любителі комп’ютерних ігор з Хижаком (наприклад, AVP) нарікають на його поганий зір. Очевидно він мусів би мати сенсори для усіх важливих ділянок спектра електромагнетного випромінювання.

Таку здатність сценаристи справді передбачили вже у фільмі “Чужий проти Хижака” (англ. AVP: Alien vs. Predator).

Є у фільмі “Хижак” ще один цікавий винахід, що потрапив до сценарію випадково, але його зберегли, це невидимість Хижака, яку той використовував, маскуючись у джунглях. Але про це трохи згодом.

## Гідролокація

Створення літака чи корабля, невидимого для радіолокаційних систем та ракет з ТГСН, є великим досягненням, та не слід забувати, що вони є джерелами шуму, тобто звукових хвиль. Під водою звук передається на далекі відстані, тому ракети, підводні човни і торпеди, обладнані гідролокаційними механізмами, без проблем визначають місце знаходження корабля.

Існують “пасивні” гідролокаційні системи, які складаються лише із звукових детекторів – гідрофонів, та “активні” гідролокаційні системи, що працюють аналогічно до радіолокаційних систем.

Ще під час Першої світової війни використовували такі гідролокаційні системи для пошуку субмарин, а в часи Другої світової війни вони стали настільки доскональними, що підводним човнам рідко вдавалося уникнути переслідування.

Відомо, що з-поміж усіх частин корабля, найбільший шум створюють гвинти. Під час обертання вони утворюють ділянки низького тиску з бульбашками, які швидко ростуть і, руйнуючись під тиском води, вивільняють велику кількість енергії у вигляді акустичної хвилі, викликаючи неабиякий шум.

Американські вчені винайшли метод зменшення рівня шумів, пропускаючи повітря під низьким тиском крізь отвори у гвинтах. Повітря заповнює вакуум і знижує тиск між бульбашками та водою, тому кожна бульбашка, руйнується повільніше і тихіше.

Шведський військовий корабель “Вісб’ю” уникає цієї проблеми, використовуючи замість гвинтів водянні реактивні двигуни.



### Видиме стане невидимим?

Джеймс Бонд у фільмі “Помри, але не зараз” (англ. Die Another Day) використовує автомобіль, який міг ставати невидимим завдяки спеціальному маскувальному покриттю. Але північнокореєць Цао (він допомагає здійснювати зловісні плани головного негативного героя Грейвза), увімкнувши свої чутливі прилади, одразу побачив теплове зображення автомобіля Бонда. Поки що це фантастика, крім хіба що тепловізорів, які вже давно стали неодмінним атрибутом не лише багатьох бойових машин, а й індивідуальним засобом бійців елітних військових підрозділів.

Однак у компанії Mercedes Benz вже перетворили один із своїх автомобілів у “невидимку”. Один його бік покритий світлодіодними панелями, утворюючи по суті великий телевізійний екран, а на зворотному боці встановлена відеокамера. Зображення з камери відображається на світлодіодних панелях. Так створюється ілюзія прозорості, правда не дуже якісна.

Британські конструктори 2007 року створили танк-невидимку, який викликав неабиякий ажіотаж у засобах масової інформації. Такого ефекту досягнули завдяки відеокамерам, приєднаним до проєкторів, щоб спроектувати зображення довколишнього ландшафту на спеціальну поверхню танку. Основний недолік цього способу в тому, що проєктор має бути встановленим на потрібну позицію саме в час проходження атаки. Такі військові рішення нині не є реалістичними через їхню високу вартість і потребу в проєктуванні зображень. Очевидно, що проблему невидимості слід розв’язувати іншими способами.

Найбільші надії сьогодні покладають на так звані метаматеріали – штучні середовища з від’ємним показником заломлення. У більшості випадків розповіді про такі матеріали починають з посилання на фізика Віктора Веселаго, який народився в Україні, а сьогодні працює професором Московського Фізико-технічного інституту. Веселаго 1968 року опублікував працю, в якій вказав на можливість існування середовищ з від’ємним показником заломлення.

Такі середовища називають ще “лівими” або “лівосторонніми”, оскільки вектори електричного, магнетного полів і хвильовий вектор (він вказує на напрям фазової швидкості) утворюють у такому середовищі ліву трійку, тоді як у звичайних середовищах ця трійка завжди є правою.

Це означає, що фазова швидкість електромагнетної хвилі в “лівому” матеріалі направлена протилежно до напрямку, в якому хвиля переносить енергію.

Завдяки від’ємному показнику заломлення збірна (двоєковипукла) лінза у лівому середовищі стане розсівною, а розсівна (двоєковипукла) стане збірною лінзою (рис. 5). Навіть пласкопаралельна пластинка, виготовлена із метаматеріалу, за певних умов працюватиме як збірна лінза. Ці властивості передбачив ще Веселаго.

Серед багатьох можливих застосувань метаматеріалів одне із найцікавіших – ідеальне маскування. Англійські фізики Дж. Пендрі (J. Pendry), Д. Шуріг (D. Schurig), Д. Сміт (D. Smith) 2006 року теоретично обґрунтували змогу створити ширму, яка може приховати від спостерігача об’єм, що перебуває всередині сферичного “лівого” матеріалу (рис. 6).

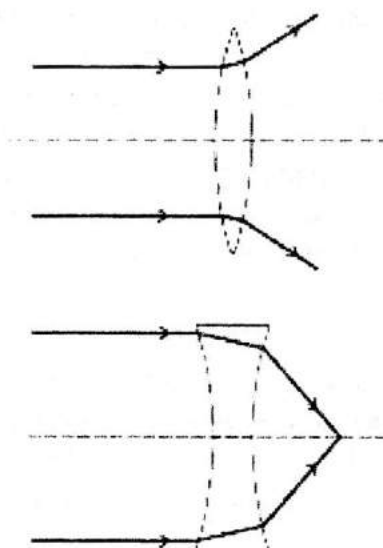


Рис. 5. Двоковипукла лінза з метаматеріалу розфокусує світло, а двоковипукла – фокусує

Метаматеріал відхиляє промені так, що вони огинають об'єм всередині сферичного шару і, виходячи з нього, поширюються у тому ж напрямку, що й перед ширмою. Однак така траєкторія променів можлива лише за певних умов. Найперше радіуси  $R_1$  та  $R_2$  мають бути набагато більшими від довжини електромагнетної хвилі. До того ж, слід забезпечити строго аналітичну залежність від'ємного показника заломлення від радіуса між  $R_1$  та  $R_2$ .

Очевидно, що хоча й така змога створити плащ-невидимку теоретично можлива, реалізувати сучасними технологіями те, що запропонували автори, надзвичайно важко.

У природі метаматеріалів не існує, їх створюють на основі періодичних структур із багатьох елементів, кожен з яких має розміри, співмірні із довжиною хвилі електромагнетного випромінювання. Тому ідеальне маскування від радарів реалізувати легше, бо довжина радіохвиль, які вони випромінюють має

довжину у кілька сантиметрів. Значно важче це зробити для ГЧ-випромінювання чи видимого світла.

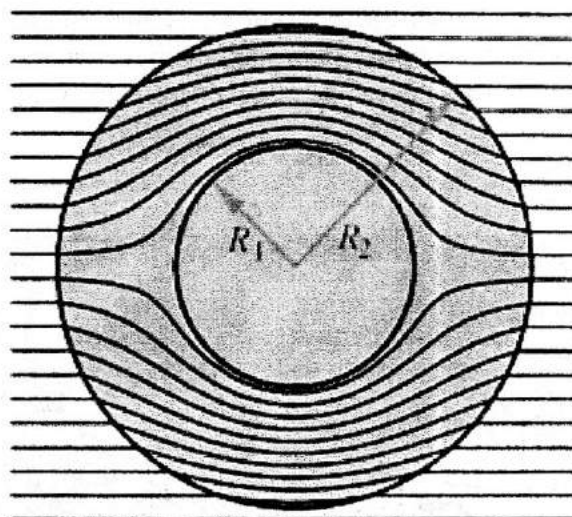


Рис. 6. Розрахована траєкторія поширення променів електромагнетної хвилі крізь сферичний шар метаматеріалу, що оточує об'єм радіусом  $R_1$ . Зовнішній радіус шару  $R_2$

До того ж, певні успіхи у цьому напрямку вже є. Дослідники із Шотландії 2010 року створили гнучкий метаматеріал (названий ними "Метафлекс"), який може екранувати об'єкт від видимого світла з довжиною хвилі 0,62 мкм. Раніше це вдавалось зробити тільки на твердих поверхнях. Це дає підстави сподіватись на побудову тривимірних метаматеріалів, здатних огортати значні за розмірами об'єкти і ховати їх від спостерігача, як це уявляють собі художники аніматори (рис. 7).

Завдяки розробленню нових оптичних і радіотехнічних матеріалів сьогодні можна створити корабель, літак чи інший об'єкт невидимим у певному діапазоні електромагнетного випромінювання і для неозброєного ока





людини, і для новітніх радіолокаційних систем. Однак замаскувати їх повністю поки не вдається. Навіть якби учені розробили таке універсальне маскування, то його значні розміри, вага, споживання енергії унеможливили б військове застосування бойових машин, оскільки забракне ресурсів для перенесення систем озброєння чи іншого корисного вантажу.



Рис. 7. Так собі можна уявити дію плаща-невидимки із метаматеріалу.  
Та поки що це лише мрія

Малоймовірно, що в і близькому майбутньому створять повністю невидимі бойові машини у всіх електромагнетних та акустичних діапазонах. Технології детектування сигналів постійно поліпшуються і науковці шукають шляхи сенсорних застосувань для раніше не використовуваних ділянок у спектрі електромагнетного випромінювання.

### Джерела

1. Бочкарев А. М., Долгов М. Н. *Радиолокация малозаметных летательных аппаратов* // Зарубежная радиоэлектроника, 1989. – № 2. – С. 3–17.
2. Pendry J., Schurig D., Smith D. *Controlling Electromagnetic Fields* // Science, 2006. – Vol. 312. – P. 1780.
3. Lavers C. *Invisibility rules the waves* // Physics World, 2008. – Vol. 21, N. 3. – P. 21–25.
4. Zheludev N. *The Road Ahead for Metamaterials* // Science, 2010. – Vol. 328. – P. 582.
5. Di Falco A., Ploschner M., and Krauss T. *Flexible metamaterials at visible wavelengths* // New Journal of Physics, 2010. – Vol. 12. – N. 113006.
6. *Корабли и кубизм*. <http://stomaster.livejournal.com/582299.html>

## Чи фізики відкрили нову елементарну частинку?

4 липня 2012 року в Женеві відбулася конференція, на якій фізики повідомили про свої експериментальні результати пошуку нової елементарної частинки в ЦЕРНі. Параметри частинки узгоджуються з параметрами гіпотетичного бозона Гігса.

Бозон Гігса – це гіпотетична частинка, квант поля Гігса, відповідальна за наявність в інших елементарних частинок маси. Це остання відсутня частинка Стандартної моделі – теорії, що описує взаємодію у мікросвіті.

Доповідь виголосили представники двох груп учених, які працюють у Мельбурні з детекторами ATLAS і LHC, відповідно. Ці детектори реєструють елементарні частинки, що утворюються під час зіткнень пучків у Великому адронному колайдері. Передбачувана маса нової частинки – трохи більша від 125 гігаелектронвольт.

Відтак, фізики вважають, що відкрили нову частинку. Вони підкреслюють, що ці результати попередні, і ще треба багато що перевірити.



## Мар'ян Смолуховський<sup>1</sup>

(Marian Smoluchowski)

(28.05.1872–05.09.1917)



“...ми вшановуємо пам'ять людини, яка зробила революційну зміну в світогляді фізики того часу. Вона принесла в статистичну фізику поняття теорії флуктуації і заклала основи теорії статистичних процесів...”

Це людина, яка надзвичайно важлива для фізики, для Львова, бо я переконаний, що ім'я Смолуховського – це є ім'я одного з найвизначніших людей, які у будь-які часи працювали у Львівському університеті.

Це людина важлива для європейської спільноти, оскільки це був представник демократичної Європи в ті часи...”

**Ігор Мриглюд,**  
*академік НАН України,  
директор Інституту фізики  
конденсованих систем НАН України*

<sup>1</sup>Докладніше про видатного фізика Мар'яна Смолуховського, який успішно працював у Львівському університеті, читайте у журналі “Світ фізики”, 2002. – С. 18–22 (Г. Шопа. *Романтик науки*).

На пошану 140-річчя від дня народження видатного фізика зі світовим ім'ям Мар'яна Смолуховського наукова громадськість у 2012 році запланувала низку заходів. Зокрема, від 3 до 6 липня 2012 року у Львові відбудеться Міжнародна конференція: “Статистична фізика: сучасні тенденції та застосування”. Організаторами її є Інститут фізики конденсованих систем Національної академії наук України, Львівський національний університет імені Івана Франка, Національний університет “Львівська політехніка”.

Від 9 до 13 вересня 2012 року у Кракові в Ягелонському університеті відбудеться 24 Симпозіум Мар'яна Смолуховського, який організують Ягелонський університет, Інститут Фізичної хемії Польської академії наук, Польська академія мистецтв і науки, Вроцлавський Технологічний університет, Європейське фізичне товариство.



## Роки життя та наукова діяльність Мар'яна Смолуховського

**28 травня 1872 року** – народився у Вордербрюлі поблизу Відня

**1880–1890 роках** – навчався у віденській Терезіанській гімназії, яку закінчив з відзнакою

**1894 року** – служив в артилерійських військах

**15 травня 1895 року** – отримав звання доктора філософії з найвищою відзнакою

**3 травня 1898 року** – обійняв посаду приват-доцента Віденського університету

**24 серпня 1898 року** – переїхав до Львова і розпочав працювати асистентом Львівського університету імені Яна Казимира (нині Львівський національний університет імені Івана Франка)

**12 березня 1900 року** – після смерті професора Оскара Фабіяна очолив кафедру теоретичної фізики Львівського університету як наймолодший професор Австро-Угорської імперії

**1 червня 1901 року** – одружився з Софією Баранецькою, донькою професора математики Ягелонського університету

**12–15 червня 1901 року** – під час святкування 450-річчя університету міста Глазго отримав почесний ступінь доктора права

**19 лютого 1906 року** – був вибраний директором Товариства природознавців імені Коперника.

**1906 року** – обійняв посаду декана філософського факультету Львівського університету

**15 травня 1908 року** – став членом-кореспондентом Академії мистецтв і наук у Кракові

**1908 року** – Академія мистецтв і наук у Відні нагородила його премією Людвіга Гайтінгера за працю про броунівський рух

**9 травня 1913 року** – очолив кафедру теоретичної фізики в Ягелонському університеті в Кракові

**1915 року** – змобілізований до армії на кілька місяців

**16 червня 1916 року** – обійняв посаду декана філософського факультету Ягелонського університету

**29 травня 1917 року** – був обраний постійним членом Академії мистецтв і наук у Кракові

**15 червня 1917 року** – обійняв посаду ректора Ягелонського університету

**5 вересня 1917 року** – у 45-річному віці помер від дизентерії під час епідемії в Кракові.

*"Світ складається з таємниць,  
які не можна відкрити в один день:  
природа не показує нам їх усіх разом...  
Наш час пояснив деякі з цих таємниць  
і майбутнє продовжуватиме нашу справу"*

**Луцій Сенека**





# Мар'ян фон Смолуховський

Віктор Анрі

П'ятого вересня 1917 року під час епідемії дизентерії у Кракові помер 45-річний знаменитий фізик М. Смолуховський.

Він був одним із тих, сучасних видатних фізиків – Р. Ланжевєн (P. Langevin), Дж. Перрен (J. Perrin), М. Смолуховський (M. Smoluchowski), А. Айнштайн (A. Einstein), – які належать до того ж покоління, що долучилися до розроблення основних принципів фізики і примкнули безпосередньо до попереднього покоління великих фізиків Л. Больцмана, Г. Лоренца, М. Планка, Г. Пуанкаре, Дж. Стретта (лорд Релей), Дж. Дж. Томсона (L. Boltzmann, H. Lorentz, M. Planck, H. Poincare, J. Strutt (Lord Rayleigh) і J. J. Thomson).

XIX-те сторіччя можна назвати сторіччям триумфу термодинаміки. Увесь світогляд, усі пояснення явищ природи стараються звести до основних принципів збереження енергії та збільшення ентропії. Усі явища природи розділяють на зворотні і незворотні. До перших безпосередньо застосовні принципи термодинаміки, які визнають непогрішними, наприклад, вважають, що будь-яке явище, що протікає в природі, супроводжується завжди збільшенням ентропії і лише у крайньому випадку, ентропія стала.

Робота термодинаміків наприкінці XIX сторіччя спрямована на вивчення незворотних процесів, і в цьому напрямку особливо важливими є дослідження фізика П. Дюгема (P. Duhem).

Та термодинаміка, яка мала такий величезний успіх, коли вивчали фізичну та фізико-хімічну статистику, наштовхнулася на нездоланні труднощі під час вивчення кінетики явищ природи.

До того ж, ціла низка даних щодо дифузії газів, внутрішнього тертя і теплопровідності

газів, уже наприкінці XIX сторіччя спонукала постановку загальних питань і давали безліч нових фактів, які ніякими способами не можна було б пояснити принципами термодинаміки.

Для цих явищ молекулярна фізика давала прості кількісні пояснення. Перша праця Смолуховського 1898 року стосується саме цих питань. Він вивчав стрибок температури під час переходу від теплої стінки до газу. Він є тим сильнішим, чим тиск газу менший. Цей стрибок температури можна пояснити кінетичною теорією газів. Точні вимірювання розподілу температури залежно від відстані від нагрітої стінки, які 1910 року провів Лазарєв, дають змогу безпосередньо обчислити вільний шлях молекул газу. Термодинаміка не в стані пояснити це явище.

Яскравішим, можна сказати, рішучим ударом, який нанесено термодинаміці, стали роботи над броунівськими рухами дрібних частинок.

Уже наприкінці XIX сторіччя Л. Гуї (L. Gouy) розробив загальну теорію, за якою броунівський рух є результатом молекулярних зіткнень об частинки, і показав, що ці рухи виводять із принципу рівності розподілу енергії. Це твердження видавалось неймовірним. Багато фізиків вважали, що за такого пояснення броунівського руху мали б бути набагато слабші рухи частинок, ніж ті, які вони спостерігали.

М. Смолуховський був першим, хто у низці праць, починаючи з 1905 року, обчислив швидкість руху мікроскопічних частинок та їхні середні переміщення у певний проміжок часу. Він показав, що переміщення частинки по одній осі  $X$  за час  $t$ , дорівнюють:

$$X = \frac{RT}{N} \cdot \frac{t}{3\pi r\eta},$$



де  $R$  – константа газів, що дорівнює  $8,32 \cdot 10^7$ ;  $T$  – абсолютна температура;  $N$  – кількість молекул в одній граммолекулі тіла (число Авогадро, що дорівнює  $6,1 \cdot 10^{23}$ );  $r$  – радіус частинки;  $\eta$  – в'язкість рідини.

М. Смолуховський також показав, що коефіцієнт дифузії  $D$  дорівнює:

$$D = \frac{RT}{N} \cdot \frac{q}{6\pi r \eta}.$$

Ці формули згодом вивели іншими способами А. Айнштайн (1906) і Р. Ланжевен (1908).

Класичні досліди Перрена та його учнів, а згодом і низки інших дослідників, дали блискучі підтвердження цих формул, які виведено на підставі кінетичної теорії і заклали вагоме підґрунтя новій течії молекулярної фізики.

Відтак було поставлено питання про перегляд основних принципів термодинаміки і, особливо, другого принципу – збільшення ентропії.

Діяльність Смолуховського була повністю зосереджена на цих фундаментальних питаннях. Він 1908 року показав, що явище помутніння рідини і суміші рідин поблизу критичної температури є в кількісній залежності від стиснутості цих рідин і називаються тими найменшими змінами концентрацій молекул, які постійно утворюються в рідині внаслідок руху молекул.

Також і блакитний колір неба пояснюють кількісно постійним утворенням подібно до центрів згущення молекул, які відбуваються через те, що молекули постійно рухаються, і хаотично то в одному, то в іншому місці утворюються скупчення молекул або їхнє розрідження.

Теорія ймовірності дає змогу обчислити, скільки таких центрів утворюється в певний момент у певному об'ємі повітря, і звідси зрозуміло, що можна вивести дифузіїю світла та обчислити інтенсивність блакитного кольору неба.

Досліди, які провели в Швейцарії в горах два учні Ланжевена і Перрена – Байер і Моулін (Moulin), повністю підтвердили ці теоретичні обчислення Смолуховського. Дуже тонкий і проникливий експериментатор, молодий фізик Моулін, щойно призначений професором у Безансоні, був убитий у перший тиждень війни.

Утворення центрів згущення і розрідження молекул, яке так ґрунтовно пояснювало блакитний колір неба і помутніння рідини поблизу критичного стану, можна було спостерігати безпосередньо.

Два типи явищ дали змогу здійснювати подібні спостереження.

З одного боку, спостереження під ультрамікроскопом кількості колоїдальних частинок, які в ряді рівних коротких проміжків часу знаходяться у певному об'ємі.

З іншого боку, спостереження над розпадом радіоактивних тіл, у яких можна спостерігати і записувати, як окремі молекули одна за одною розпадаються, виділяючи частинки  $\alpha$ , тобто атоми гелію, що заряджені позитивно. Перший метод використав Т. Шведберг (Th. Svedberg) над колоїдним золотом, другий метод – М. Кюрі (M. Curie) разом із Деберном (Debiern) та їхніми учнями.

М. Смолуховський показав, що якщо у певному об'ємі середня кількість молекул за рівномірного розподілу має дорівнювати величині  $\nu$ , то ймовірність, коли у цьому об'ємі кількість молекул дорівнювала  $n$ , – дорівнює:

$$W(n) = \frac{\nu^n e^{-\nu}}{n!}.$$

Якщо взяти відносно згущення

$$\delta = \frac{n - \nu}{\nu},$$

то середній квадрат цього згущення дорівнюватиме:

$$\overline{\delta^2} = \frac{1}{\nu}.$$



У досліджах Т. Сведберга (Th. Svedberg) кількість частинок колоїдного золота, що перебуває кожні 1/39 хвилини у певному об'ємі рідини, розподіляються так:

кількість частинок	рази
0	111
1	168
2	130
3	69
4	32
5	5
6	1
7	1

Звідси обчислюють середній квадрат згущення:

$$\bar{\delta}^2 = 0,637.$$

Теорія Смолуховського дає  $\bar{\delta}^2 = 0,645$ . Підтвердження, бачимо, блискуче.

Ці міркування приводять до великих узагальнень. Стає зрозумілим, що всі явища, які ми спостерігаємо, зазвичай є лише середніми даними. Насправді відбуваються в природі постійні коливання довкола цих середніх. Коливання відбуваються і в часі, і в просторі.

Наприклад, температура певного об'єму газу чи рідини постійно коливається: то підвищуючись, то понижуючись. Температура змінюється від одного місця до іншого. Ці коливання будуть тим помітніші, чим менший ми матимемо об'єм, який розглядаємо.

Тиск цього об'єму газу лише здається сталою величиною. Якщо спостерігати тиск у досить малих об'ємах, то він постійно коливатиметься: то підніматись, то понижуватись.

Загалом, якщо величина  $E$  означає відхилення від середнього стану, то ймовірність отримати стан, що перебуває між  $E$  і  $E + dE$ , виражена формулою:

$$W(E)dE = A \cdot e^{-\frac{N}{kT}\chi(E)} dE.$$

У цій формулі, яку отримав Смолуховський,  $A$  – стала;  $N$  – число Авогадро;  $\chi(E)$  – виражає роботу для переходу від середнього стану до положення з відхиленням  $E$ .

Відтак, ми бачимо, що якщо розглядати світ з погляду мікркосмосу, то ентропія може однаково збільшуватися чи зменшуватися, теплота може однаково переходити від теплого тіла до холодного і навпаки, молекули можуть однаково рухатись від концентрованіших частин до менше концентрованих, і навпаки.

Загалом усі явища природи видаються нам зворотними, треба лише мати терпіння почекати достатньо великий проміжок часу і спостерігати достатньо малі об'єми.

Наприклад, М. Смолуховський обчислив, скільки часу нам треба було б чекати, щоби в об'ємі, що дорівнює один кубічний сантиметр, була суміш кисню і азоту в однакових кількостях, в одній половині накопичилося б на 1 % більше кисню, ніж у другому, унаслідок хаотичного руху молекул, і знайти, що цей час дорівнює  $10^{10}$  секундам.

Якщо взяти об'єм, подібний до того, який спостерігають в ультрамікроскопі, тобто  $(0,2\mu)^3$  то, подібне відхилення у розміщенні молекул кисню спостерігалось б лише раз за кожні  $10^9$  секунди.

Другий принцип термодинаміки подають так, зручним фактичним правилом, яке придатне лише для нашого макрокосмосу і не відповідає явищам природи під час їхнього тонкого аналізу.

Ми бачимо, яке важливе значення мали праці фізика М. Смолуховського, що так передчасно загинув, і який сприяв разом із своїми сучасниками перетворенню усього нашого філософського світогляду.





## ПРОФЕСОР, АКАДЕМІК ОЛЕКСА-МИРОН БІЛАНЮК І КОНЦЕПЦІЯ ТАХІОНІВ

Роман ПЛЯЦКО,

*доктор фізико-математичних наук, дійсний член НТШ,  
Інститут прикладних проблем механіки і математики  
ім. Я. С. Пісстригача НАН України*

У жовтні 1962 року на сторінках відомого журналу “American Journal of Physics” з’явилася стаття “Meta” Relativity” [1]. Прізвища її авторів – Біланюк, Дешпанде та Сударшан.

Стосовно назви: слово “Relativity” для фізиків означає “відносність”, “теорія відносності” у контексті тієї теорії простору-часу і фізичних явищ на просторово-часовій арені, яка завдяки працям Айнштейна, Лоренца та Пуанкаре прийшла на зміну уявленню класичної механіки, основи якої сформулювали ще Галілей і Ньютон.

Звичними стали терміни “Special Relativity” для окреслення спеціальної теорії відносності, тобто теорії, що розглядає фізичні явища лише в інерціальних системах відліку, і “General Relativity” – для загальної теорії відносності, яка виходить за межі інерціальних систем і, що не менш важливо, по-новому осмислює гравітаційну взаємодію.

Стаття [1] присвячена аналізу під новим кутом зору спеціальної теорії відносності. Автори в заголовку використали термін “meta”, який як префікс у грецькій мові має декілька значень: проміжне становище, рух у просторі або часі, зміна, перетворення, переміщення, звільнення від чогось. Власне, у

невеликій за обсягом статті викладено нове розуміння спеціальної теорії відносності, в основі якого є звільнення від необов’язкових обмежень, тобто таких, що не диктуються однозначно логікою теорії чи даними експериментів. Йдеться про суттєве уточнення фундаментального принципу спеціальної теорії відносності про те, що швидкість світла у вакуумі є максимально можливою у природі для перебігу усіх фізичних явищ і процесів.

Одним із аргументів, який традиційно залучався для обґрунтування того, що жоден матеріальний об’єкт (макроскопічне тіло чи елементарну частинку) неможливо розігнати до швидкості світла, вважалося релятивістське співвідношення між енергією та масою тіла, за яким для надання йому світлової швидкості треба затратити безмежно велику кількість енергії.

Автори статті [1] привернули увагу фізиків до того, що уважний аналіз “літери і духу” спеціальної теорії відносності насправді не виключає можливості існування в природі частинок, які “від народження” мають швидкість більшу від світлової, тобто питання про те, як їх розігнати до такої швидкості не стоїть – вони є такими одразу від своєї появи в природі. Полегшує розуміння принципової допустимості такої ситуації деяка аналогія з фотонами – вони від моменту свого народження мають швидкість  $c$ , набули без якогось попе-

---

Ще про професора О.-М. Біланюка читайте у журналі “Світ фізики”, 2012. – С. 17–21.



реднього розгону. Тобто, якщо у межах традиційного висвітлення суті спеціальної теорії відносності виділяють два класи (типи) частинок:

– ті, що рухаються зі швидкістю меншою від швидкості світла;

– такі, що мають швидкість світла, то в [1] теоретично досліджено принципову можливість існування частинок третього класу, що рухаються швидше від світла (розгляд стосується класичних, тобто неквантових частинок). При цьому в своєму аналізі автори дотримуються двох принципів релятивізму:

1. У довільній системі відліку енергія частинки мусить бути додатною;

2. Закони динаміки частинки не мають залежати від системи відліку.

Для частинок усіх трьох класів виконується відоме в спеціальній теорії відносності співвідношення між енергією частинки  $E$ , її імпульсом  $p$  та масою спокою  $m_0$ :

$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4 \quad (1)$$

з тим, що відповідно для частинок першого, другого і третього класу виконуються співвідношення

$$m_0^2 c^4 > 0,$$

$$m_0^2 c^4 = 0,$$

$$m_0^2 c^4 < 0.$$

З останнього співвідношення випливає, що маса спокою для частинок третього класу є уявною величиною. У цьому є своя логіка, оскільки реально стан спокою для таких частинок неможливий. Водночас для частинок третього класу справджуються відомі із спеціальної теорії відносності вирази для енергії частинки

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

та її імпульсу

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3)$$

При цьому із (2) і (3) для частинок, що рухаються швидше від світла, тобто якщо  $v > c$ , величина під коренем має від'ємне значення.

Однак, оскільки тоді  $m_0$  є уявною величиною, то  $E$  і  $p$  мають дійсні значення. Через це в [1] наголошено: "... у класичній механіці маса  $m_0$  є параметром, який не можна безпосередньо виміряти навіть для повільних частинок ... Лише енергія та імпульс внаслідок їх збереження у взаємодіях є вимірюваними й тому мусять бути дійсними. Тому уявність маси спокою гіпотетичних "метачастинок" порушує лише традиційний спосіб мислення, а не фізику".

Звичайно, новаторський підхід до осмислення спеціальної теорії відносності далеко не одразу знайшов розуміння колег-фізиків, що позначилось, зокрема, у затриманні опублікування статті [1] через потребу переконувати рецензентів у несуперечності її тверджень і висновків.

Все ж поступово зростає зацікавлення до нових теоретичних передбачень і пошуків можливостей їхньої перевірки у фізичних експериментах і спостереженнях.

Також О.-М. Біланюк і Е. Сударшан розвинули дослідження, що започатковані в [1], у статтях [2, 3] та ін. (невдовзі статтю [2] передрукували у російському перекладі у відомій серії "Эйнштейновский сборник", Москва [4]).

До речі, в [2] для гіпотетичних частинок, що рухаються швидше від світла, використовують як синоніми дві назви – "метачастинки" і "тахіони". Останню запровадив Дж. Файнберг у праці [5] і вона згодом стала загальноживаною. У грецькій мові "тахіон" означає "швидкий".



Зазвичай і фізики-професіонали, і аматори науки намагаються не лише осмислити суть новаторських підходів і їхніх можливих наслідків, а й помітити якісь евристичні моменти, що наштотували авторів на нестандартний хід думок. При цьому зацікавлення викликають особистості творців нового, їхній шлях у науці.

Читачі журналу "Світу фізики" уже мали нагоду прочитати змістовну статтю професора Романа Гайди "Про одне повноцінне життя" [6], яку було присвячено Олексі-Мирону Біланюкові – видатному фізику, професору, академіку НАН України, який працював у США, часто відвідував Україну й доклав значних зусиль для розвитку української науки та культури, їх популяризації у світі.

Нижче перелічимо основні віхи життєвого і творчого шляху відомого фізика.

Олекса-Мирон Біланюк народився 15 грудня 1926 року в селі Тарнавка на Лемківщині (нині Польща).

Шкільну освіту Олекса розпочав у Львові, однак її закінченню перешкодила Друга світова війна, тому гімназійну освіту здобув у домашніх умовах.

З травня 1944 року – на примусових роботах у Німеччині, згодом у таборі для переміщених осіб в Авгсбурзі, де долучився до української молоді, що згуртувалась довкола поета Василя Барки.

Від осені 1945 року навчався на університетських підготовчих курсах у Мюнхені.

У 1946–1947 роках – студент Політехніки в Карлсруе, де захопився фізикою.

Від весни 1947 року упродовж чотирьох років навчався у Лювенському університеті (Бельгія), студіював електротехніку.

Від осені 1951 року – студент Мічиганського університету (США), 1953 року отримав диплом магістра фізики, 1954 року – магістра ма-

тематики, 1957 року – доктора філософії в галузі ядерної фізики.

У 1957–1964 роках виконував наукові дослідження в лабораторіях ядерної фізики Мічиганського та Рочестерського університетів.

У 1962–1963 роках перебував у відрядженні в Буенос-Айресі, працював на новому циклотроні Аргентинської ядерної лабораторії.

Понад 30 наступних років віддав науковій та педагогічній діяльності у Свартморському (Swarthmor) коледжі поблизу Філадельфії, часто працюючи у наукових центрах Америки, Європи й Азії, зокрема 1976 року проводив наукові дослідження в Києві в Інституті ядерних досліджень Академії наук України, 1980 року – у Франції на пришвидшувачі "Сатурн", 1984 року – у Національній ядерній лабораторії в Італії.

Серед основних напрямів досліджень: ядерна фізика – вивчення ролі спіну та інших квантових характеристик ядер низки елементів на перебіг високоенергетичних ядерних реакцій за їхньої участі, проведення та аналіз однієї з перших гіпер'ядерних реакцій, у якій взаємодіяли не лише нуклони в ядрах, а й кварки в нуклонах, дослідження ролі альфа-часток у структурі ядер.

О.-М. Біланюк був членом редколегії "American Journal of Physics", "Українського фізичного журналу", "Фізичного збірника НТШ", журналу "Світ фізики".

Він є автором понад 20 науково-популярних статей українською мовою у виданнях США, Канади та України. Науковець був редактором гасел з фізики в "Енциклопедії українознавства" та в англійській "Encyclopedia of Ukraine". Здобула визнання його праця "Українські фізики за межами України", що була опублікована 1993 року у першому томі "Фізичного збірника НТШ". Вона містить стислу інформацію про майже 80 відомих науковців українського походження, які зробили вагомий





внесок у фізику та суміжні галузі науки і техніки.

Активний організатор і учасник громадсько-наукового життя української діаспори. Дійсний член й один із чільних діячів, член управи НТШ Америки, віце-президент Світової Ради НТШ (1994), почесний член Товариства українських інженерів Америки, член низки американських і європейських наукових товариств.

Як президент Української Вільної Академії Наук (США) у 1997–2006 роках посприяв передачі в Україну понад 70 художніх картин Володимира Винниченка, виданню наукових праць академіка Михайла Кравчука, реалізації низки інших видавничих проєктів.

Плідно співпрацював із Комісією фізики НТШ в Україні від початку її діяльності, завдяки його підтримці зібрані й видані основні наукові праці Олександра Смакули, побачили світ перші томи “Фізичного збірника НТШ”. Іноземний член Національної академії наук України (1992).

За дослідження ролі альфа-частинок у структурі ядер разом із співпрацівниками О.-М. Біланюка нагородили премією імені К. Д. Синельникова НАН України (1995). Він був Почесним доктором Львівського національного університету імені Івана Франка (2002). Указом Президента України від 2 березня 2007 року ученого нагороджено орден “За заслуги III ступеня”.

Кожен приїзд професора О.-М. Біланюка в Україну ставав незабутньою подією для усіх, хто мав нагоду з ним спілкуватися – а це не лише колеги-фізики. Рідкісні доброзичливість і тактовність, ерудиція, глибокий аналітичний підхід до явищ природи та суспільного життя, готовність допомогти конкретними ефективними діями були домінуючими рисами його характеру. Зокрема, він усіяло заохочував публікувати вагомі наукові результати англійською мовою у провідних міжнародних журналах, а оскільки принаймні ще

20 років тому більшість українських фізиків недостатньо володіли цією мовою для викладу в статтях свого доробку, то професор Біланюк сам пропонував свої послуги щодо редагування рукописних текстів.

Тут доречно зазначити, що він був тонким знавцем і української, і англійської мов, а спілкуватися міг ще декількома мовами.

Він був активним учасником наукових конференцій з проблем української наукової термінології, які систематично проводить Національний університет “Львівська політехніка”.

Професорові О.-М. Біланюкові був притаманний благородний, діяльний і негласливий, патріотизм – він дорожив своєю малою Батьківщиною – Лемківщиною і вболівав за долю усієї України.

Без зайвої деталізації наведемо тут зворушливі слова, надіслані ним електронною поштою на адресу Фізичної комісії НТШ в історичні дні грудня 2005 року: “Дорогі мої друзі! Разом з вами доглибинно переживаю народини повноцінного українського народу”.

Повертаючись до історії розроблення концепції тахіонів, наведемо слова професора О.-М. Біланюка:

“На початку 1960-х років, з індійськими фізиками Е. Ц. Дж. Сударшаном та В. К. Дешпанде, ми зацікавились питанням, чи закони сучасної фізики ... такі справді виключають можливість існування ще третього роду частинок, яких рух був би швидшим від світла.

Нам було зрозуміло, що жодних відомих до цієї пори частинок не можна пришвидшити до надсвітлових швидкостей. Незалежно від кількості їхньої енергії, фотонам присуджено пробігати з незмінною швидкістю  $v = c$ . Швидкість звичайних частинок (тих, що володіють масою спокою) обмежена до швидкостей менших від  $c$  ... Натомість ми хотіли дізнатися, чи закони фізики допускають можливість існування класу невідкритих ще частинок, які пробігали б з надсвітловими швидкостями” [7].



До речі, у той час Біланюк і Сударшан працювали в Рочестерському університеті, а Дешпанде був аспірантом. Сьогодні Е. Ц. Дж. Сударшан – відомий у світі фізик-теоретик, професор Техаського університету. Він народився 1931 року в Індії, ступінь доктора здобув у Рочестерському університеті, далі працював у Гарвардському університеті (США). Сударшанові належать вагомні результати в теорії слабкої взаємодії та квантовій оптиці. Науковець мав реальні підстави для отримання Нобелівської премії з фізики за 2005 рік, якою нагородили лише Глаубера якраз за результати у квантовій оптиці. У 2010 році Сударшана відзначили іншою високою нагородою – медаллю ім. Дірака.

Попри те, що тахіони не виявлені експериментально, уявлення про них активно використовують під час опрацювання теоретичних моделей різних процесів у фізиці високих енергій і космології. Кількість відповідних публікацій налічує декілька тисяч. Звичайно, важливі аспекти цих досліджень певною мірою відображені у Вікіпедії. Однак там трапляються суттєві неточності стосовно історії та пріоритетів досліджень тахіонів. Зокрема, в англійському варіанті цієї енциклопедії у тексті про тахіони на перший план винесено не першопублікацію Біланюка, Дешпанде і Сударшана 1962 року [1], а те, що Файнберг 1967 року ввів термін "тахіон", хоча сам Файнберг визнав пріоритет авторів статті [1] щодо вивчення допустимості існування в природі частинок, швидших за світло, всупереч традиційному висвітленню наслідків спеціальної теорії відносності. Іншого роду некоректність наявна у гаслах про тахіони у Вікіпедіях російською та українською мовами – там є фраза про те, що вперше тахіони описав Зоммерфельд. Насправді ще в анотації статті [1] зазначено, що у дорелятивістську епоху (тобто, в класичній фізиці) Томсон, Гевісайд і Зоммерфельд розглянули питання про рух частинки,

швидшої від світла. Тобто, йдеться про іншу ситуацію, коли не йшлося про подолання стереотипів спеціальної теорії відносності, оскільки тоді її ще просто не було.

Завдяки старанням видавництва "Євросвіт" 2002 року вийшла друком збірка праць про тахіони професора О.-М. Біланюка, виданих у різні роки декількома мовами. У травні місяці того ж року у Львівському національному університеті імені Івана Франка відбулася її презентація за участю автора. Присутні мали приємну нагоду почути його виступ і спогади та отримати автографи.

На жаль, цього не можна повторити сьогодні...

Олекса-Мирон Біланюк помер 27 березня 2009 року у місті Валінгфорд (Пенсильванія, США).

### Література

1. Bilaniuk O.-M. P., Deshpande V. K., Sudarshan E. C. G. "Meta" Relativity // Am. J. Phys., 1962. – Vol. 30, No 10. – P. 718–723.
2. Bilaniuk O.-M., Sudarshan E. C. G. *Beyond the Light Barrier* // Physics Today, 1969. – Vol. 22, No 5. – P. 43–51.
3. Bilaniuk O.-M., Sudarshan E. C. G. *Causality and Space-like Signals* // Nature, 1969. – Vol. 223, No 5204. – P. 386–387.
4. Біланюк О., Сударшан Е. *Частицы за светловым барьером* // Эйнштейновский сборник, 1973. – С. 112–133.
5. Feinberg G. *Possibility of Faster-Than-Light particles* // Phys. Rev., 1967. – Vol. 159. – P. 1089–1105.
6. Гайда Р. *Про одне повноцінне життя* // Світ фізики, 1997. – № 2. – С. 9–12.
7. Біланюк О. *Дійсні частинки з уявною масою* // Світ фізики, 1997. – № 2. – С. 3–6.
8. Біланюк О. *Тахіони*. – Львів: Євросвіт, 2002. – 160 с.

## ДЕЯКІ ЗАДАЧІ ТА РОЗВ'ЯЗКИ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ ОЛІМПІАДИ З ФІЗИКИ (Львів, 2012)

Готуючись до проведення Всеукраїнської олімпіади з фізики, організатори змагань велику увагу приділяють умовам задач та їхнім розв'язкам. Серед авторів задач з фізики є вчителі шкіл, викладачі вищих навчальних закладів, науковці. Завдання подають до Міністерства освіти, науки і спорту України. Далі ці завдання докладно аналізують і лише деякі з них потрапляють до олімпіадних завдань. Чимало задач з тих чи інших причин не доходять до змагань школярів. Деколи умови чи розв'язки таких завдань з фізики потрапляють на сторінки фахових газет і журналів.

Пропонуємо Читачам декілька задач та їхні розв'язки, які до редакції журналу подав член журі Всеукраїнської олімпіади з фізики Анатолій Петрович Федоренко.

### Задача 1 (8 кл.).<sup>1</sup>

Неоднорідний стрижень довжиною  $L$  має одну точку опори  $B$  (рис. 1) та утримується в горизонтальному положенні за допомогою вертикальної сили, що прикладають у точці  $C$ . Відомо, що коли  $x = a$  та  $x = b$  ( $a > b$ ), для забезпечення горизонтального положення стрижня потрібно прикласти однакову за модулем силу:

$$|P(a)| = |P(b)| = P.$$

Знайдіть положення центра мас  $x_C$  та масу стрижня  $m$ .

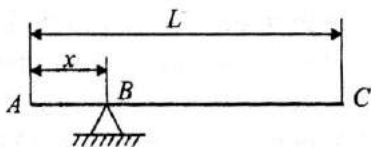


Рис. 1

### Розв'язок.

Розглянемо два випадки:

$x < x_C$  (рис. 2, а) та  $x > x_C$  (рис. 2, в).

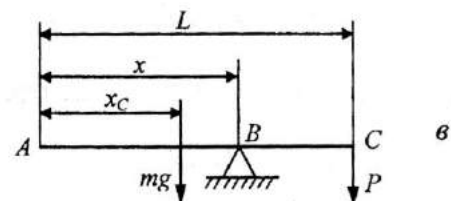
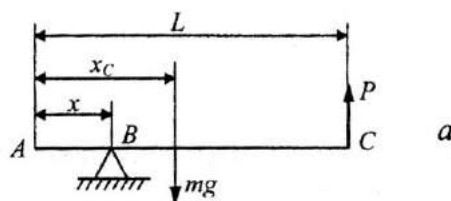


Рис. 2

Якщо  $x < x_C$ , мова йде про рівновагу важеля другого роду. Сила  $P$  направлена догори і дорівнює

$$P = mg \frac{x_C - x}{L - x}. \quad (1)$$

<sup>1</sup> У цій задачі переважно технічні проблеми. Потрібно дослідити рівняння, використовуючи спеціально зображені схеми (прим. А. Федоренка).

Якщо  $x = 0$ , сила  $P = mg \frac{x_c}{L}$  і має максимальне значення. Із зростанням  $x$  сила  $P$  зменшується, а якщо  $x = x_c$ , сила  $P = 0$ .

Якщо  $x > x_c$ , то вже йдеться про рівновагу важеля першого роду. Сила  $P$  направлена до низу і дорівнює

$$P = mg \frac{x - x_c}{L - x}. \quad (2)$$

Зі зростанням  $x$ , починаючи від значення  $x = x_c$ , сила  $P$  зростає, починаючи з нуля. Це зростання необмежене з наближенням  $x$  до значення  $L$ .

У кожному окремому випадку, з розглянутих двох, сила  $P$  не повторює свого значення. Тому сили  $P$  можуть бути рівними для тих двох положень стрижня, в одному з яких точка опори  $B$  лежить ліворуч від центра мас, а в другому – праворуч.

Оскільки за умовою задачі  $a > b$ , то з рівняння (1) одержимо

$$P = mg \frac{x_c - b}{L - b}, \quad (3)$$

а з рівняння (2)

$$P = mg \frac{a - x_c}{L - x}. \quad (4)$$

Прирівнявши праві частини цих двох рівнянь, одержимо

$$\frac{x_c - b}{L - b} = \frac{a - x_c}{L - a}. \quad (5)$$

Звідси знаходимо координату центра мас:

$$x_c = \frac{L(a + b) - 2ab}{2L - (a + b)}. \quad (6)$$

Знаючи значення  $x_c$ , можна знайти масу стрижня з рівняння (3)

$$m = \frac{P(L - b)}{g(x_c - b)} \quad (7)$$

або з рівняння (4)

$$m = \frac{P(L - a)}{g(a - x_c)}. \quad (8)$$

Обидва рівняння (7) і (8) рівносильні, що стає очевидним, якщо прирівняти їхні праві частини та врахувати рівняння (6).

### Задача 2 (9 кл.).<sup>2</sup>

На горизонтальній площині вздовж прямої  $AB$  лежать однорідні бруси масою  $m$  і довжиною  $L$  (рис. 1). Кожний брус перетинає пряму  $AB$  у деякій точці  $C$ . При цьому  $DC = x$ ,

$$\frac{L}{2} \leq x < L.$$

Робітнику треба перемістити бруси так, щоб вони лежали на прямій  $AB$ . Для цього він поруч з брусом у точці  $C$  забиває вертикальний стрижень. У точці  $D$  перпендикулярно до  $DE$  прикладає мінімальну горизонтальну силу  $P$  та обертає брус відносно стрижня на гострий кут  $\alpha$ .

Залежно від значення  $x$  знайдіть: величину мінімальної сили  $P$ , величину реакції  $R_c$  з боку стрижня, той бік бруса, з якого потрібно вбити стрижень.

Коефіцієнт тертя ковзання  $\mu$  між брусом і площиною заданий.

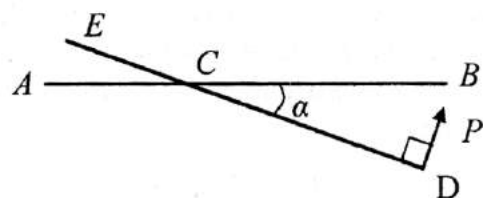


Рис. 1

### Розв'язок.

Маса однорідного бруса розподілена рівномірно по його довжині. Тому під час обертання бруса довкола точки  $C$  сила тертя теж розподілена рівномірно вздовж бруса.

Лінійна густина сили тертя буде:

$$f = \frac{\mu mg}{L}. \quad (1)$$

<sup>2</sup>Задача цікава і достатньо складна. Умова має низку підказок. Задача олімпіадна (прим. А. Федоренка).



Нехай значення  $x$  трохи більше від  $L/2$ , тоді стрижень треба забити з того боку бруса, куди направлена сила  $P$  (рис. 2).

Під час обертання бруса доводиться долати опір сил тертя, які зведемо до двох рівнодійних:

$$F_1 = \frac{\mu mg}{L} x \text{ та } F_2 = \frac{\mu mg}{L} (L - x).$$

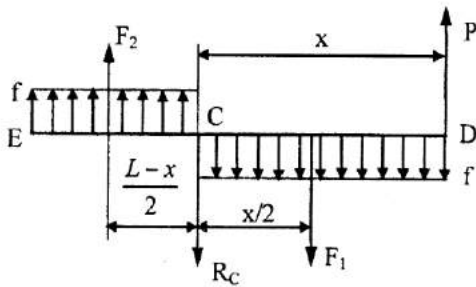


Рис. 2

Сила  $P$  утворює рушійний момент

$$\begin{aligned} M_x &= P \cdot x = F_1 \frac{x}{2} + F_2 \frac{(L-x)}{2} = \\ &= \frac{\mu mg}{2L} (L^2 - 2Lx + 2x^2) \end{aligned} \quad (2)$$

Мінімальна сила, що забезпечує обертання бруса, залежно від  $x$  дорівнює:

$$P = \frac{\mu mg}{2L} \left( \frac{L^2 - 2Lx + 2x^2}{x} \right). \quad (3)$$

Реакція  $R_c$ , що при цьому виникає, дорівнює:

$$R_c = P - F_1 + F_2 = \frac{\mu mg}{2L} \left( \frac{L^2 - 2x^2}{x} \right). \quad (4)$$

Формула (4) правильна лише для значень  $R_c \geq 0$ , бо стрижень, як опора, протидіє лише в одному напрямку.

Згідно рівнянню (4) реакція  $R_c \geq 0$ , якщо  $L^2 - 2x^2 \geq 0$ , тобто якщо

$$x \leq \frac{L}{\sqrt{2}}. \quad (5)$$

Якщо  $x = L/\sqrt{2}$ , опора у вигляді вертикального стрижня загалом не потрібна, бо  $R_c = 0$ .

Із подальшим збільшенням  $x$  формальне використання формули (4) дає значення  $R_c < 0$ . Це означає, що для забезпечення обертання бруса довкола точки  $C$  потрібно реалізувати реакцію протилежного напрямку.

Якщо забити стрижень з того ж боку, як і тоді, коли  $L/2 \leq x \leq L/\sqrt{2}$ , то він взагалі не діятиме, а брус обертатиметься довкола точки  $C_1$  (рис. 3). Отже, щоб брус обертався довкола точки  $C$ , коли  $x > L/2$ , треба його забивати з протилежного боку.

Тоді реакцію визначають за формулою:

$$R_c = F_1 - F_2 - P = \frac{\mu mg}{2L} \left( \frac{2x^2 - L^2}{x} \right). \quad (6)$$

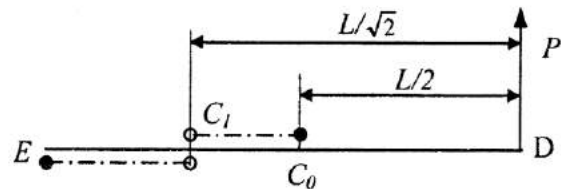


Рис. 3

За значень  $x$ , таких, як  $L/2 \leq x \leq L/\sqrt{2}$ , стрижень треба забивати з того боку, в який направлена сила  $P$ . При цьому реакцію  $R_c$  визначають за формулою (4) і вона направлена проти сили  $P$ .

За значень  $x$ , таких як  $L/\sqrt{2} \leq x \leq L$ , стрижень треба забивати з протилежного боку бруса. При цьому реакцію  $R_c$  можна визначити за формулою (6).

В обох випадках напрямок сили  $P$  однаковий. Мінімальна за величиною сила  $P$ , яка забезпечить обертання бруса довкола точки  $C$ , можна визначити за формулою (3).

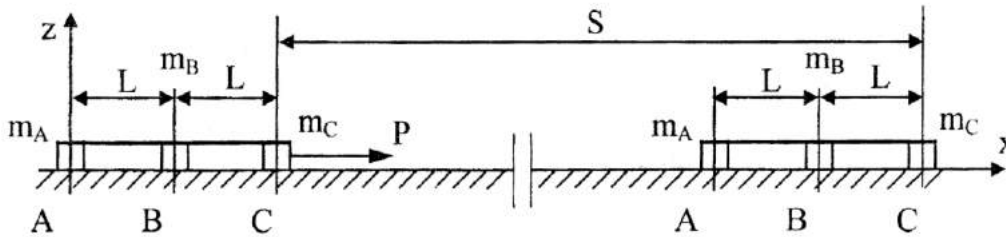


Рис. 1

**Задача 3 (10 кл.).<sup>3</sup>**

На горизонтальній поверхні лежить тверде тіло, що виготовлене з трьох коротких брусків, з'єднаних між собою привареною зверху до них пластиною (рис. 1).

Короткі бруски розглядають як точкові маси  $m_A$ ,  $m_B$ ,  $m_C$ . При цьому  $m_A > m_B > 2m_C$ .

Пластину вважайте невагомою.

Чоловік і юнак змістили тіло на відстань  $S$  уздовж осі  $x$ . Чоловік зсунув тіло, приклавши до нього вздовж осі  $x$  горизонтальну силу:

$$P = \mu g(m_A + m_B + m_C),$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя ковзання.

Юнак перемістив тіло, приклавши меншу горизонтальну силу  $Q$  ( $P < Q$ ).

Як і яку найменшу силу  $Q$  довелось юнаку прикласти до тіла?

Порівняйте роботу, яку виконав чоловік і юнак.

Силу  $P$  та  $Q$  прикладали, поступово збільшуючи їхню величину, поки тіло не почало рухатись. ( $S \gg L$ ).

**Розв'язок 1.**

Сила  $P$  є мінімальною силою, що здатна забезпечити прямолінійний рух тіла.

Оскільки  $Q < P$ , то дія сили  $Q$  може викликати лише обертальний рух. Найменшою силою  $Q$  буде тоді, коли вона прикладена в точці  $A$  перпендикулярно до  $AC$ .

Після того, як здійснюється обертання тіла на кут  $\pi$ , силу  $Q$  так само прикладають вже в точці  $C$ , яка буде ліворуч.

Процедуру повторюють доти, поки тіло не зміститься на відстань  $S$ . Залишилось встановити, як саме це реалізується.

Прослідкуємо за тілом із поступовим збільшенням сили  $Q$ . Поки тіло знаходиться в рівновазі, доти система сил є статично невизначеною. З ростом  $Q$  реакції змінюються невідомо як. Якщо  $Q < \mu m g_A$ , наявні строгі нерівності:

$$|R_A| < \mu m g_A, |R_B| < \mu m g_B, |R_C| < \mu m g_C. \quad (1)$$

Першою свого граничного значення досягне реакція

$$R_A : R_A = \mu m g_A.$$

Та навіть коли  $Q > \mu m g_A$ , тіло знаходитиметься в рівновазі доти, поки реакція  $R_B$  чи  $R_C$  не досягне свого граничного значення.

Теоретично можливий варіант, коли  $R_B$  і  $R_C$  одночасно досягнуть критичних значень:

$$R_B = \mu m g_B, R_C = \mu m g_C.$$

Для спрощення розрахунків силу  $Q$  запишемо як суму:

$$Q = \mu m g_A + \Delta Q. \quad (2)$$

Тоді

$$\Delta Q = Q - \mu m g_A. \quad (3)$$

<sup>3</sup>Задача особлива. Вона технічно нескладна та вимагає логічного мислення. Умова поступового збільшення рушійної сили дає змогу від процесу перейти до положення, що відповідає обертанню тіла, минаючи статичну невизначеність. Задача дає змогу виявити вдумливих олімпіадників (прим. А. Федоренка).

Нехай зі збільшенням  $\Delta Q$  першою граничного значення досягне реакція  $R_B$ . Тоді тіло обертатиметься довкола точки  $C$  (рис. 2, *a*).

Відтак

$$\Delta Q_1 = \frac{\mu g m_B}{2}.$$

Якщо ж першою свого граничного значення досягне реакція  $R_C$ , то тіло обертатиметься довкола точки  $B$  (рис. 2, *в*).

Відтак

$$\Delta Q_2 = \mu g m_C.$$

Оскільки за умовою задачі

$$m_B > 2m_C,$$

то

$$\Delta Q_1 > \Delta Q_2.$$

Це означає, що першою свого максимального значення досягне реакція  $R_C$ , а тому тіло обертатиметься довкола точки  $B$ .

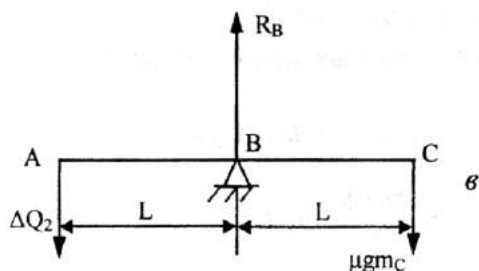
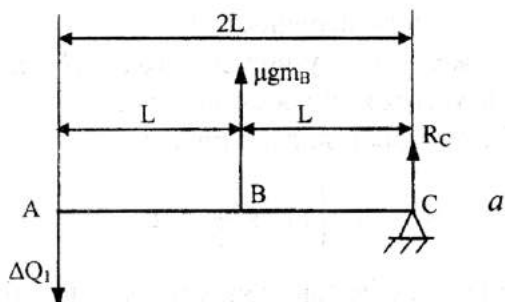


Рис. 2

Розглянемо випадок, коли реакції  $R_B$  та  $R_C$  теоретично одночасно досягнуть граничних значень. Йому відповідають дві основні схеми.

На схемі (рис. 3, *a*) можливий полюс обертання  $O_1$  може знаходитися між точками  $B$  і  $C$ . Та якщо навіть знехтуємо реакцією  $R_C$  ( $R_C = 0$ ) та змістимо точку  $O_1$  в точку  $C$  (тобто мінімізуємо  $\Delta Q$ ), то одержимо лише випадок 1, а це означає, що  $\Delta Q_3 > \Delta Q_1$  і полюс обертання  $O_1$  співпадає з точкою  $C$ .

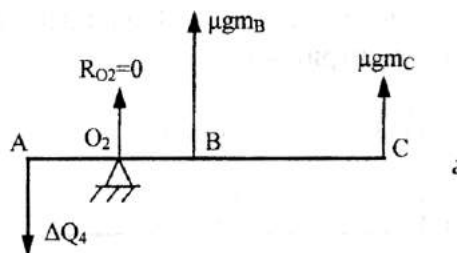
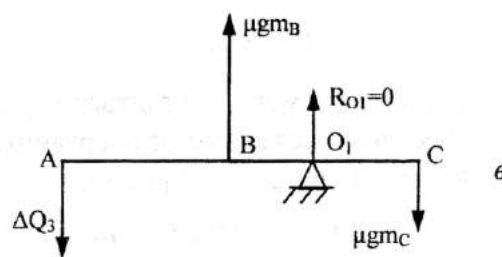


Рис. 3

На схемі (рис. 3, *в*) можливий полюс обертання  $O_2$  знаходиться між точками  $A$  і  $B$ , або правіше від точки  $C$ .

Тоді, якщо знехтуємо реакцією  $R_B$  та змістимо точку  $O_2$  в точку  $B$  (тобто мінімізуємо  $\Delta Q$ ), то прийдемо до випадку 2, а це означає, що  $\Delta Q_4 > \Delta Q_2$  і полюс обертання  $O_2$  співпадає з точкою  $B$ .

Отже, реакції  $R_B$  і  $R_C$  не можуть одночасно досягти граничних значень.

Відтак під час кожного непарного за ліком обертання на кут  $\pi$  тіло обертається довкола точки  $B$  під дією сили (рис. 2, *в*)

$$Q_A = \mu g(m_A + m_C). \quad (4)$$

Точки  $A$  і  $C$  при цьому поміняються місцями, а точка  $B$  залишиться на місці.

Оскільки наявне також рівняння:

$$Q_A - \mu g m_A + \mu g m_C - R_B = 0, \quad (5)$$

то враховуючи (4), одержимо:

$$R_B = 2\mu m_C g.$$

За умовою задачі

$$2m_C < m_B,$$

тому

$$R_B < \mu m_B g.$$

Це відповідає умові (1) і підтверджує, що точка  $B$  реалізується як полюс обертання.

При цьому юнак виконає роботу:

$$A_1 = \pi \mu g (m_A + m_C) L. \quad (6)$$

Після обертання на кут  $\pi$  тіло займе положення, в якому порівняно з початковим, точки  $A$  і  $C$  поміняються місцями. Всі інші параметри не зміняться (рис. 4).

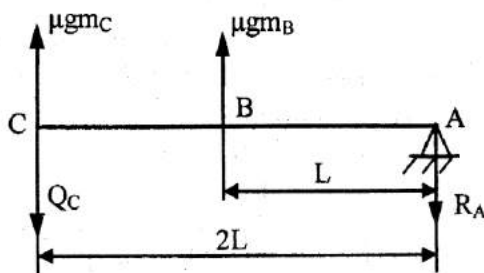


Рис. 4

Це означає, що сила  $Q$  прикладається в точці  $A$ , а всі зроблені обчислення знаходять за формулою (3):

$$\Delta Q = Q - \mu g m_C.$$

Під час обертання довкола точки  $A$ :

$$\Delta Q_1 = \frac{\mu g m_B}{2},$$

а довкола точки  $B$ :

$$\Delta Q_2 = \mu g m_A.$$

За умовою задачі  $m_B < m_A$ , тому в цьому випадку  $\Delta Q_1 < \Delta Q_2$ .

Це означає, що тіло обертатиметься вже довкола точки  $A$ .

За кожного парного за ліком обертання на кут  $\pi$  тіло обертається вже довкола точки  $A$ . Обертання (рис. 4) здійснює сила

$$Q_C = \mu g \left( m_C + \frac{m_B}{2} \right). \quad (7)$$

Оскільки справджується рівняння:

$$Q_C - \mu g m_C - \mu g m_B + R_A = 0,$$

то враховуючи (7), одержимо:

$$R_A = \frac{\mu g m_B}{2}.$$

За умовою задачі

$$m_A < m_B,$$

тому

$$R_A < \frac{\mu g m_A}{2},$$

що відповідає нерівності (1).

Отже, в цьому випадку точка  $A$  справді реалізується як полюс обертання.

Відтак юнак виконає роботу:

$$A_2 = \pi \mu g \left( m_C + \frac{m_B}{2} \right) 2L. \quad (8)$$

За одне обертання на кут  $2\pi$  тіло зміститься на величину  $2L$ , тому буде приблизно  $S/2L$  повних обертів.

Загалом юнак виконає роботу:

$$\begin{aligned} A_Q &\approx \frac{S}{2L} (A_1 + A_2) = \\ &= \frac{\pi \mu g S}{2} (m_A + m_B + 3m_C). \end{aligned} \quad (9)$$

Чоловік виконає роботу:

$$A_p = S \mu g (m_A + m_B + m_C). \quad (10)$$

Ця робота менша від роботи  $A_Q$ , зате юнак досягає своєї мети, прикладаючи меншу силу.



**Розв'язання 2.**

Сила  $P$  є мінімальною силою, що здатна забезпечити прямолінійний рух тіла.

Оскільки  $Q < P$ , то дія горизонтальної сили  $Q$  може викликати лише обертальний рух у горизонтальній площині. Найменшою сила  $Q$  буде тоді, коли вона прикладена в точці  $A$  перпендикулярно до  $AC$ .

Після того, як здійснюється обертання тіла на кут  $\pi$ , силу  $Q$  так само прикладають вже в точці  $C$ , яка буде ліворуч.

Процедура повторюється аж поки тіло не зміститься на відстань  $S$ . Залишилось встановити, як саме це реалізується.

Прослідкуємо за тілом із поступовим збільшенням сили  $Q$ . Поки тіло знаходиться в рівновазі система сил є статично невизначеною. З ростом  $Q$  реакції змінюються невідомо як.

Якщо  $Q < \mu g t_A$ , наявні строгі нерівності:

$$|R_A| < \mu g t_A, |R_B| < \mu g t_B, |R_C| < \mu g t_C. \quad (1)$$

Першою свого граничного значення досягне реакція  $R_A$ :

$$R_A = \mu g t_A.$$

Але навіть, коли  $Q > \mu g t_A$ , тіло знаходиться в рівновазі доти, поки реакція  $R_B$  чи  $R_C$  не досягне свого граничного значення.

Для спрощення розрахунків силу  $Q$  запишемо як суму:

$$Q = \mu g t_A + \Delta Q. \quad (2)$$

Тоді

$$\Delta Q = Q - \mu g t_A. \quad (3)$$

Нехай зі збільшенням  $\Delta Q$  першою граничного значення досягне реакція  $R_B$ . Тоді тіло обертатиметься довкола точки  $C$  (рис. 2, а).

Відтак

$$\Delta Q_1 = \frac{\mu g t_B}{2}.$$

Якщо ж першою свого граничного значення досягне реакція  $R_C$ , то тіло буде обертатися довкола точки  $B$  (рис. 2, в).

Відтак

$$\Delta Q_2 = \mu g t_C.$$

Оскільки за умовою задачі

$$m_B > 2m_C,$$

то

$$\Delta Q_1 > \Delta Q_2.$$

Це означає, що першою свого максимального значення досягне реакція  $R_C$ , а тому тіло обертатиметься довкола точки  $B$ .

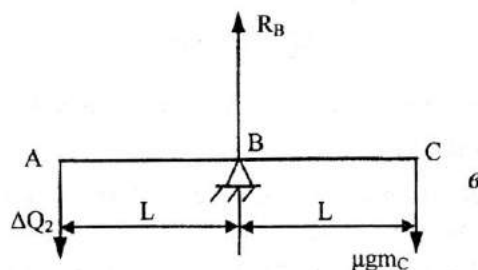
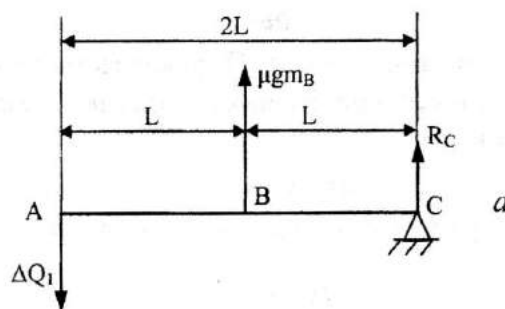


Рис. 2

Відтак під час кожного непарного за ліком обертання на кут  $\pi$  тіло обертатиметься довкола точки  $B$  під дією сили (рис. 2, в)

$$Q_A = \mu g (m_A + m_C). \quad (4)$$

Точки  $A$  і  $C$  при цьому поміняються місцями, а точка  $B$  залишиться на місці.

При цьому юнак виконає роботу:

$$A_1 = \pi \mu g (m_A + m_C) L. \quad (5)$$

Після обертання на кут  $\pi$  тіло займе положення, в якому порівняно з початковим, точки  $A$  і  $C$  поміняються місцями. Всі інші параметри не зміняться (рис. 3).

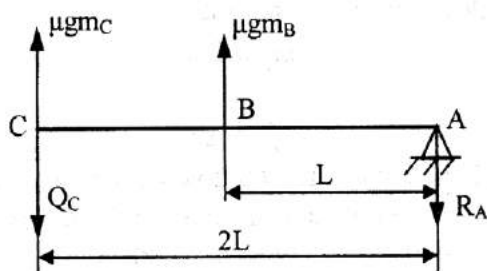


Рис. 3

Це означає, що сила  $Q$  прикладається в точці  $A$ , а в усіх приведених розрахунках за формулою (3)

$$\Delta Q = Q - \mu g m_C.$$

Під час обертання довкола точки  $A$ :

$$\Delta Q_1 = \frac{\mu g m_B}{2},$$

а довкола точки  $B$ :

$$\Delta Q_2 = \mu g m_A.$$

За умовою задачі  $m_B < m_A$ , тому в цьому випадку  $\Delta Q_1 < \Delta Q_2$ .

Це означає, що тіло обертатиметься вже довкола точки  $A$ .

За кожного парного за ліком обертання на кут  $\pi$  тіло обертається вже довкола точки  $A$ .

Обертання (рис. 4) здійснює сила

$$Q_C = \mu g \left( m_C + \frac{m_B}{2} \right). \quad (6)$$

Відтак юнак виконає роботу:

$$A_2 = \pi \mu g \left( m_C + \frac{m_B}{2} \right) 2L. \quad (7)$$

За одне обертання на кут  $2\pi$  тіло зміститься на величину  $2L$ , тому буде приблизно  $S/2L$  повних обертів.

Загалом юнак виконає роботу:

$$\begin{aligned} A_Q &\approx \frac{S}{2L} (A_1 + A_2) = \\ &= \frac{\pi \mu g S}{2} (m_A + m_B + 3m_C). \end{aligned} \quad (8)$$

Чоловік виконає роботу:

$$A_p = S \mu g (m_A + m_B + m_C). \quad (9)$$

Ця робота менша від роботи  $A_Q$ , зате юнак досягає своєї мети, прикладаючи меншу силу.

Поданий розв'язок за бажанням можна доповнити такими міркуваннями.

Розглянемо теоретично можливий випадок, коли реакції  $R_B$  та  $R_C$  одночасно досягнуть граничних значень:

$$R_B = \mu g m_B,$$

$$R_C = \mu g m_C.$$

Покажемо, що в цій задачі це неможливо.

Зупинимось на непарному за ліком обертанні тіла.

Нехай спочатку полюс обертання  $O$  міститься на відрізку  $AB$  (рис. 4, а).

Реакція  $R_0 = 0$ .

Момент від сил тертя відносно  $O$  буде:

$$M_T = \mu g m_B OB + \mu g m_C (OB + L).$$

Значення  $M_T$  зменшується зі зменшенням  $OB$ . При цьому  $\Delta Q = \mu g m_B + \mu g m_C$  аж поки полюс не попаде в точку  $B$ .

Тоді

$$M_T = \mu g m_C L,$$

а  $\Delta Q$  реалізується, коли

$$\Delta Q_2 = R_B + \mu g m_C < \mu g m_B + \mu g m_C,$$

бо  $R_B \leq \mu g m_B$ .

Отже, за поступового збільшення  $\Delta Q$  за умови  $O \in AB$  спочатку виникне обертання довкола точки  $B$ .

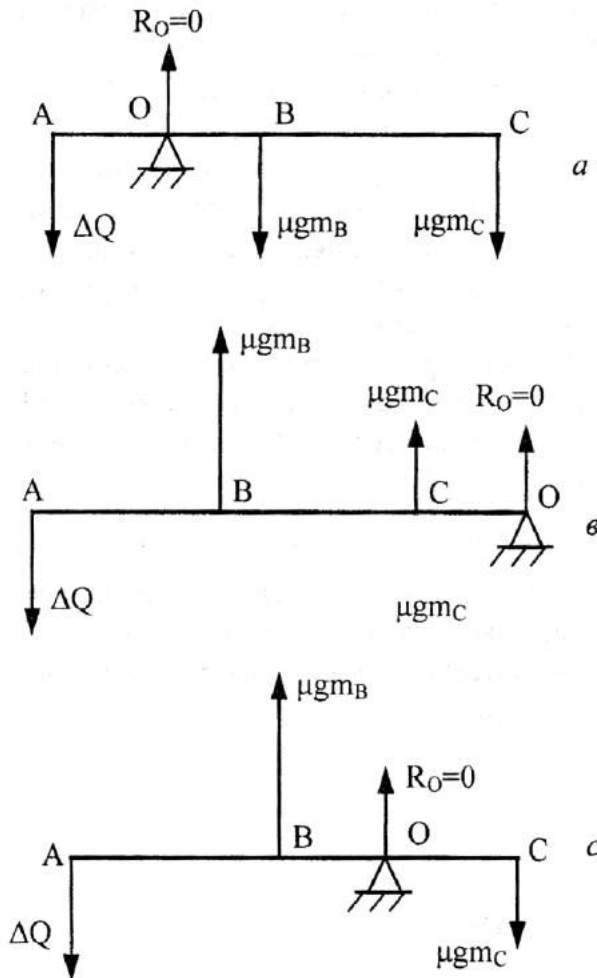


Рис. 4.

Якщо полюс обертання  $O$  знаходиться правіше від точки  $C$  (рис. 4, в), то

$$M_T = \mu g m_B (L + CO) + \mu g m_C CO$$

і зменшується зі зменшенням  $CO$ . При цьому

$$\Delta Q = \mu g m_B + \mu g m_C.$$

Мінімальне значення  $M_T = \mu g m_B$  реалізується, якщо полюсом обертання стає точка  $C$ . При цьому реалізується менше значення  $\Delta Q$ :

$$\Delta Q_1 = \mu g m_B + R_C < \mu g m_B + \mu g m_C.$$

Отже, за поступового збільшення  $\Delta Q$  за умови  $AO > L$  спочатку виникає обертання довкола точки  $C$ .

Нарешті, нехай полюс  $O$  знаходиться на відрізку  $BC$  (рис. 4, с).

Момент сил тертя

$$M_T = \mu g m_B OB + \mu g m_C (L - OB)$$

зменшується зі зміщенням полюса в бік більшої з двох мас  $m_B$  і  $m_C$ , тобто в бік маси  $m_B$ .

Якщо за  $RB \neq 0$  значення

$$\Delta Q = \mu g m_B - \mu g m_C,$$

то за  $OB = 0$  реалізується рушійна сила

$$\Delta Q_2 = R_B - \mu g m_C < \mu g m_B - \mu g m_C.$$

Отже, за непарного за ліком обертання тіла воно обертатиметься лише довкола точки  $B$ .

Аналогічно можна довести, що за непарного за ліком обертання тіла воно обертається довкола точки  $A$ .

#### Задача 4 (11 кл.).<sup>4</sup>

Через цокольне виробниче приміщення проходить труба, по якій постійно протікає тепла вода.

Зовнішній діаметр труби  $d = 0,06$  м.

У літній сезон температура в приміщенні тримається в комфортних межах. У зимовий – потрібно додаткове опалення.

Для економії енергії без значної модернізації вирішено використовувати змінний кожух із теплоізоляційного матеріалу. Для цього на зиму трубу обгортають прямокутною смугою товщиною  $\delta$ .

<sup>4</sup>Задача на енергозбереження. Умова задачі фактично містить розв'язок. Від учня вимагається швидка адаптація (як на міжнародній олімпіаді) та добротна техніка. Задача повчальна, розвивальна, актуальна (прим. А. Федоренка).

Щоб перевірити це парадоксальне рішення, керуючись умовою максимальної тепловіддачі, визначте товщину  $\delta$ , якщо коефіцієнт теплопровідності матеріалу кожуха дорівнює:

$$\lambda = 0,25 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}},$$

коефіцієнт питомої поверхневої тепловіддачі кожуха в повітряне середовище:

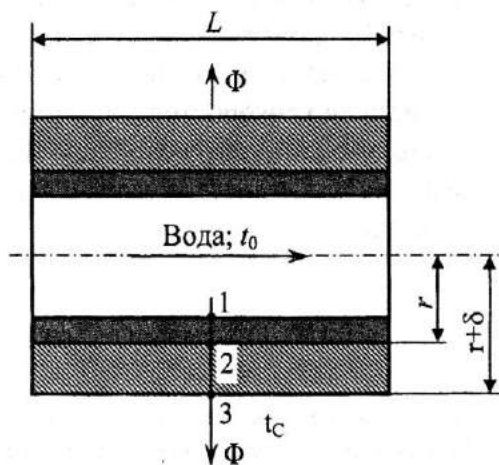
$$\alpha_{\text{КС}} = 5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}.$$

У цій задачі  $\lambda$  та  $\alpha$  усіх матеріалів майже не залежать від температурного режиму.

*Довідка.*

Під час розрахунку теплових кіл формула  $\theta = \Phi R$  є аналогом закону Ома. Перепад температур (перегрів)  $\theta$ , К є аналогом напруги, тепловий потік  $\Phi$ , Вт є аналогом сили струму, тепловий опір циліндричної стінки визначається формулою:

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda L} \ln \frac{r_2}{r_1},$$



де  $r_1$  і  $r_2$  – відповідно внутрішній та зовнішній радіуси циліндра;  $L$  – довжина циліндра.

### Розв'язання.

Побудуємо модель теплового кола, керуючись схемою труби з кожухом (рис. 1).

Нехай  $t_0$  – температура води в трубі;  $t_c$  – температура повітря в приміщенні.

Оскільки  $t_0 > t_c$ , тому тепловий потік  $\Phi$  направлений радіально від труби. При цьому відбувається послідовна передача тепла від води до труби, крізь трубу, крізь кожух і від поверхні кожуха в повітря.

Під час передачі тепла можна казати і про теплову провідність  $\sigma$ , і про тепловий опір  $R$  кожної ділянки. Загальний опір теплового кола з послідовним з'єднанням:

$$R = R_{01} + R_{12} + R_{23} + R_{30}. \quad (1)$$

За мінімального теплового опору  $R$  одержимо максимальний тепловий потік  $\Phi$ .

У цій задачі це можна досягти вибором параметра  $\delta$ .

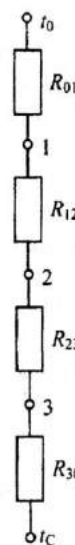


Рис. 1



Продиференціюємо  $R$  по змінній  $\delta$  та прирівняємо похідну  $R'$  до нуля.

Враховуючи, що  $R_{01}$  та  $R_{12}$  не залежать від  $\delta$ , одержимо:

$$R' = R'_{23} + R'_{3C} = 0. \quad (2)$$

Тепловий опір кожуха як циліндричної стінки визначається рівнянням:

$$R_{23} = \frac{1}{2\pi\lambda_K L} \ln \frac{r+\delta}{r}. \quad (3)$$

Теплова провідність всієї поверхні кожуха дорівнює:

$$\sigma_{3C} = 2\pi(r+\delta)L\alpha_{KC}. \quad (4)$$

Тепловий опір:

$$R_{3C} = \sigma_{3C}^{-1} = \frac{1}{2\pi(r+\delta)L\alpha_{KC}}. \quad (5)$$

Диференціюючи по  $\delta$  рівняння (4) і (5) та підставивши одержані результати в рівняння (2), матимемо рівняння:

$$\frac{1}{2\pi\lambda_K(r+\delta)L} - \frac{1}{2\pi(r+\delta)^2 L\alpha_{KC}} = 0. \quad (6)$$

Оскільки друга похідна буде

$$R'' = \frac{2\lambda_K - \alpha_{KC}(r+\delta)}{2\pi \cdot L\alpha_{KC}\lambda_K(r+\delta)^3}, \quad (7)$$

то рівняння (2) відповідає умові мінімуму  $R$ , якщо

$$2\lambda_K - \alpha_{KC}(r+\delta) > 0. \quad (8)$$

З рівняння (6) одержимо

$$\frac{1}{\lambda_K} - \frac{1}{\alpha_{KC}(r+\delta)} = 0 \quad (9)$$

або остаточно

$$\delta = \frac{\lambda_K}{\alpha_{KC}} - r. \quad (10)$$

Рівняння (10) має фізичний зміст за умови

$$\frac{\lambda_K}{\alpha_{KC}} > r. \quad (11)$$

За відносно стабільного значення  $\alpha_{KC}$  визначальним стає вибір параметра  $\lambda_K$ .

Щоб зекономити у витратах на матеріал,  $\lambda_K$  можна взяти достатньо малим, забезпечивши потрібне  $\delta > 0$ .

Рис. 2 ілюструє вплив  $\delta$  на значення теплового опору.

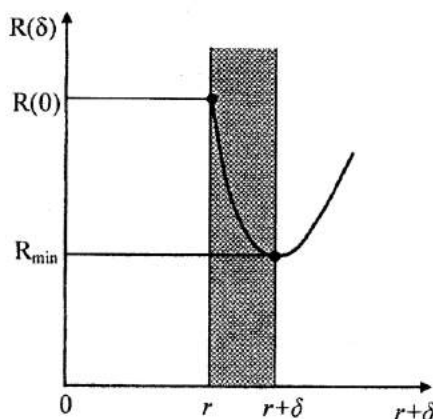


Рис. 2

За заданих значень  $d$ ,  $\lambda_K$ ,  $\alpha_{KC}$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\lambda_K}{\alpha_{KC}} - r = \frac{\lambda_K}{\alpha_{KC}} - \frac{d}{2} = \\ &= \frac{0,25}{0,5} - \frac{0,06}{2} = 0,02 \text{ м} \end{aligned}$$

Тобто товщина кожуху  $\delta$  дорівнює 2 см. Залишилось перевірити умову (8):

$$\begin{aligned} 2\lambda_K - \alpha_{KC}(r+\delta) &= \\ &= 2 \cdot 0,25 - 0,5(0,03+0,02) = \\ &= 0,5(1-0,05) > 0 \end{aligned}$$

Тобто справді досягається мінімальне значення  $R$ .

Отже, можливість підвищення тепловіддачі теплопроводу за допомогою змінного кожуха із теплоізоляційного матеріалу підтверджена.





Просте обчислення переконає вас, що, поки кінець короткого плеча піднімається на 1 см, інший кінець опише у Всесвіті величезну дугу в 1000 000 000 000 000 000 ( $6 \cdot 10^{18}$ ) км. Такий неймовірно довгий шлях мала б пройти рука Архімеда, налягаючи на важіль, щоб “підняти Землю” тільки на один сантиметр!

Скільки ж часу знадобиться для цього? Якщо вважати, що Архімед здатний був підняти вантаж у 60 кг на висоту 1 м за одну секунду (працездатність майже в цілу кінську силу!), то й тоді, щоб “підняти Землю” на 1 см потрібно 1000 000 000 000 000 000 ( $1 \cdot 10^{21}$ ) секунд, або тридцять тисяч білльйонів років! За все своє довге життя Архімед, напіраючи на важіль, не “підняв би Землі” навіть на товщину найтоншої волосини.

Ніякі хитрощі геніального винахідника не допомогли б йому помітно скоротити цей термін. “Золоте правило механіки” свідчить, що на кожній машині виграш у силі неминуче супроводжується відповідною втратою в довжині переміщення, тобто в часі. Якби навіть Архімед довів швидкість своєї руки до найбільшої швидкості, яка можлива в природі, – до 300 000 км за секунду (швидкість світла), то і за такого фантастичного припущення він “підняв би Землю” на 1 см лише після десяти мільйонів років роботи.

### АРХІМЕД (Archimedes) (близько 287–212 рр. до Р. Х.)

Грецький механік, фізик, математик, інженер, винахідник, основоположник теоретичної механіки і гідростатики. Він народився в Сіракузі (Сицилія) у сім’ї астронома Фідія.

Архімед отримав чудову освіту у тодішньому науковому центрі в Александрії Єгипетській. Згодом повернувся до Сіракузи, де мешкав до кінця життя.

За легендою Архімед помер насильницькою смертю від меча римського легіонера. Коли воїн увійшов до кімнати ученого, той міркував над розв’язком геометричної задачі і попросив гостя зачекати.

Архімедові приписують понад 40 винаходів. Він винайшов військові металеві машини і крани, за допомогою яких перекидали римські галери. Йому приписують також спалення римського флоту сонячним світлом за допомогою системи зеркал.

Архімед винайшов водопідіймальний механізм, гвинт, який ще досі використовують в Єгипті для черпання води.

*Гвинт Архімеда* – це водопідіймальна машина, вал із гвинтовою поверхнею, що встановлено у нахиленій трубі, нижній кінець якої занурений у воду. Під час обертання гвинтова поверхня валу переміщує воду по трубі на висоту до 4 м.

*Спіраль Архімеда* – плоска крива, що описується точкою  $M$ , яка рівномірно рухається по прямій  $OA$ , тоді як пряма рівномірно обертається в площині довкола однієї із своїх точок  $O$ .

*Закон Архімеда*: на будь-яке тіло, занурене в рідину, діє виштовхувальна сила, направлена догори і дорівнює вазі витісненої ним рідини.





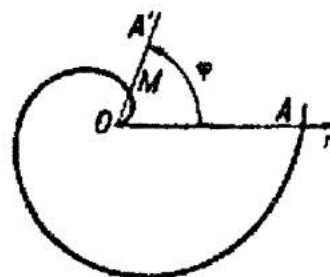
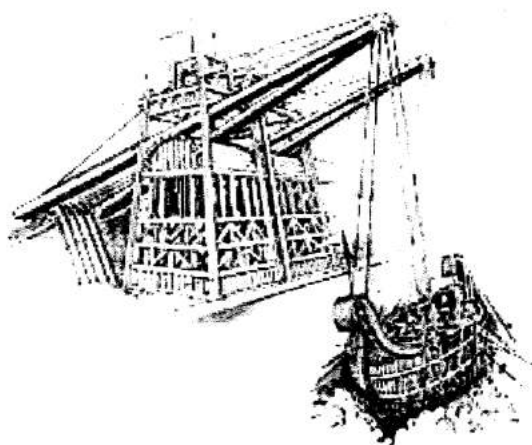
За проектом Архімеда був побудований як на той час величезний корабель “Сіракузія”, який міг підняти 3,3 тонни вантажу, згодом його перейменували на “Александрію”. За однією з легенд за допомогою конструкції важелів він легким порухом руки підняв та опустил на воду важкий корабель. Саме тоді й народилася крилата фраза: “Дайте мені точку опори і я підніму Землю”.

Учений побудував *планетарій*. Це був механічний прилад, за допомогою якого можна було спостерігати рух планет, Сонця і Місяця. Після смерті Архімеда планетарій вивезли до Риму, де ще довго спостерігали за небом.

Праці Архімеда в різних країнах неодноразово переписували. До нас дійшло лише декілька переписаних трактатів Архімеда. Більшість з них загинуло під час пожежі Александрійської бібліотеки.

У 1906 році віднайшли ще невідомі раніше праці Архімеда, серед них “Про рівновагу плоских фігур”, де сформульовано основні положення статички, а також “Про тіла, які плавають”. У цій праці Архімед досліджував не лише умови плавання тіл, а й питання стійкості рівноваги тіл, які плавають, різної геометричної форми.

На честь Архімеда названі вулиці в Донецьку, Дніпропетровську, Нижньому Новгороді, Амстердамі, площу в Сіракузах.



## БАЙКА ПРО ЛЕБЕДЯ, РАКА І ЩУКУ<sup>2</sup>

Історія про те, як “лебідь рветься підлетіть, рак упирається, а щука тягне в воду”, відома всім. Але невідомо чи хто пробував розглядати цю байку з погляду механіки. Результат виходить зовсім не подібний на висновок байкаря Леоніда Глібова.

Перед нами механічна задача на складання кількох сил, що діють під кутом одна до одної. Напрямок сил визначено в байці так “...лебідь рветься підлетіть, рак упирається, а щука тягне в воду”.

Це означає (див. рис.), що одна сила, яка тягне лебедя, спрямована догори, інша, що тягне щуку (ОВ), – убік, а третя, що тягне рака (ОС), – назад. Не забудьмо, що існує ще четверта сила – вага воза, яка спрямована прямовисно донизу. Байка стверджує, що “хура й досі там”, іншими словами, що рівнодійна всіх доданих до воза сил дорівнює нулеві.

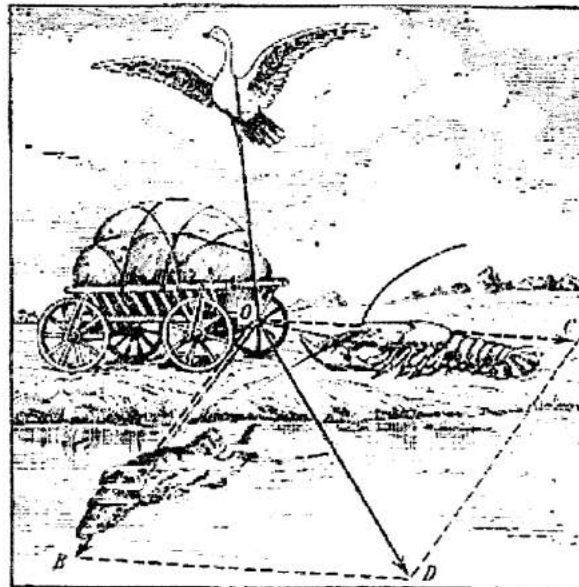
Чи так це? Подивімося. Лебідь, що рветься до хмар, не заважає роботі рака і щуки, навіть допомагає їм: тяга лебедя, спрямована проти сили тяжіння, зменшує тертя коліс об землю і об осі, полегшуючи тим вагу воза, а може навіть цілком врівноважуючи його, – адже вантаж невеликий (“а й не велика, бачся, штука”).





У товаристві лад – усяк тому радіє;  
 Дурне безладдя лихо діє,  
 І діло, як на гріх,  
 Не діло – тільки сміх.  
 Колись-то Лебідь, Рак та Щука  
 Приставить хуру узялись.  
 От троє разом запряглись,  
 Смикнули – катма ходу...  
 Що за морока? Що робить?  
 А й не велика, бачся, штука, –  
 Так Лебідь рветься підлетіть,  
 Рак упирається, а Щука тягне в воду.  
 Хто винен з них, хто ні – судить не нам,  
 Та тільки хура й досі там.

1853 р.



Задача про лебедя, рака і щуку за  
 правилами механіки. Рівнодійна (OD)  
 має зтягувати віз у річку

Допустивши для простоти останній випадок, ми бачимо, що залишаються лише дві сили: тяга раку і тяга щуки. Про напрямок цих сил сказано, що “рак упирається, а щука тягне в воду”. Само собою зрозуміло, що вода перебувала не попереду воза, а де-небудь збоку (не втопити ж віз зібралися трудівники!). Отже, сили рака і щуки направлені під кутом одна до одної.

Якщо прикладені сили не лежать на одній прямій, то їхня рівнодійна ніяк не може до-рівнювати нулеві.

За правилами механіки, будемо на обох силах  $OB$  і  $OC$  паралелограм, діагональ його  $OD$  дає напрямок і величину рівнодійної. Очевидно, що ця рівнодійна сила має зрушити віз із місця, тим більше, що вага його повністю або частково врівноважується тягою лебедя. Інше питання – в який бік зрушиться віз: вперед, назад чи в бік? Це залежить уже від співвідношення сил і від кута між ними.

Читачі, які мають деяку практику у складанні сил, легко розберуться і в тому випадку, коли сила лебедя не врівноважує вагу воза. Вони переконуються, що віз і тоді не може залишатися нерухомим. Лише за одної умови віз може не зрушитися під дією цих трьох сил: якщо тертя коліс на осях і до полотна дороги більші, ніж прикладені зусилля. Та це не узгоджується з твердженням, що “... не велика, бачся, штука”.

У всякому разі, Леонід Глібов не міг з упевненістю стверджувати, що “смикнули – катма ходу...”, що “хура й досі там”. Це, втім, не змінює сенсу байки.

<sup>1</sup>Я. И. Перельман. *Занимательная физика*. В 2-х книгах. Книга 2. – Москва: Издательство “Наука”, 1983.



## ЩЕ ПРО М'ЯЧ

До фахового вивчення фізики кожен йде по-різному: кого залучають батьки, кого захоплюють учителі, декого штовхає природна допитливість...

Та якщо подивитись уважніше довкола себе, то бачимо, що природні явища учені намагаються пояснити за допомогою законів фізики. Та й не лише явища ...

Наприклад, футбол – це рух, сила, траєкторія, тертя, м'яч тощо. Про рух м'яча складено безліч фізичних задач, подано ще більше розв'язків, описано в книжках...

“Відомо, що коли тіло рухається прямолінійно й рівномірно зі швидкістю  $v$  за умови відсутності тертя, воно має продовжувати свій рух. Але що відбудеться, коли це тіло зіткнеться з іншим? Те, що ми побачимо, залежить лише від швидкості, з якою одне тіло налітає на інше. Відповідь проста: ні!

Якщо в тебе влучить кулька з піногуми, навіть на великій швидкості, вона задасть тобі менше болю, ніж шкіряний м'яч. Можеш бути певен.

Що ж треба знати, аби збагнути, що відбувається під час зіткнення?

Ось нова змінна величина: кількість руху, добуток маси й швидкості.

$$p = mv.$$

Якщо в тебе влучить кулька масою 1 грам, що рухається зі швидкістю 10 км/год, де результат “зіткнення” дещо відрізняється від того випадку, якщо в тебе вдариться з тією ж швидкістю 10 км/год кілограмовий м'яч, тобто м'яч масою 1000 грамів!

Із книжки Анна Парізі, Алессандро Тонелло. *Провідна нитка. На порозі атома* / Пер. з італійської. – Київ: К.І.С., 2006. – 192 с.



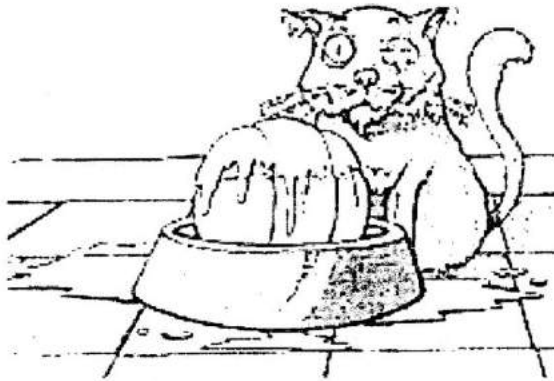
Упродовж минулого сторіччя під час дослідження зіткнень різних тіл було виявлено важливу деталь: змінна величина кількості руху  $p$  у разі пружного зіткнення зберігається сталою.

Що таке пружне зіткнення?

Якщо ти візьмеш свій м'яч і впустиш його донизу, він підскочить і повернеться до твоїх рук. Якщо ж ти його впустиш у миску зі сметаною (не роби цього!), він плюхнеться і лишиться в ній.

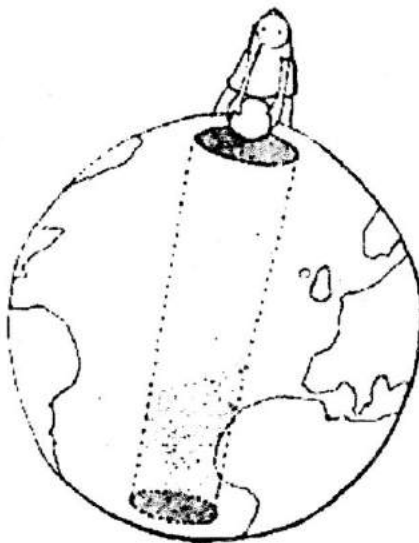


У першому випадку можна сказати, що ми маємо справу із пружними зіткненнями (це було б так повною мірою, якби м'яч та підлога були абсолютно твердими, тобто коли б вони ніяк не "поглинали" удару від зіткнення). А в



другому, звичайно ж, пружного зіткнення нема, і після зіткнення м'яч і миска залишаються нерухомими.

Видатний науковець Галілео Галілей казав: *"...ті, хто не відчуває внутрішньої схильності до науки, можуть повністю полишити роботу. Для тих же, хто продовжує працю-*



*вати, відкривається нове, вище розуміння їхніх стосунків з людством".*

Якщо ти вже зрозумів принцип збереження енергії, спробуй відповісти на запитання вікторини.

Уяви собі, що ти на північному полюсі викопав тунель, який проходить крізь усю Землю, так, що його другий отвір розташовано на південному полюсі. У тунель падає м'яч.

Що з ним буде?

Він загубиться у Всесвіті, коли вилетить з нижнього отвору?

Чи може застрягне в центрі земної кулі?

Чи повернеться до твоїх рук?

Запитання видається марним, але багато фахівців не змогли на конкурсі відповісти на нього і не здобули посади вчителя.

Відповідь на запитання шукай далі.

### **М'яч у центрі Землі**

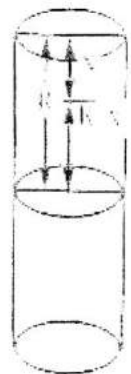
*Ми прокопали крізь усю земну кулю тунель, який проходить через центр Землі, і впускаємо в нього м'яч.*

*Що буде?*

Спочатку наш м'яч перебуває на відстані  $R$  (радіус Землі) від центра Землі, а отже має потенціальну енергію:

$$E_p = mgR.$$

Ця енергія поступово разом з наближенням м'яча до центра зменшуватиметься, бо м'яч уже не буде на відстані  $R$  від центра, а на відстані  $(R - x)$ , де  $x$  – це шлях, який уже пролетів м'яч. Але потенціальна енергія не зникає, вона перетворюється на кінетичну.





Якщо, впускаючи м'яч, ми не надамо йому ніякого поштовху, його початкова швидкість буде нульовою, як нульовою буде й початкова кінетична енергія, але вона поступово разом зі швидкістю зростатиме.

Кожної миті вона буде:

$$E_{\text{пов}} + E_{\text{кин}} = E_{\text{пов}} = mgR = \text{const}.$$

Величини  $m$ ,  $g$  та  $R$  фіксовані, це числа, а  $E_{\text{пов}} = mgR$  – вся енергія, яку має м'яч. Вона матиме однакову енергію упродовж усього польоту, попри те, що в кожній точці змінюватиметься її кінетична (швидкість зростає) та потенціальна енергії (відстань до центра Землі зменшується). Сума енергій буде завжди стала і дорівнюватиме тій, яку м'яч мав на початку. У кожній точці вона дорівнюватиме:

$$mg(R-x) + \frac{1}{2}mv^2 = mgR.$$

Спростивши масу, наявну в усіх складниках виразу, ми матимемо:

$$g(R-x) + \frac{1}{2}v^2 = gR,$$

де  $x$  – пройдений шлях, який змінюється залежно від точки заміру і зменшує потенціальну енергію, а  $v$ , швидкість м'яча, постійно зростає.

Все відбувається доти, поки м'яч не досягне центра Землі.

Що ж буде там?

Тоді відстань, яку пройшов м'яч, дорівнюватиме  $R$  радіусові Землі, і потенціальна енергія дорівнюватиме нулеві:

$$g(R-R) + \frac{1}{2}v^2 = gR,$$

$$0 + \frac{1}{2}v^2 = gR,$$

$$\frac{1}{2}v^2 = gR,$$

$$v^2 = 2gR.$$

Такою буде швидкість у центрі Землі, його максимальна швидкість.

Гаразд, а що тепер?

Наш м'яч утратив всю свою потенціальну енергію й повністю перетворив її на кінетичну. Він прибуває до центра Землі з максимальною швидкістю, а далі?

Продовжуватиме свій рух, віддаляючись від центра Землі у протилежному напрямку.

При цьому віддаленні, однак, він збільшить свою потенціальну енергію й ... зменшить кінетичну!



$$gx + \frac{1}{2}v^2 = gR.$$

Тепер зі збільшення  $x$  (відстань від центра) збільшуватиметься потенціальна енергія й зменшуватиметься кінетична (а отже, й швидкість), так що сума енергій залишатиметься сталою й дорівнюватиме початковій.

Це відбуватиметься доти, поки м'яч не долетить до протилежного краю Землі, коли він знову пройде відстань  $R$ , перетворивши всю свою кінетичну енергію на потенціальну. М'яч досягне протилежного краю Землі зі швидкістю нуль, але з усім запасом своєї потенціальної енергії.

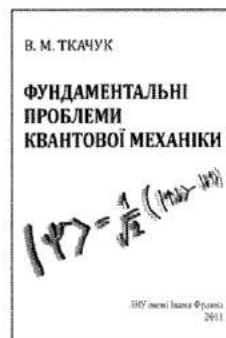
Якщо ніхто його там не займатиме, він знову впаде в дірку й почне таку ж саму подорож. Він літатиме туди-сюди від одного краю Землі до іншого вічно, тобто поводитиметься точнісінько як маятник.”



**Ткачук В. М. Фундаментальні проблеми квантової механіки.** – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2011. – 144 с.

Посібник містить дев'ять розділів: “Математичні основи квантової механіки”, “Двостанові квантові системи”, “Квантові комунікації”, “Квантові обчислення та квантові комп’ютери”, “Вимірювання у квантовій механіці”, “Геометрія простору квантових станів”, “Еволюція квантової системи”, “Декогеренція”, “Операторні тотожності та середні значення функцій від бозонних операторів”. Посібник присвячено фундаментальним проблемам квантової механіки, його можна розглядати як доповнення до традиційних підручників з квантової механіки.

Для студентів, аспірантів фізико-математичних спеціальностей університетів, викладачів і науковців.



## РЕЗОНАНСИ

### Асоціації та афоризми

з колекції  
проф. Ярослава Довгого



### ДЕСЯТЬ ІРОНІЗМІВ

1. **Постать ученого** ))))))) ■
  - Як уявляється нині образ ученого?
  - Вони різні – “чиновник”, “лектор”, “самітник”, “менеджер”, “хитрун”, “поп-учений”,...
2. **“Патологічні” праці** ))))))) ■
  - Епігонські наукові праці Ландау колись називав “патологічними”.
3. **Імітатор** ))))))) ■
  - Що робить цей високооплачуваний науковець?
  - О, він вправно вигадує назви для конкурсних проєктів.
4. **Неуки** ))))))) ■
  - Усі ми неуки, тільки кожен в іншій галузі.
5. **“Круглий квадрат”** ))))))) ■
  - Деякі його “наукові дефініції” звучать на кшталт “круглий квадрат”.
6. **Шість відсотків** ))))))) ■
  - Професоре, скажіть, скільки людей працює у вашому інституті?
  - Гадаю, відсотків шість.
7. **Добре забудьте старе** ))))))) ■
  - Ви читали мою статтю? – запитує професора його аспірант.
  - Читав, голубчику, читав... Вас тоді ще на світі не було!
8. **Відповідь внучки** ))))))) ■
  - У чому тепер полягає науково-пошукова діяльність професора? – запитали у його внучки.
  - Головно у пошуках своїх окулярів...
9. **Відкриття** ))))))) ■
  - Доцент Z зробив відкриття. Яке ж?
  - Відкрив приватне кафе.
10. **Краще не скажеш** ))))))) ■
  - Коли бачиш рівняння  $E = mc^2$ , стає соромно за свою балакучість.

Станіслав Єжи Лець





**Іоанн Георг Пінзель**  
(1707–1761)

Скульптор Іоанн Георг Пінзель жив і творив у XVIII ст. у провінційному містечку Бучачі на Тернопільщині. Припускають, що народився він 1707 року, саме тому три західні області – Івано-Франківська, Львівська й Тернопільська – оголосили 2007-й Роком Іоанна Пінзеля.

Ініціатором створення музею І. Пінзеля був директор Львівської картинної галереї, герой України Борис Возницький. Він упродовж багатьох років доклав чимало зусиль, щоб врятувати не один твір майстра. Деколи шедеври знаходили під шаром вапна або в напівзруйнованих церквах.

Нині відомо 62 твори, з них 40 – у Львівській галереї мистецтв, 15 – у Тернопільському краєзнавчому й шість – в Івано-Франківському художньому музеї.

Про життя та творчість І. Пінзеля відомо небагато. Досі не встановлено, звідки він родом, як опинився на Поділлі, на околиці Речі Посполитої. Залишається загадкою, де й коли він помер. Проте його ставлять поряд з визначними європейськими майстрами епохи бароко Матея Брауна, Лоренцо Берніні, Мікеланджело.

Уперше про Пінзеля згадується у книжці витрат за 1750–1778 рр., яку знайдено 1906 року. У ній написано, що авторові скульптури Св. Георгія Змієборця, що встановлена на аттику собору Св. Юра у Львові, й постатей Леона й Танасія виплачено майже 37 тисяч золотих, до того ж остаточний розрахунок провадився з вдовою Пінзеля.

У середині 1740-х років він з'явився при дворі магната Миколи Василя Потоцького, який став його головним замовником і патроном. При дворі графа були організовані фабрики, де жили й працювали відомі європейські скульптори й художники. Там майстри навчали підмайстрів і творили самі. Разом з архітектором Бернардом Меретином Пінзель працював над спорудженням ратуші в Бучачі, церкви в м. Монастирська (нині райцентр Тернопільської області), храму в с. Годовиця й собору Св. Юра у Львівській області.

13 травня 1751 року Пінзель одружився у Бучачі із вдовою Маріанною Єлизаветою Кейтовою з родини Маєвських. Від цього шлюбу мав двох синів – Бернарда та Антона.

Приблизний рік смерті Іоанна Пінзеля – кінець 1761 року.

Нині планують провести виставку робіт Пінзеля у Луврі (Париж).