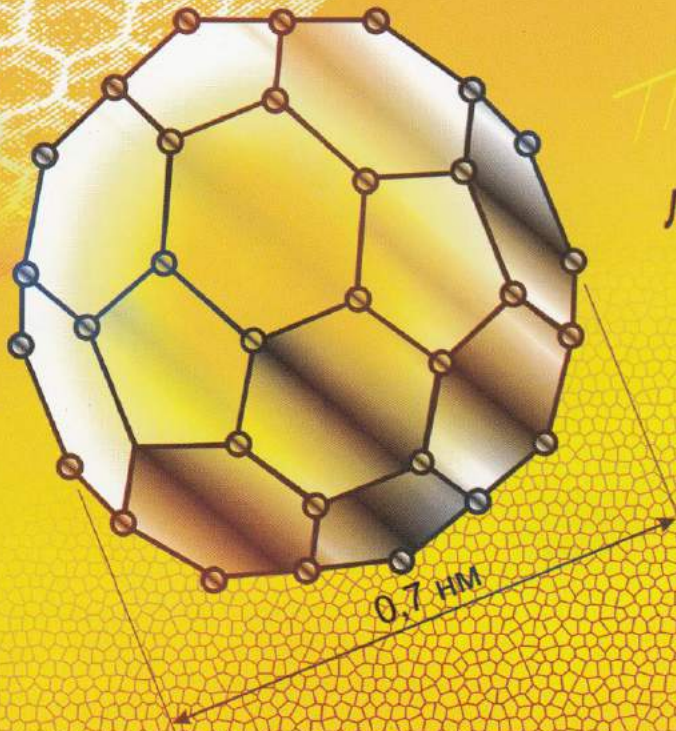
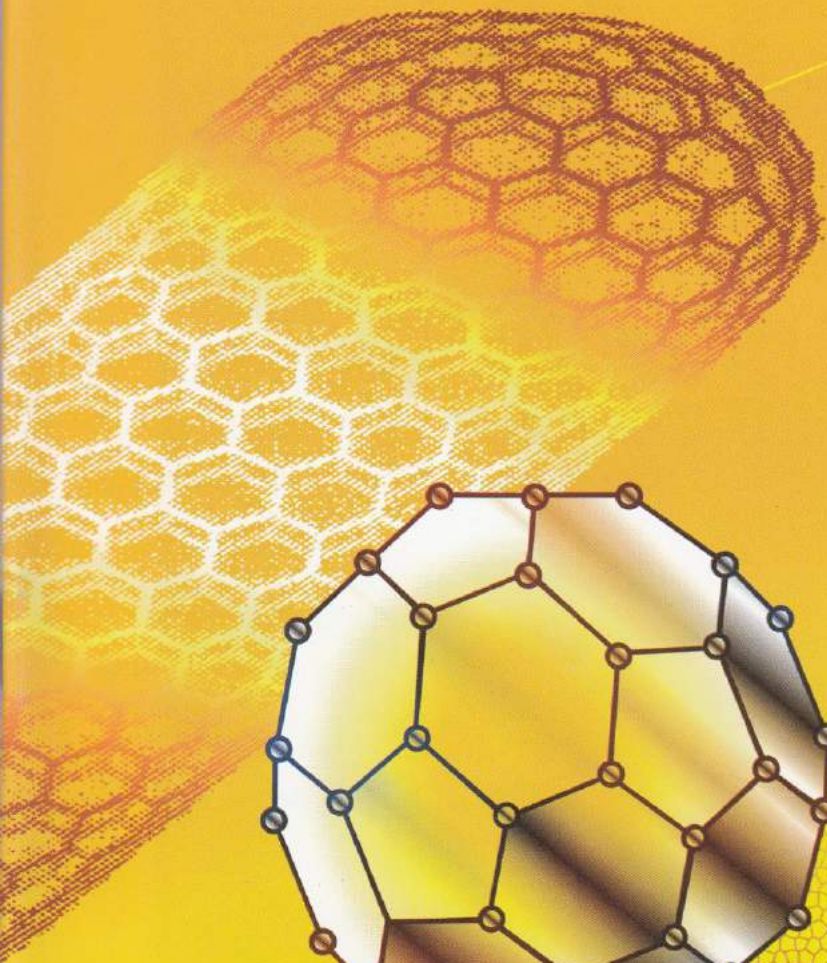


# С В І Т

# Фізики

№3  
2003

науково-популярний журнал



поверхня

атом

Людство опановує  
наносвіт

Українській фізичній олімпіаді – 40 років!



(1953–2003)

Фізичному факультетові  
Львівського національного  
університету  
імені Івана Франка

50  
років



**Випускники фізичного факультету біля  
пам'ятника Івана Франка у Львові  
(7 жовтня 2003 року)**

Детальніше про історію фізичного факультету Львівського національного університету,  
здобутки та його науковців читайте в наступних числах журналу „Світ фізики”

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:

**О. Біланюк**

**М. Бродин**

**П. Голод**

**С. Гончаренко**

**Я. Довгий**

**І. Климишин**

**Ю. Ключковський**

**Б. Лукіянець**

**Ю. Ранюк**

**Й. Стахіра**

**Р. Федорів**

**Я. Яцків**

Художник **Володимир Гавло**

Літературний редактор

**Мирослава Прихода**

Комп'ютерне макетування та друк

СП „Євросвіт”, наклад 1000 прим.

**Адреса редакції:**

редакція журналу „Світ фізики”

вул. Саксаганського, 1,

м. Львів 79005, Україна

тел. у Львові 380 (0322) 96 46 73

у Києві 380 (044) 416 60 68

sf@ktf.franko.lviv.ua; phworld@franko.lviv.ua

www.franko.lviv.ua/publish/phworld

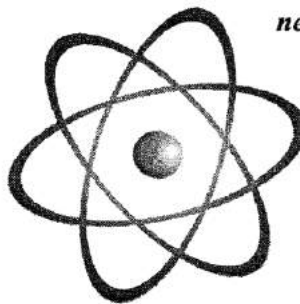
**Вчимося у корифеїв**

Кожний видатний дослідник прагне створити свою наукову школу. Це його найбільша заслуга. Школу не замінять ніякі підручники. Науковець передає своїм послідовникам не лише знання, а й дещо цінніше: спосіб мислення, відношення до праці й до самого себе, своє індивідуальне уявлення про мету науки. Найупертіше опрацювання книжок і статей не може залишити в душі такого сліду, як живе слово вчителя, що оточений в очах молоді ореолом мудрості й авторитету.

Академік Петро Капиця прививав студентам безкорисливу любов до фізики і безкомпромісну наукову чесність. Слухаючи лекції цього корифея, студенти починали розуміти, що фізика – не проміжна ланка між математикою і технікою, не синтез філософії і практичних знань, а ні на що не подібна, зовсім інша і прекрасна наука. Із студентів вони непомітно ставали фізиками.

Секрет дії Капиці полягав у тому, що він навчав поглибленому проникненню у механізм процесу і відкривав так для учнів новий світ. Він закликав не до формальних знань, а до розуміння явища, заставляв учнів ставати не свідками, а ніби бути учасниками фізичного явища...

*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 і маловідомі явища фізики

Наумовець Антон. Від нанофізики до нанотехнологій

## 2. Фізика світу

Шопа Галина, Гальчинський Олександр. Краса фізичного експерименту (До 150-річчя від дня народження Г. Камерлінга-Оннеса)

## 3. Фізика України

Шопа Галина. Творчість – його кредо (До 70-річчя від дня народження Я. Довгого)

## 4. Олімпіади, турніри...

Умови задач XII Всеукраїнського відкритого турніру юних фізиків 2003/2004 навчальних років  
Гончаренко Семен. Українській фізичній олімпіаді – 40 років

## 5. У допомогу абітурієнту

Орлянський Олег. Фізична задача і рисунок

## 6. Олімпіади, турніри...

Розв'язки задач IV етапу Всеукраїнської олімпіади з фізики 2003 р. (10–11 кл.)

## 7. Інформація

## 8. Гумор

3

15

19

22

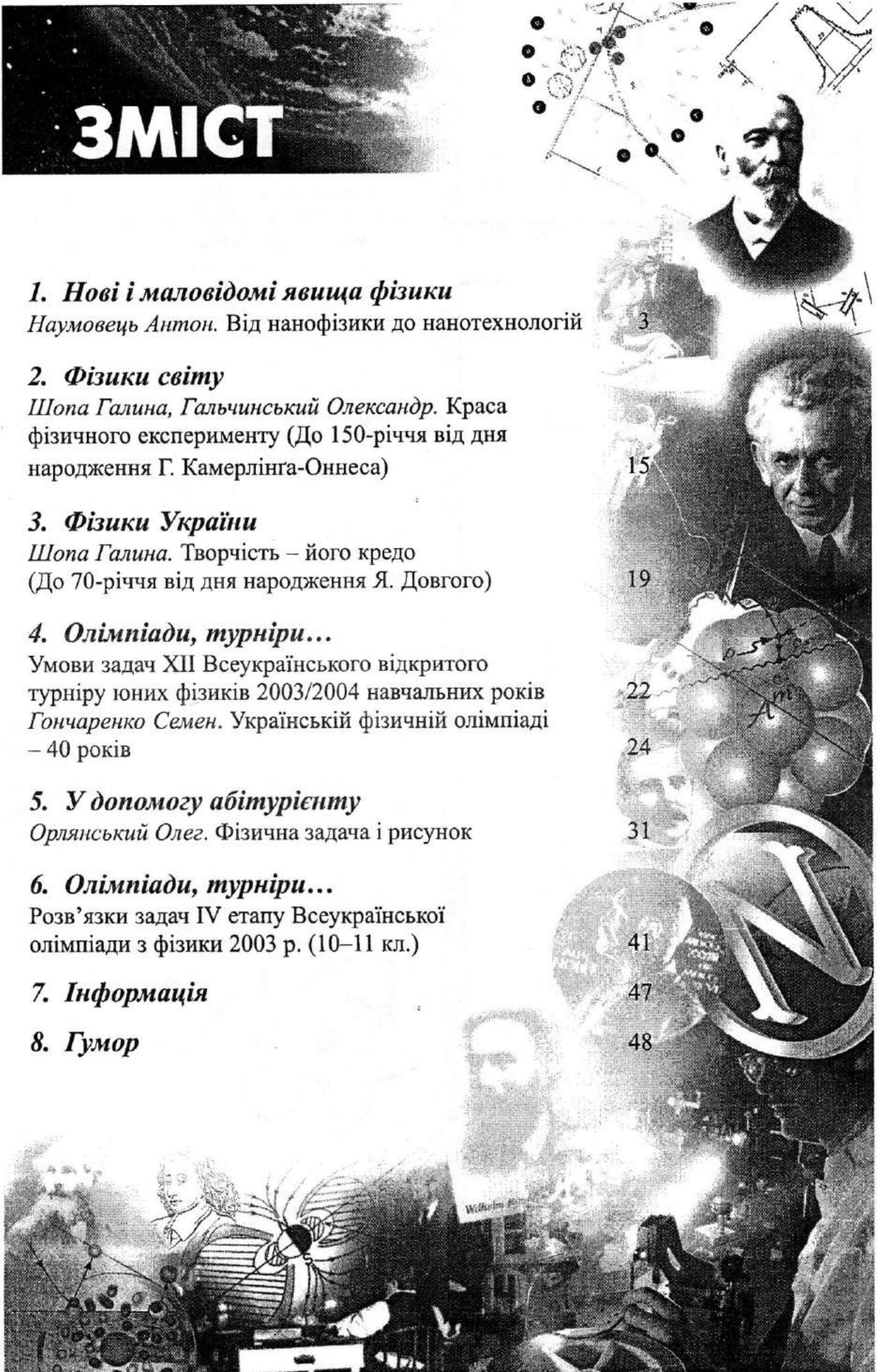
24

31

41

47

48





# ВІД НАНОФІЗИКИ ДО НАНОТЕХНОЛОГІЙ

Антон Наумовець,  
академік НАН України,

академік-секретар Відділення фізики і астрономії НАН України

У науці і техніці словом *нано* – від грецького *нанос* (*карлик*) – позначають одну мільярдну ( $10^{-9}$ ) частку чого-небудь. Наприклад, 1 нанометр (нм) – це  $10^{-9}$  метра. Коли говорять про *нанофізику*, то мають на увазі фізичні явища в об'єктах нанометрових розмірів. Неважко збагнути, що нанометр є довжиною атомних масштабів: ми отримуємо приблизно 1 нм, якщо візьмемо чотири атоми заліза і щільно вишикуємо їх по прямій лінії в ланцюжок. Відповідно, *нанотехнології* – це створення і застосування матеріалів, приладів і систем нанометрових масштабів. Фактично – це керування матерією на рівні окремих атомів чи невеликих груп атомів.

## Навіщо людству нанотехнології, і чому саме зараз?

Людині властиве прагнення до всього незвичайного, до пізнання таємничого, до того, щоб перемагати і ставити рекорди. Отже, виходячи з цих загальних міркувань, можна сказати, що саме людська допитливість й економічна конкуренція природним чином поставили нанофізику й нанотехнології на одне з чільних місць серед пріоритетів сучасного науково-технічного прогресу. Розгляньмо, наприклад, розвиток мікроелектроніки за останні десятиріччя. У 1959 році у США Джек Кілбі (фірма „Тексас Інструментс”) і Роберт Нойс (фірма „Фейрчайлд”) створили перші інтегральні електронні схеми. Це схеми, в яких транзистори та інші електронні елементи виготовляють одночасно зі з'єднувальними провідниками в єдиному технологічному процесі на одному напівпровідниковому кристалі. Це дало змогу відмовитися від традиційної трудомісткої технології монтажу, коли схеми виготовлялися шляхом спаювання виготовлених окремо елементів. Але головна перевага інтегральної технології полягала в тому, що вона відкрила широкі можливості для

того, щоб зробити електронні схеми мініатюрними. До речі, Джека Кілбі за цей винахід нагородили 2000 р. Нобелівською премією з фізики.

Перші інтегральні схеми містили десятки елементів, розмір яких був майже 1 мм. Далі прогрес мініатюризації пішов швидкими темпами і привів до виникнення нової технічної галузі – *мікроелектроніки*. Засновник фірми „Інтел” Гордон Мур 1965 р. вперше додумався побудувати в напівлогарифмічних координатах залежність кількості транзисторів на одній напівпровідниковій пластинці („чипі”), тобто в одній інтегральній схемі, від часу появи їх на ринку:  $\lg N = f(t)$ . Він одержав пряму лінію, кут нахилу якої до осі часу свідчив про те, що кількість транзисторів у схемах, які постачалися на ринок, приблизно подвоювалася за кожні півтора року. Ця залежність часто згадується у фаховій літературі як емпіричний „закон Мура”. Однак в останні роки підтримувати цей темп зростання стає дедалі важче.

Оскільки площа чіпа з технологічних причин залишається незмінною (майже квадратний сантиметр), то зрозуміло, що збільшення кількості транзисторів на чіпі можна досягти лише шляхом зменшення їхніх розмірів. На рис. 1 показано, як з роками зменшувався розмір транзисторів в інтегральних схемах. Бачимо, що в середині 1980-х років він досяг 1 мікрметра (тобто  $10^{-6}$ м), а отже після цього мікроелектроніка фактично перейшла вже в *субмікронну* область (латинською мовою *sub* означає *під*). Рис. 1 взято зі статті Д. Буа і Е. Розеншера, надрукованої у французькому журналі „La Recherche” 1988 р. Методом лінійної екстраполяції ці автори зробили прогноз на наступні роки, який зображений пунктирною лінією. У 2002 р. було випущено в продаж мікропроцесори з елементами вже розміром 0,13 мікрметра, тобто 130 нанометрів. Цей результат нанесений хрестиком (×) у нижній правій частині рис. 1. Як бачимо, поки



що прогноз Д. Буа і Е. Розеншера щодо розмірів транзисторів збувається. Слова 1 KILO, 1 MEGA

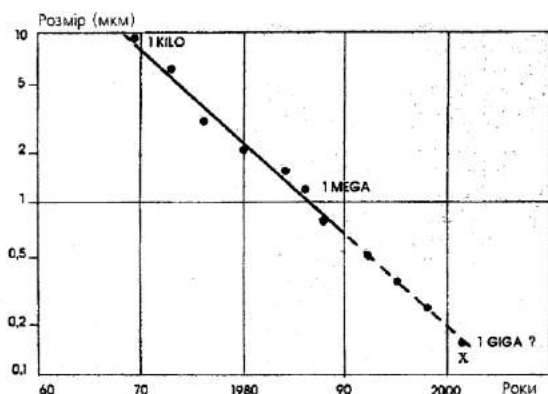


Рис. 1. Зменшення розміру транзисторів в інтегральних електронних схемах з часом (графік, побудований Д. Буа і Е. Розеншером)

і 1 GIGA, що стоять біля прямої, означають кількість транзисторів на чіпі, або так званий ступінь інтеграції схем – відповідно  $10^3$ ,  $10^6$  і  $10^9$ . Вона сьогодні досягла десятків мільйонів ( $\sim 10^7$ ), а це ще досить далеко до цифри  $\sim 10^9$  (=1 GIGA), що передбачалася на 2002 р. Зараз вона прогнозується на 2007 рік. Відчувається, що просуватися традиційними технологіями до ще менших масштабів стає все важче. Справа не лише в наростанні технологічних труднощів, а й в існуванні фізичних обмежень на те, щоб в *наносвіті* можна було конструювати електронні прилади на досі застосовуваних принципах. Зробимо ще одне термінологічне зауваження: фахівці домовилися, щоб зараз поки що називати *нанооб'єктами* такі, у яких хоча б один розмір (товщина, або висота, або довжина і т.д.) не перевищує 100 нм. З часом цей критерій, мабуть, ставатиме жорсткішим.

### Коли менше стає інакшим

Розгляньмо на дуже простому прикладі, а саме на прикладі електричного опору, чому в *наносвіті* речовини мають інші властивості, ніж у звичному нам *макросвіті*, який людина спостерігає неозброєним оком. Закон Ома стверджує, що струм у провіднику пропорційний прикладеній до нього напрузі й обернено пропорційний опору провідника:  $I = U/R$ . Якщо ми хочемо розрахувати опір

деякого провідника, що має довжину  $L$  і площу перерізу  $S$ , то користуємося відомою формулою:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Очевидно, що опір  $R$  тим більший, чим більша довжина і чим менша площа перерізу провідника. У цій формулі є також коефіцієнт  $\rho$ , який називається питомим опором і характеризує фізичні властивості матеріалу: це опір провідника, що має одиничну довжину й одиничну площу перерізу (скажімо,  $L = 1$  см і  $S = 1$  см<sup>2</sup>).

Будь-яка фізична величина, зокрема й питомий опір, визначається деякими фізичними явищами. Конкретно, величина  $\rho$  визначається рухом електронів у твердому тілі. Рухаючися в об'ємі твердого тіла, електрони розсіюються на дефектах, якими є різного роду недосконалість кристалічної ґратки, теплові коливання атомів (фонони) і домішкові („чужорідні“) атоми. Тому електрони рухаються не прямолінійно, а змінюють свою траєкторію подібно до руху броунівської частинки, який можна спостерігати за допомогою мікроскопа. Коли до провідника прикладено напругу, електрони розганяються в електричному полі і під час кожного зіткнення з атомами передають їм частку своєї кінетичної енергії, внаслідок чого провідник розігрівається. Дуже важливою характеристикою цього руху є довжина вільного пробігу, тобто довжина лінії, вздовж якої рухається електрон від одного зіткнення до другого.

Користуючись наведеною вище формулою, спробуємо визначити питомий опір експериментально, вимірюючи  $R$ ,  $L$  і  $S$  на зразках, що зроблені з одного й того ж матеріалу, але мають різні розміри – скажімо, різну товщину (рис. 2). Зробивши такі вимірювання, ми переконаємося, що доти, поки товщина досліджуваного зразка не стає меншою від довжини вільного пробігу електронів, величина  $\rho$  залишається незмінною. Однак при ще меншій товщині питомий опір зразка починає залежати від його розмірів. Це пов'язане з тим, що в цьому випадку електрони розсіюються переважно вже не в об'ємі, а на поверхні зразка, тобто їхній вільний пробіг визначається вже товщиною зразка. При кімнатній температурі це спостерігається при товщинах нанометрового масштабу.

Це – один з прикладів так званих *розмірних ефектів*. Їх є багато, і вони спостерігаються що-



разу, коли розмір зразка менший від деякого фізичного параметру, що має розмірність довжини. Адже будь-яке фізичне явище має певний притаманний йому геометричний масштаб. Як ми говорили вище, для електропровідності – це довжина

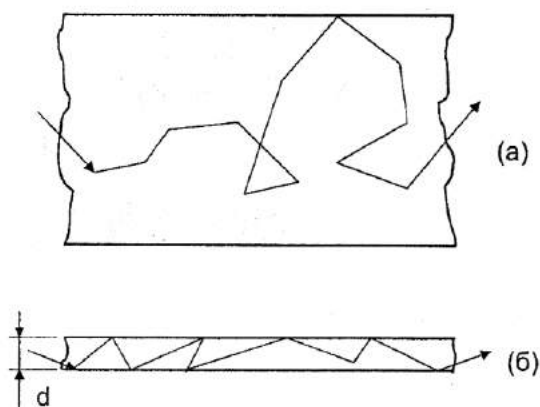


Рис. 2. Розсіювання електронів у масивному твердому тілі (а) і в тонкій плівці (б)

вільного пробігу електронів. Назвемо ще деякі приклади. Відомо, що електричне поле не проникає глибоко в провідники (воно екранується електронами, що зміщуються під дією поля). Довжину, на якій воно зменшується в  $e = 2,718\dots$  разів, називають довжиною екранування електричного поля. Також є дуже багато явищ, розглядаючи які, потрібно враховувати хвильову природу електронів. У них найважливішим параметром є довжина хвилі де Бройля електрона ( $\lambda_{\text{дБ}}$ ). Коли розмір зразка стає майже  $\lambda_{\text{дБ}}$ , то в ньому на повну силу проявляються квантові ефекти – утворюються стоячі чи біжучі електронні хвилі. Приклади таких об'єктів зображені на рис. 3. Якщо вставити тонкий (завтовшки  $\sim \lambda_{\text{дБ}}$ ) шар чужорідної речовини в тверде тіло, то матимемо деякий плоский (з фізичної точки зору – двовимірний) об'єкт (рис. 3, в). Провідник завтовшки  $\sim \lambda_{\text{дБ}}$  є вже лінійним (одновимірним) фізичним об'єктом – фактично, хвилеводом електронних хвиль (рис. 3, б). Коли ж розглядають частинку речовини, що вздовж усіх трьох координат має розмір  $\sim \lambda_{\text{дБ}}$ , то говорять про нуль-вимірний об'єкт, або так звану квантову точку (рис. 3, а). Вона є резонатором для електронних хвиль і фактично є деяким штучним атомом. Свій характерний масштаб існує також для магнітних, оптичних й інших фізичних явищ.

Отже, коли розміри фізичного об'єкта стають меншими за ту або іншу характеристичну довжину, його властивості суттєво змінюються. Можна навіть сказати, що ми отримуємо зовсім новий

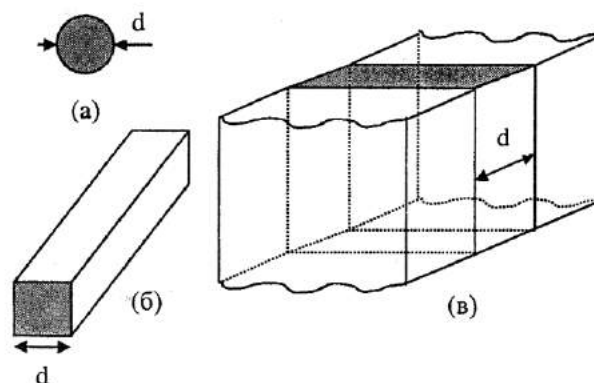


Рис. 3. Квантові точки (а), провідники (б) і ями (в)

об'єкт. Фактично саме розмірні ефекти лежать в основі багатьох нанотехнологій, які зараз розробляються швидкими темпами. Крім тих явищ, які ми розглядали вище, є ще чисто геометричний наслідок зменшення розмірів: чим менший об'єкт, тим більша частина його атомів перебуває на поверхні. Справді, кількість поверхневих атомів на кульці з радіусом  $r$  пропорційна  $r^2$ , а об'ємних – пропорційна  $r^3$ . Отже, відношення цих кількостей пропорційне  $r^2/r^3 = 1/r$ . Припустимо, що радіус атомів, з яких побудовано цю кульку, дорівнює 0,13 нанометра (приблизно такий радіус мають атоми багатьох металів). Припустимо також, що атоми в кульці щільно упаковані. Тоді неважко оцінити, що частка поверхневих атомів становить майже 30%, коли в кульці 2000 атомів, і майже 90%, коли в ній 13 атомів. Отже, якщо речовина складається з дрібних частинок (як кажуть фахівці, *перебуває в дисперсному стані*), то сумарна площа поверхні частинок з розрахунку на одиницю маси речовини може бути величезною. Наприклад, 1 грам порошку, який складається з *наночастинок*, має загальну площу поверхні майже таку ж, як ціле футбольне поле.

Чому такі частинки і порошки цікавлять дослідників і технологів? А справа в тому, що поверхневі атоми мають менше сусідів, ніж атоми в об'ємі, внаслідок чого залишається ненасиченою значна частка їхніх валентних зв'язків. Ненаси-



чений валентний зв'язок можна уявити собі як деякий виступ на електронній оболонці атома. Отже, маленька частинка речовини дещо нагадує їжачка, якій згорнувся і виставив назовні свої голочки. Внаслідок наявності на поверхні ненасичених валентностей на ній легко зв'язуються (*адсорбуються*) різні атоми і молекули. Завдяки цій властивості наночастинки широко використовуються як поглиначі шкідливих (зокрема, отруйних) речовин і як каталізатори, тобто прискорювачі хімічних реакцій.

### Розмірні ефекти в транзисторах

Як зображено на рис. 1, розмір транзисторів у інтегральних мікросхемах зменшився за 30 років від 10 мкм майже до 0,1 мкм = 100 нм, тобто в 100 разів. Якщо цей тріумфальний поступ мініатюризації продовжиться, то невдовзі розмір транзисторів має перейти в нанометрову область (< 100 нм). Чи можна сподіватися на те, що в цій області достатньо буде зменшувати тільки розмір, а сам принцип дії транзисторів можна залишати таким, як в існуючих мікросхемах? На жаль, це неможливо.

Розгляньмо причини цього на прикладі польового транзистора, який широко застосовується в комп'ютерах, електронних годинниках й інших популярних пристроях. Польовий транзистор винайшов ще у 1920-тих роках Юліус Лілієнфельд, який, до речі, народився у Львові, дістав вищу освіту і працював у Німеччині, а згодом – у США. Принцип дії польового транзистора дуже простий (рис. 4). Беруть кремнієву пластинку-підкладку з певними домішками, які надають їй достатню електропровідність. Наприклад, це може бути так звана *p*-провідність, при якій електричний струм переноситься *дірками*, тобто вакансіями („порожніми місцями”) в електронних оболонках атомів. На цій пластинці утворюють (шляхом введення інших домішок) дві області з так званою *n*-провідністю, при якій носіями струму виступають вже електрони. До цих областей, одна з них називається *витоком*, а друга – *стоком*, приєднують контакти. На проміжок між витоком і стоком наносять плівку ізолятора – окису кремнію, а на нього – металевий електрод, який називають *затвором*. Коли на затвор не подано жодного потенціалу або подано незначний позитивний потенціал, електронів між витоком і стоком майже немає й

опір цього проміжку є дуже великим. Коли ж позитивний потенціал на затворі перевищує деяку порогову величину  $V_n$  (звичайно це величина порядку 1 В), електрони підтягуються до затвора й

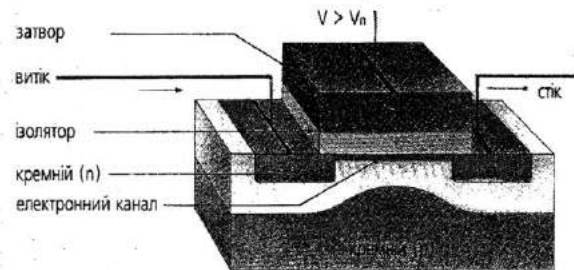


Рис. 4. Конструкція польового транзистора. Проілюстрований випадок, коли транзистор перебуває в провідному стані

утворюють провідний канал, по якому протікає струм між витоком і стоком. Саме таку ситуацію показано на рис. 4. Зазначмо, що з міркувань зручності в схемах звичайно виготовляються пари симетричних польових транзисторів – типу *n-p-n*, який ми розглянули, і *p-n-p*. Очевидно, що два різні стани транзисторів можна поставити у відповідність числам 0 і 1, а отже, маючи деяку кількість транзисторів, можна записувати інформацію у двійковому коді і будувати логічні схеми для її опрацювання.

Що ж стає на перешкоді до того, щоб робити дедалі менші польові транзистори? Виявляється, це вже знайомі нам розмірні ефекти. Найсуттєвіший з них у цьому випадку пов'язаний з довжиною екранування електричного поля. Річ у тому, що у реальному напівпровіднику не буває таких різких меж між областями з різним типом провідності, як це схематично зображено на рис. 4. Скажімо, концентрація електронів на межі *n*-області може зменшитись до деякої малої величини лише на відстані порядку довжини екранування електричного поля, яка сягає десятків, а то й сотні нанометрів (цю область називають областю екранування). Отже, якщо ми намагатимемось зробити відстань між витоком і стоком меншою від цієї величини, то їхні області екранування перекриються. При цьому між витоком і стоком постійно існуватиме провідна ділянка, незалежно від потенціалу на затворі, тобто наш транзистор пере-





стане працювати. Звичайно, можна намагатися зменшити саму довжину екранування. Для цього треба або зменшити температуру, що ускладнить конструкцію приладів і користування ними, або збільшити концентрацію носіїв струму (електронів чи дірок). Однак у такому випадку напівпровідник наблизитиметься за своїми характеристиками до металу і знову ж таки – вже з цієї причини – проміжок між витокон і стоком знову виявиться провідним, тобто стане некерованим.

Завдяки цьому розмір традиційних транзисторів можна зменшити лише до десятків нанометрів. Так, американські фахівці, що складають так званий міжнародний технологічний дороговказ для напівпровідників (International Technology Roadmap for Semiconductors – ITRS), передбачають на 2016 рік можливість створення елементів інтегральних схем розміром 23 нм. На 2006 рік цей розмір прогнозується на рівні 70–100 нм.

Якщо ж ми хочемо сконструювати ще менші перемикачі, то треба шукати інші фізичні принципи для їхньої дії. Є ще й інші фізичні обмеження на мініатюризацію транзисторів – тунелювання електронів крізь плівку окису під затвором, руйнування з'єднувальних провідників у схемі внаслідок так званої електроміграції атомів металу під дією постійного струму та ін. Усі вони приводять до одного висновку: потрібно глибше вивчати поведінку речовини у нанометрових масштабах, і тільки на цих засадах можна будувати нові прилади. Отже, перехід до нанорозмірів – це не просто геометричне зменшення масштабів, а ще й перехід до інших фізичних закономірностей.

### Як людина заглядає в наносвіт

У цій статті ми не маємо змоги детально розповісти про всі методи досліджень нанооб'єктів, які сьогодні застосовуються, але на одному з них варто зупинитись. Це сканувальна тунельна мікроскопія (СТМ), винайдена майже 20 років тому у Швейцарії Г. Біннігом і Г. Рорером (1986 року вони отримали за її розроблення Нобелівську премію). Сканувальний тунельний мікроскоп вартий того, щоб усі знали про нього. Адже він дає змогу не лише бачити окремі атоми і молекули (як кажуть фізики, розглядати об'єкт з атомним розділенням), а й розставляти їх на поверхні у потрібному порядку – скажімо, викласти з окремих ато-

мів деяке слово, зображення чи, в принципі, навіть змонтувати деяку електронну схему.

Головним робочим інструментом – зондом, за допомогою якого й одержується зображення в цьому чудовому приладі, є гостра металева голочка, або *вістря*. Експериментатори вміють виготовляти дуже тонкі вістря, хоча, в принципі, вістря для СТМ можна зробити навіть на звичайному точилі. Головне, щоб вістря мало на своєму кінчику невеличку групу атомів, які, власне, і зондують поверхню. Другою важливою частиною СТМ є п'єзоелектрична сканувальна система, на якій закріплюється вістря (рис. 5). П'єзоелектрик – це тверде тіло, в кристалічній ґратці якого атоми розташовані в такий спосіб, що під час стискання або розтягування тіла на його кінцях випливають електричні заряди протилежного знаку. Це явище має безліч застосувань, серед яких є всім знайомий пристрій – п'єзоелектрична запальничка. П'єзоелектричний ефект має і свого „дзеркального” двійника: а саме, якщо до кінців п'єзоелектричного стрижня прикласти електричну напругу, його довжина збільшиться або зменшиться – залежно від полярності напруги. Ця властивість і використовується для того, щоб переміщувати вістря в просторі з величезною точністю – порядку сотих часток нанометра! Отже, маючи систему з трьох стрижнів, яка зображена на рис. 5, можна контролювати рухати вістря вздовж усіх трьох координат. А тепер уявімо собі, що ми підвели

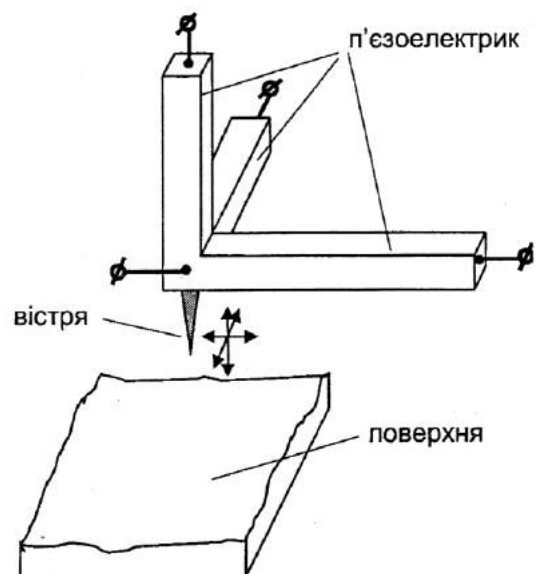


Рис. 5. Сканування вістря біля поверхні зразка за допомогою п'єзоелектричних стрижнів



вістря до поверхні на відстань  $\approx 0,1$  нм, тобто порядку діаметра атомів. При цьому вступає в дію так званий тунельний ефект: електрони, маючи хвильові властивості, досить вільно долають такий вузький ( $\sim \lambda_{\text{де}}$ ) проміжок між вістрям і поверхнею. Як говорять фізики, електрони *тунелюють* крізь потенціальний бар'єр, що розділяє вістря і поверхню. Приклавши невеличку ( $\sim 0,1$ – $1,0$  В) напругу між вістрям і досліджуванним зразком, ми отримаємо деякий тунельний струм, що надзвичайно сильно *зростає* зі зменшенням відстані вістря – поверхня. Саме ця залежність дає змогу отримувати зображення поверхні з атомним розділенням. Уявімо собі, що ми переміщуємо вістря вздовж поверхні (рис. 6). У положенні 1, безпосередньо над поверхневим атомом, відстань вістря – поверхня буде меншою, ніж у положенні 2, коли вістря розташоване над „долиною” між

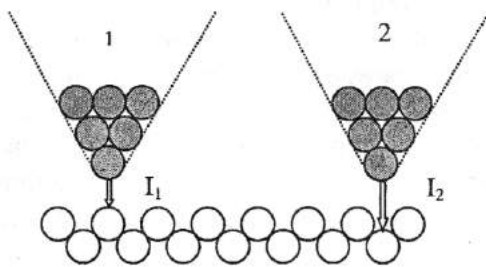


Рис. 6. Принцип дії сканувального тунельного мікроскопа (СТМ)

атомами. Відповідно струм у першому випадку буде набагато більшим, ніж у другому:  $I_1 \gg I_2$ . Вістря сканує поверхню приблизно так, як електронний промінь рухається по екрану телевізора, та інформація про тунельний струм у різних точках поверхні виводиться на дисплей. Так отримують зображення поверхні за допомогою СТМ. Приклад такого зображення показано на рис. 7.

### Атом до атому – виходить наноструктура

Розгляньмо, як за допомогою вістря можна розставляти на поверхні окремі атоми або молекули. Цей процес – *атомний монтаж* – певною мірою нагадує зведення будинку з окремих цеглин чи блоків, що кожен з нас напевно не раз спостерігав. Цеглу в потрібні місця муляри кладуть руками, а важкі блоки монтуються за допомогою будівельних кранів. Під час атомного монтажу всі операції

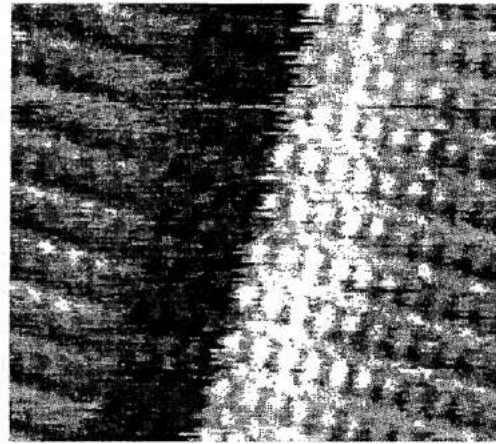


Рис. 7. Зображення молекул парафіну  $C_{33}H_{68}$  на поверхні золота, отримане за допомогою СТМ. Молекули виглядають як ланцюжки, що складаються із світлих кружечків – атомів. Довжина молекул становить майже 4 нм. (Світлина О.А. Марченка, отримана під час проведення спільних досліджень Інституту фізики НАН України і Дослідницького центру Сакле, Франція).

виконуються в СТМ за допомогою вістря. Щоб створити запас потрібного для атомного монтажу матеріалу, на поверхню („будівельний майданчик”) наносять деяку кількість речовини, з якої виготовлятимуть запроєктовану структуру. Для цього речовину розігрівають у спеціальному випаровувачі до високої температури, так що її атоми чи молекули випаплюються, летять у вакуумі та осідають на холодній поверхні, яка слугуватиме підкладкою для майбутньої структури.

Далі переходять безпосередньо до монтажу, використовуючи відоме всім явище електричної поляризації. Отримавши в СТМ зображення поверхні з атомним розділенням, до обраного на ній атома підводять вістря і прикладають дещо збільшену (порівняно з нормальним режимом роботи) різницю потенціалів між вістрям і підкладкою. У цьому електричному полі атом поляризується так, як зображено на рис. 8. Зверніть увагу: за законами електростатики поляризований атом буде завжди притягатися до вістря – незалежно від знаку потенціалу на вістрі. Подібний ефект легко спостерігати, якщо взяти пластмасову авторучку або гребінець, добре потерти їх об одяг (бажано з вмістом синтетики) і піднести до невеличкого шматочка паперу. Папірець поляризується і притягається до пластмасового предмета, заряджено-



го в процесі тертя. Отже, переміщуючи вістря вздовж поверхні, можна перетягти поляризований атом у потрібну точку і залишити його там, відвівши від нього вістря. Потім така ж операція здійснюється з другим і наступними атомами, аж поки не буде змонтована потрібна структура.

Отже, за допомогою СТМ вдалося реалізувати мрії фізиків про те, щоб навчитися виготовляти різні об'єкти, по чергово розставляючи окремі атоми у певному порядку. Ще років двадцять тому

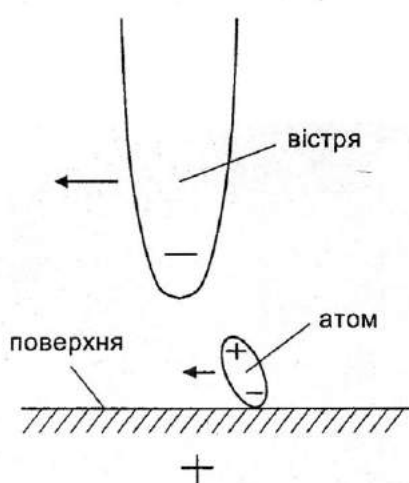


Рис. 8. Принцип атомного монтажу

подібні проекти видавалися нездійсненною фантастикою, а сьогодні цю технологію вже застосовують у багатьох лабораторіях світу.

### Складання наноструктур: створіть

#### належні умови, і природа зробить своє

Розглянутий у попередньому розділі атомний монтаж за допомогою СТМ дуже ефектно демонструє рівень сучасного експерименту і технології. На жаль, цей метод є дуже трудомістким і малопродуктивним. Виробники ж зацікавлені в тому, щоб навчитися виготовляти нанооб'єкти і наноструктури надійно, швидко, у великих кількостях і якомога дешевше. Мікроелектроніка задовольняє ці вимоги майже ідеально завдяки використанню методу фотолітографії. Цей метод заснований на тому, що спочатку на поверхню напівпровідникової пластини („чіпа”), покриту світлочутливим шаром, проектується зображення майбутньої інтегральної схеми. Далі це зображення про-

являють і за допомогою деякої послідовності технологічних операцій перетворюють у сукупність реальних транзисторів і інших елементів схеми. Важливо, що при такій технології одночасно виготовляється величезна кількість цих елементів. Це дало змогу досягти вражаючих успіхів у мікроелектроніці, про які вже йшлося вище. Досить сказати, що один транзистор у сучасній інтегральній схемі коштує дешевше, ніж одна літера в газетному тексті.

Для нанометрових масштабів подібних технологій поки що немає. Намагаючись їх розробити, дослідники звернули увагу на процеси так званої самоорганізації в природі, що знаходять особливо яскраві прояви в біології. Справді, при наявності потрібних умов – певної концентрації хімічних сполук, температури, електричного чи магнітного поля, а також градієнтів (неоднорідностей) цих величин – можуть утворюватись „самі собою” (фізики кажуть – *спонтанно*) впорядковані структури дивовижної краси і складності. Відбувається *утворення порядку з хаосу* – явище, що в останні десятиріччя викликає величезне зацікавлення у багатьох галузях науки. В його основі лежать взаємодії як між окремими частинками – атомами, молекулами, електронами, так і між їх колективами, а також складні процеси, що відбуваються в речовині в нерівноважних умовах. Ці закономірності вивчає *синергетика* – нова галузь науки, що недавно сформувалася і має надзвичайно широке коло застосувань не лише в усіх природничих, а й у суспільних науках.

Використовуючи ці ідеї, фахівці з нанофізики і нанотехнологій прагнуть знайти способи створення різних наноструктур шляхом *самоскладання* (російською мовою *самосборки*, англійською – *selfassembly*). Поки що таким методом вдалося одержати лише деякі найпростіші структури, однак потенційні можливості цього підходу, безсумнівно, дуже великі. Особливо великі надії покладають на нього розробники молекулярних електронних схем, в яких логічні операції мають виконувати окремі молекули. У 2002 р. вже з'явилося повідомлення про створення перших запам'ятовувачів, в яких перемикачами є спеціально синтезовані органічні молекули. Їх можливості ще дуже скромні (лише 64 біти), але реальний початок молекулярній електроніці вже покладено.



### Нанорозмірні форми вуглецю

Сьогодні розповідь про нанофізику і нанотехнології була б неповною, якби ми не сказали про нещодавно відкриті нові форми існування вуглецю: фуллерени і нанотрубки. Усім відомі такі форми існування вуглецю в конденсованому стані, як графіт і алмаз. Втім, науковці давно помітили, що атоми вуглецю, як і деяких інших елементів, охоче об'єднуються в молекули, які часто називають також кластерами (англійське слово *cluster* означає *група, гроно*). У 1985 р. Р. Смоллі, Р. Керл і Г. Крото відкрили молекулу  $C_{60}$ , яка має форму кулькоподібного багатогранника, побудованого з п'ятикутників і шестикутників (рис. 9). За це відкриття вони отримали Нобелівську премію з хімії 1996 р. Молекулу  $C_{60}$  було названо фуллереном на честь американського архітектора Б. Фуллера, який ще раніше запропонував будувати куполи такої конструкції. Вона має красиву симетричну форму, що відтворює форму футбольного м'яча, хоча її діаметр дорівнює всього 0,7 нм. Для одержання фуллеренів використовують електричну дугу, яку запалюють у спеціальній камері між двома графітовими електродами в атмосфері гелію. Атоми вуглецю, що випаровуються з електродів, досить довго „блукать” у цій атмосфері, багатократно зустрічаються один з одним, об'єднуються і таким чином утворюють молекули фуллерену й інші вуглецеві молекули, які врешті решт осідають на стінках камери. За своїм зовнішнім виглядом осад нічим не відрізняється від сажі. Молекули фулле-

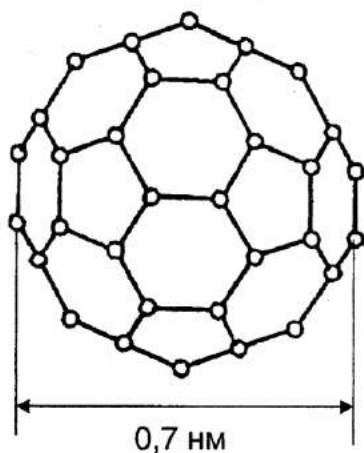


Рис. 9. Модель молекули фуллерену  $C_{60}$ . Маленькими кульками зображено атоми вуглецю. Діаметр молекули дорівнює 0,7 нанометра

рену можна виділити з осаду шляхом селективного (тобто вибіркового) розчинення. На рис. 10 показано зображення плівки цих молекул на поверхні золота, одержане за допомогою СТМ.

Згодом було синтезовано багато інших вуглецевих молекул такого ж типу, як  $C_{60}$ , але серед них вона є найбільш симетричною і стійкою. Її відкриття визнане важливим науковим досягненням ХХ сторіччя, яке до того ж проклало шлях до створення й інших принципово нових матеріалів.

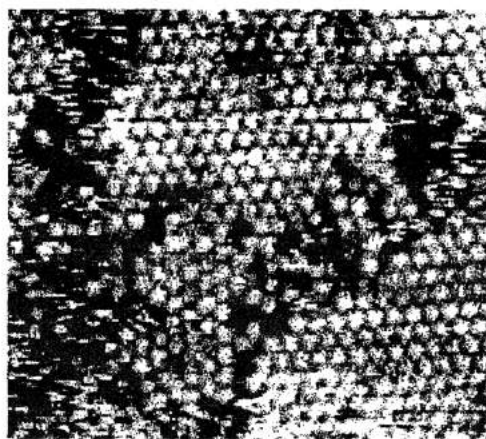


Рис. 10. Зображення плівки молекул фуллерену  $C_{60}$  на поверхні золота, отримане за допомогою СТМ.

Молекули виглядають як світлі кружечки.

Подекуди між молекулами існують незаповнені місця (вакансії), що виглядають як темні плямки.

Світлина О.А. Марченка

Зокрема, це переконливо продемонстрував японський дослідник С. Ідзідзіма, отримавши вперше, 1991 року, вуглець у формі трубки діаметром 1,4 нм, яку назвали нанотрубною (рис. 11). Стінка її має таку ж структуру, як атомні шари вуглецю, що утворюють графіт. За роки, що минули, в технології отримання і дослідженні нанотрубок досягнуто величезного прогресу. Застосовуючи каталітичний процес, зараз вже навчилися виготовляти нанотрубки завдовжки майже сантиметр. Їхня міцність на розрив може бути майже в 100 разів більша, ніж у сталі. Розроблено методи вирощування нанотрубок з відкритими і закритими кінцями, а також багатостінних нанотрубок, які складаються з багатьох вставлених один в одного концентричних циліндрів і мають зовнішній



діаметр 10–20 нанометрів. Отримано нанотрубки з властивостями металів і напівпровідників, і ці властивості вже почали використовувати для розробки нанoeлектронних приладів, – зокрема, перемикачів типу розглянутих вище польових транзисторів. Було також знайдено, що нанотрубка може бути чудовим джерелом елект-

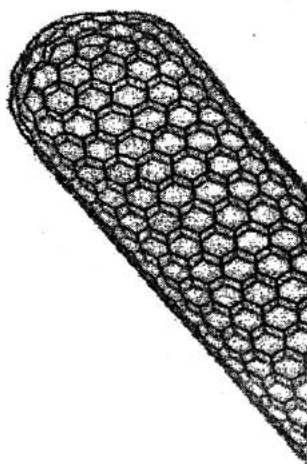


Рис. 11. Модель вуглецевої нанотрубки.  
Діаметр нанотрубки дорівнює 1,4 нанометра

ронів (емітером), якщо біля її кінчика створити сильне електричне поле, що дає змогу електронам виходити у вакуум завдяки тунельному ефекту (про цей ефект ми вже говорили вище, коли знайомилися з принципом дії СТМ). Такий емітер не вимагає розжарювання, а отже є дуже економічним. Зараз розробляють нове покоління люмінесцентних ламп з нанотручковими емітерами. Такі лампи не потрібно заповнювати ртуттю, а отже можна буде уникати шкоди, яку цей небезпечний метал може завдавати здоров'ю людей і довкіллю.

Зовсім недавно з'явилися повідомлення про те, що дослідники навчилися заповнювати порожнину в середині нанотрубок молекулами фуллерену і тим самим отримали ще один новий матеріал, який почали називати наностручками. Його властивості зараз інтенсивно вивчаються.

Немає сумніву, що в майбутньому перелік матеріалів на основі нанoформ вуглецю, а також коло їх застосувань значно розширяться. Пригадаймо з хімії, яка кількість органічних (так званих ароматичних) сполук утворюється з участю бен-

зольних кілець, що містять лише шість атомів вуглецю. Важко навіть уявити, скільки різних сполук може бути утворено фуллереном, який має 60 атомів вуглецю, і іншими подібними молекулами.

Важливо також, що відкриття нанoформ вуглецю стимулювало дослідників на "конструювання" аналогічних матеріалів з інших елементів. Наприклад, декілька років тому російський науковець з Новосибірська В.Я. Принц запропонував спосіб виготовлення нанотрубок, нанокілець, наноспіралей і нанооболонок різної форми не з вуглецю, а з германію, кремнію та інших хімічних сполук – таких, як арсеніди галію і індію. Ідея цієї технології проста і красива (рис. 12). Спочатку кристалічна напівпровідникова пластинка, що служить підкладкою, покривається тонким легкорозчинним шаром, який називається „жертвним шаром”. Далі на його поверхню послідовно наносяться ще два шари, які згодом і утворюють нанотрубку. Перший з них має більшу сталу кристаліч-

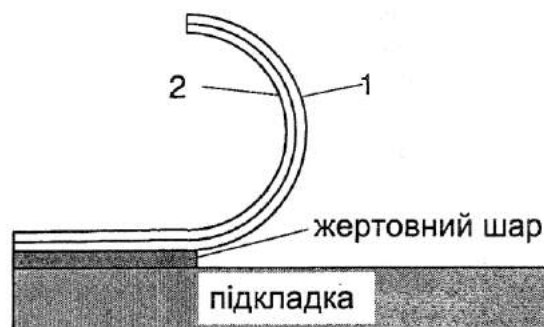


Рис. 12. Спосіб виготовлення нанотрубок з двошаровими стінками за „рулонною” технологією

ної ґратки, ніж другий. Це можуть бути, наприклад, германій і кремній, у яких стали ґратки відрізняються приблизно на 4%. Далі жертвний шар за допомогою хімічного процесу видаляється (звідси і походить його назва), а верхні два шари залишаються у вільному стані. В них існують сильні механічні напруження, оскільки перший з них (з більшою сталою ґратки) прагне розширитися, а другий – скоротитися. Завдяки цьому вони скручуються у трубку нанометрового діаметра. Зараз вже вміють виготовляти такі трубки завдовжки до декількох сантиметрів. Вони мають досконалу структуру і цікаві електронні властивості, дуже міцні і виявляють дивовижну хімічну стійкість. Поки що важко навіть перерахувати всі



їхні можливі застосування. Наведемо лише один приклад. Нанотрубки мають такий же діаметр, як трубки бактеріофагів, за допомогою яких ці пожирачі бактерій „пристикуються” до бактерій, впорскують у них свою ДНК і так знищують їх. Отже, можна передбачати, що невдовзі біологи та медики матимуть шприци з наноголками, які значно розширять можливості досліджень на рівні окремих клітин.

### Доробок України в розвитку нанофізики і нанотехнологій

Дослідження і напрацювання в галузі нанофізики і нанотехнологій розвиваються тепер у всьому світі гігантськими темпами. Взагалі, було б неправильно думати, що вивчення нанооб’єктів розпочалося лише зовсім недавно, – тоді, коли самі терміни *нанофізика*, *наноелектроніка*, *нанотехнології* увійшли до офіційного переліку наукових напрямів (це сталося років 10–15 тому). Насправді ще у 1920–30-ті роки і навіть раніше науковці досліджували адсорбовані на поверхнях твердих тіл і рідин *моношарові плівки*, тобто плівки завтовшки в один атом (або одну молекулу), і *колоїдні частинки* – дрібненькі частинки, завислі в рідинах або утворені в твердих тілах. Це, без сумніву, типові нанометрові об’єкти. В історії науки і техніки часто бувало, що початок широкого розвитку певної галузі ознаменовувався введенням нових звучних термінів. Так трапилося і з численними тепер *нанотермінами*.

В Україні першопрохідцями наукового напрямку, який тепер називають нанофізикою і нанотехнологіями, стали науковці, що досліджували поверхневі явища, електронну емісію і колоїдні системи ще у передвоєнні роки – передусім Н.Д. Моргуліс, П.Г. Борзяк, А.В. Думанський та їхні співпрацівники. Так, П.Г. Борзяк, досліджуючи фотоелектронні катоди, помітив, що срібло істотно змінює свої властивості, коли воно існує у вигляді колоїдних (тобто нанометрових) частинок. 1965 року він і його учні в Інституті фізики АН України О.Г. Сарбей і Р.Д. Федорович зробили важливе відкриття, яке стосується тонких плівок, що складаються з дрібних металічних острівців. З’ясувалося, що під час пропускання струму крізь таку плівку, наноострівці емітують (випромінюють) електрони і світло. На основі таких плівок були розроблені джерела електронів, які, зокрема, мо-

жуть застосовуватися у плоских дисплеях, що приходять на зміну традиційним кінескопам. Цей напрям плідно розробляється і нині.

Колективи науковців Інституту фізики та Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, а також Київського національного університету ім. Т. Шевченка успішно розвивають багаті традиції вивчення поверхневих явищ, які започаткували Н.Д. Моргуліс і В.І. Ляшенко. Слід зазначити, що саме ці явища, у дослідженні яких українським науковцям належить визнаний у світі доробок, покладені в основу багатьох нанотехнологій.

Нанооб’єктами є також і великі органічні молекули. З’ясування того, як уздовж них переносяться енергія і електричні заряди, має величезне значення для біології, медицини і молекулярної електроніки, яка є однією з галузей наноелектроніки (у ній функціональними елементами виступають окремі молекули). Видатні результати в цій галузі одержав О.С. Давидов в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України. Ці дослідження успішно продовжуються.

Плідно працюють у галузі нанотехнології і дослідження поверхні також деякі інші інститути НАН України і вищі навчальні заклади. Зокрема, широко відомий своїми працями з нанодисперсних матеріалів Інститут хімії поверхні в Києві, засновником і директором якого є О.О. Чуйко. Ці матеріали вже знаходять багато застосувань, особливо цінним є їхнє застосування в медицині. В цьому Інституті вміють також виготовляти один з найцікавіших нанооб’єктів – квантові точки (Ю.М. Козирев). В Інституті фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України під керівництвом В.Д. Походенка розробляється декілька оригінальних напрямів у нанотехнологіях. Наприклад, розроблені нові методи синтезу так званих молекулярних сит, які містять в собі впорядковані пори нанометрового розміру. Заповнюючи їх різними напівпровідниковими матеріалами, можна одержувати квантові точки і нитки. Виготовляються також різноманітні наноккомпозити (суміші з нанорозмірними складовими) з надзвичайно широким спектром корисних і притому керованих властивостей – електропровідних, оптичних, каталітичних та ін.

Наші фахівці беруть активну участь у взаємовигідній міжнародній співпраці з нанофізики, наноелектроніки і нанотехнологій, що дає змогу кожній стороні використовувати досвід, технічні



засоби і методи всіх країн-партнерів. Зокрема, уже декілька років реалізуються програми наших спільних досліджень у цій галузі з Росією і Німеччиною.

Наприклад, співробітниками Інститутів фізики напівпровідників у Києві і Новосибірську на основі нанотехнологій створені дуже чутливі фотоприймачі інфрачервоного діапазону для тепловізорів, що дозволяють бачити об'єкти в темноті (керівниками цієї роботи є Ф.Ф. Сизов і В.Н. Овсюк). Прилади такого типу можуть знайти широке застосування в медицині для діагностики захворювань, а у промисловості, будівництві і комунальному господарстві – для пошуку місць втрати тепла і т.ін.

Наступний приклад стосується нанотехнологій зміцнення матеріалів. Відомо, що міцність сильно залежить від розміру кристалічних зерен, з яких складаються полікристалічні матеріали (а саме вони найширше використовуються). Цим розміром можна керувати, – наприклад, піддаючи матеріал інтенсивній пластичній деформації. Донецький фізико-технічний інститут (ДФТІ) ім. О.О. Галкіна НАН України має значні досягнення в фізиці і технології високих тисків – зокрема, в обробці матеріалів шляхом екструзії, тобто продавлюванням їх крізь вузькі канали (фільери). Екструзія дозволяє суттєво зменшити розмір зерен. Виявилось, що особливо ефективно подрібнення зерен – аж до нанометрових розмірів – досягається при так званій гвинтовій екструзії. Її суть полягає в тому, що заготовку пропускають під високим тиском через гвинтовий канал постійного перерізу (рис. 13). Таку операцію повторюють декілька разів, поступово зменшуючи зерна. Після екструзії і відповідної термічної обробки міцність титану – одного з найважливіших матеріалів авіаційної і космічної техніки – підвищується майже вдвічі. Ці дослідження виконуються під керівництвом В.М. Варюхіна (ДФТІ) у співпраці з інститутами Російської академії наук.

Тут немає можливості навіть побіжно розповісти про всі результати нашого міжнародного співробітництва. Достатньо сказати, що разом з українськими науковцями в ньому беруть активну участь лауреат Нобелівської премії, академік Російської АН та іноземний член НАН України Ж.І. Алфьоров, деякі інші видатні фахівці Росії, Німеччини, Франції та інших країн.

### Погляньмо в майбутнє

Як бачимо, карликові частинки і матеріали, що з них складаються, а також карликові прилади викликають дедалі більше наукове зацікавлення і знаходять дедалі ширше практичне застосування. У наномасштабах фізичні закономірності змінюються, а матеріали набувають нових якостей. Вище ми говорили головним чином про техніку, про-

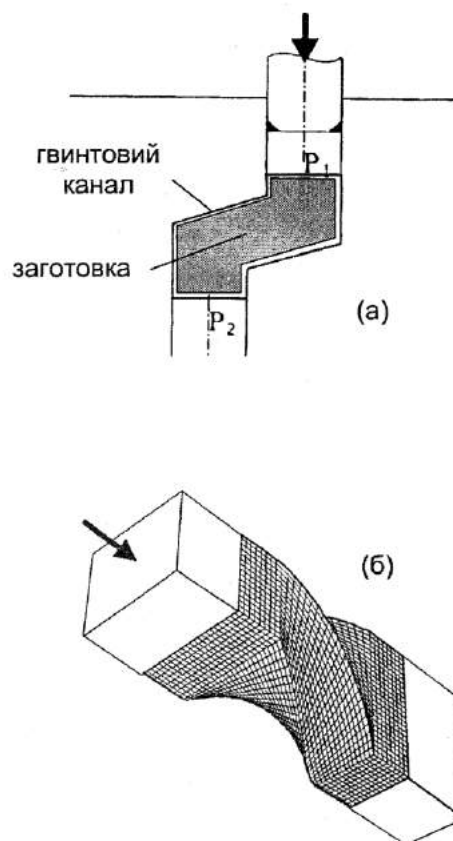


Рис. 13. Технологія гвинтової екструзії.  
(а) Продавлювання заготовки крізь гвинтовий канал постійного перерізу. (б) Характер деформації, якій піддається заготовка для подрібнення кристалічних зерен (Рисунок В.М. Варюхіна)

грес якої насправді вражає. Вже сьогодні для вмикання-вимикання транзистора потрібно всього лише 1000 електронів. Прогнозується, що у 2010 р. для виконання цієї операції буде достатньо 10–100 електронів, а у 2020 р. (а може й раніше) – тільки 1 електрон. Розробка *одноелектронних* транзисторів вже йде повним ходом.

Одночасно наночастинки починають дедалі ширше застосовувати в медицині. Наприклад, вони допомагають надійніше виявляти пухлини,



локально їх руйнувати, доносячи „прицільно” ліки в потрібні місця організму. Коли поверхні різних протезів покривають наночастинками, з'єднання протезів з кістками стає набагато міцнішим. Так звані ДНК-чіпи дають змогу майже миттєво робити найскладніші біохімічні аналізи, дуже оперативно оцінювати стан організму і навіть розпізнавати особу.

Наступні покоління наноелектронних і молекулярних приладів приведуть до нових революційних змін у телекомунікаціях, значно підвищать рівень безпеки на транспорті, дадуть змогу одержувати енергію з нових джерел і економніше її витратити. Багато сьогоденних школярів і студентів напевно захопляться цим перспективним науковим напрямом і братимуть активну участь у черговій науково-технічній революції, яка, будемо сподіватися, зробить життя людства розумнішим, заможнішим і здоровішим.

### Література

- Борзяк П.Г., Наумовець А.Г.** На шляху від „мікро” до „нано”. Вісник НАН України, 1993. № 1. С. 12–17.
- Д. Буа, Э. Розеншер,** Физические границы возможного в микроэлектронике, в сборнике „Физика за рубежом” А (Исследования) – М.: Мир, 1991. С. 93–119.
- Р.Е. Смолли, Р.Ф. Керл, Г. Крото,** Нобелевские лекции по химии – 1996 (об открытии фуллеренов). Успехи физ. наук, 1998. Т. 168. № 3. С. 323–358.
- Дж. С. Килби,** Возможное становится реальным: изобретение интегральных схем, Успехи физ. наук, 2002. Т. 172. № 9. С. 1102–1109.
- Журнал „Світ науки”,** 2001. № 5 (11). Спецвыпуск: Нанотехнології.
- Ж.И. Алферов,** Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии. Успехи физ. наук, 2002. Т. 172. № 9. С. 1068–1086.
- Журнал „Світ фізики”,** 2002. № 1 (17). С. 14–17.
- Інформація** про плани розвитку наноелектроніки в ФРН: <http://www.bmbf.de>



**Наумовець Антон Григорович** (нар. 2 січня 1936 р.) – академік Національної академії наук України, академік-секретар Відділення фізики і астрономії НАН України, відомий український учений у галузі фізичної електроніки і фізики поверхні, лауреат Державної премії СРСР, Державної премії України, Заслужений діяч науки і техніки України.

## НОБЕЛІВСЬКІ ЛАВРЕАТИ з фізики за 2003 рік

*Нобелівський комітет оголосив імена лавреатів премії 2003 року з фізики. Ними стали два російські науковці – співпрацівник ФІАН Олексій Абрикосов, який нині працює в Арагонській національній лабораторії (США) і фізик-теоретик Віталій Гінзбург. Третю частину премії отримав Ентоні Леггету із Іллінойського університету США за видатний внесок у розвиток теорії надпровідності і надтекучості.*

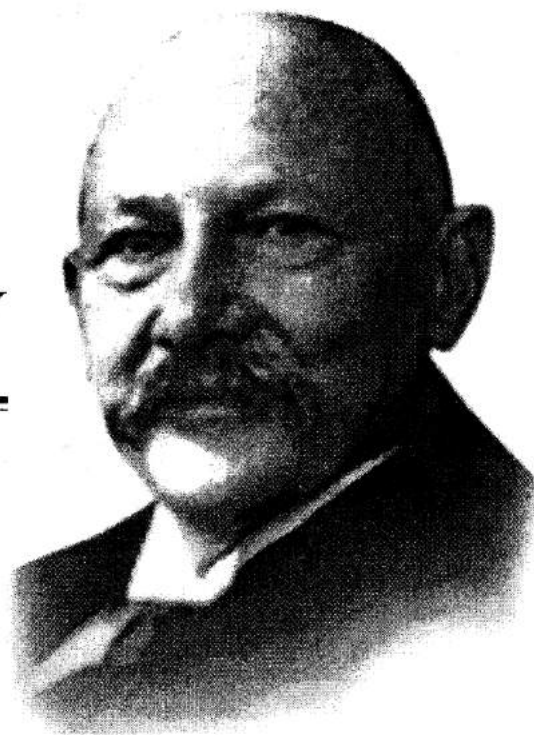
*У 1972 році за створення теорії надпровідності Нобелівську премію отримали Дж. Бардін, Л. Купер і Дж. Шриффер. Однак для пояснення надпровідності в надпровідниках другого роду, де надпровідні властивості зберігаються й після проникнення магнетного поля у матеріал, потрібно було розвинути теорію, що й зробив О.О. Абрикосов, з використанням низки положень теорії надпровідності Гінзбурга-Ландау, яку створили в 1950-х роках ХХ ст. для надпровідників першого роду, однак поширеній і на випадок надпровідників другого роду. Ентоні Леггет у 1970-х роках сформулював теорію, яка описує взаємодію атомів  $^3\text{He}$ , що приводить до зникнення в'язкості гелію при наднизьких температурах.*





# КРАСА ФІЗИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

*До 150-річчя від дня народження  
Г. Камерлінга-Оннеса*



Гейке Камерлінг-Оннес (Heike Kamerlingh-Onnes) народився 21 вересня 1853 року у Гронінгені на півночі Нідерландів. Його батько Харм Камерлінг-Оннес був власником цегельного заводу, мати, Анна Гердина Коерс – донькою архітектора.

Після закінчення школи Г. Камерлінг-Оннес 1870 року вступив до Гронінгенського університету, де вивчав математику і фізику. Ступінь бакалавра він отримав 1871 року. Три семестри Г. Камерлінг-Оннес навчався у Гайдельберзькому університеті (Німеччина), де його заняттями керували Роберт Бунзен і фізик Густав-Кірхгоф. Камерлінг-Оннес повернувся до Гронінгена 1873 року. За шість років він блискуче захистив докторську дисертацію, у якій запропонував нове доведення обертання Землі.

У 1878–1882 рр. Г. Камерлінг-Оннес читав лекції у Політехнічному училищі (згодом реорганізоване в Технічний університет) Дельфта. Увагу Камерлінга-Оннеса привернула теорія газів Ван-дер-Ваальса. Вона давала змогу враховувати відмінності у поведінці реальних та ідеальних газів. На той час Ван-дер-Ваальс викладав в Амстердамі, і Камерлінг-Оннес почав з ним листуватися щодо молекулярної теорії.

У 1882 р., у 29-річному віці, Г. Камерлінг-Оннес отримав призначення на посаду професора експериментальної фізики Лейденського університету й очолив фізичну лабораторію цього ж університету. У вступній лекції він виголосив прин-

цип, яким керувався упродовж сорока років своєї праці у Лейденському університеті: „Через вимірювання до знань”. На його думку фізичні лабораторії мають проводити кількісні вимірювання та якісні експерименти; теоретичний опис має підтверджуватись точними вимірюваннями.

За теорією Ван-дер-Ваальса усі гази ведуть себе однаково, якщо тиск, об’єм і температуру виразити через параметри критичного стану. Г. Камерлінг-Оннес розумів, що дослідження поведінки газів за низьких температур може дати важливу інформацію для перевірювання теорії відповідних станів. Г. Камерлінг-Оннес вибрав за напрям досліджень своєї лабораторії кріогеніку – галузь фізики, що займається дослідженнями низьких температур.

Почалося з того, що в 1892–1894 рр. професор фізики Лейденського університету Гейке Камерлінг-Оннес сконструював зріджувальну установку, яка давала змогу охолоджувати гази аж до їхньої конденсації та скроплення. Вдалося одержати зріджені кисень, азот і повітря.

У 1894 р. Камерлінг-Оннес при Лейденському університеті заснував кріогенну (від грецького



“*kyos*” – холод) лабораторію, яка нині носить його ім'я й відома у всьому світі.

Важливою подією було одержання рідкого водню. Його вперше, 10 травня 1898 року, одержав професор фізики Королівського інституту в Лондоні Джеймс Дюар, застосувавши метод зрідження – цикл Джоуля-Томсона.

Хоча Джеймс Дюар отримав рідкий водень, лише Камерлінгові-Оннесові вдалось налагодити отримання рідкого водню у великих кількостях. Його лабораторія виробляла 4 літри рідкого водню на годину.

Найважче було одержати зріджений гелій. Зазначмо, що з цим об'єктом – зрідженим гелієм – пов'язана окрема галузь сучасної фізики: фізика квантових рідин.

Гелій (від грецького “*helios*” – Сонце) як хемічний елемент вперше виявили 1868 р. на Сонці (звідси й назва He) методом спектрального аналізу, а у земній атмосфері його відкрив англійський хемік і фізик Вільям Рамзей 1895 р..

І ось саме в лабораторії Г. Камерлінга-Оннеса вперше вдалось одержати зріджений гелій при 4,2 К. Відбулося це 10 липня 1908 р.

Спеціально для спостереження за унікальним експериментом були запрошені фізики з різних країн. Експеримент тривав 16 годин, починаючи від 6-ої години ранку.

Зрідження гелію проводилося на каскадній установці (рис. 1), яка й нині захоплює своєю інженерною досконалістю. Спочатку було зріджено 20 л водню, потрібного для попереднього охолодження гелію. Цей етап було завершено о 14-й годині. Відтак через три години розпочалася циркуляція охолодженого гелію. Саме з цього моменту очікувалося наповнення внутрішнього кріостата зріджувача краплями найхолоднішої рідини. Професор і його колеги були у стані граничного напруження.

Минав час, а покази термометра не змінювалися. Після додаткового відрегулювання апаратури термометр кріостата показав поступове зниження температури, але незабаром воно припинилося.

Збігло ще декілька годин. Вже витрачено майже весь заготовлений рідкий водень, а ознак зрідження гелію не помітно. О 8-й годині вечора напруження сягло межі. Невже невдача? І саме в цей критичний момент хтось із присутніх фізиків ви-

гукнув: „А, може, рідкий гелій вже кипить, тому термометр і не показує зниження температури?” Підсвітивши посудину знизу, задоволено побачили бажаний рівень рідини. Кріостат майже цілком був наповнений прозорою рідиною, що кипіла ...

То був воістину історичний день: вперше було одержано майже 60 см<sup>3</sup> зрідженого гелію!

Лейденська лабораторія, яку створив Камерлінг-Оннес, безсумнівно, увійде в історію науки як перший у сучасному розумінні центр фізичних досліджень. Лабораторія мала найновіше обладнання, в ній була налагоджена система підготовки наукового та інженерно-технічного персоналу з конструювання й удосконалення вимірних приладів і кріостатів, складуваної справи тощо. Дослідження велися широким фронтом, планомірно і в контакт з відомими теоретиками. Підтримувалися добрі міжнародні зв'язки. Результати досліджень оперативно публікувалися у журналі “Communications from the Physical Laboratory of the University of Leiden” (у посиланнях скорочено – “Leiden Communications”), який заснував Камерлінг-Оннес. Цей журнал розсилали по всьому світу зацікавленим дослідникам. У лабораторії гостинно приймали усіх, хто бажав працювати в царині низьких температур.

Лейден – це колиска фізики низьких температур. Там уперше зріджено гелій, відкрита надпровідність, одержано твердий гелій. У цій лабораторії упродовж десятків років працювали видатні фізики Де Гааз, Лоренц, Кеезом та ін.

На зламі XIX і XX сторіч, як відомо, у природознавстві відбулися епохальні події (відкриття X-променів, від-

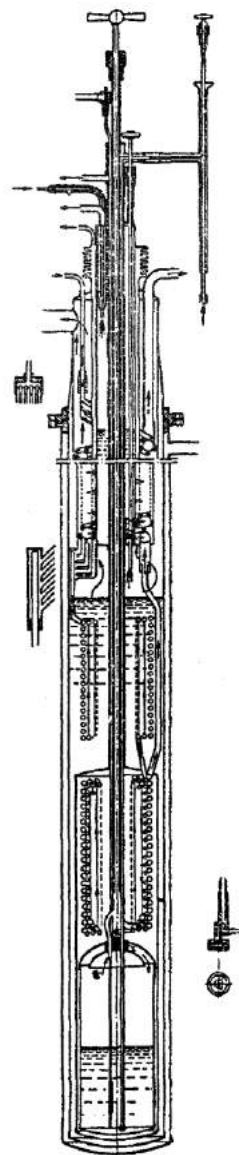


Рис. 1. Переріз лейденського зріджувача



криття електрона, квантова концепція, теорія відносності та ін.), які вплинули на засадничі світоглядні парадигми. То була наукова революція. Наче відгомін, щось подібне відбувалося і в техніці: початки авіації й кінематографії, зародження радіотехніки та електроніки. У зв'язку з потребами електротехніки особливої актуальності набули дослідження з фізики металів. Металознавство як галузь фізики і металургія як галузь технології перебували у зародковій стадії, бо увесь попередній період спирався лише на емпіричний досвід. Ситуація кардинально змінилася завдяки працям Друде і Лоренца з електронної теорії речовини.

Однією з найголовніших характеристик металів є їх електропровідність. Тому фізиків передусім цікавило питання про температурну залежність питомого опору. Камерлінг-Оннес якраз взявся за такі дослідження при гелієвій та вищих температурах.

Об'єктом вивчення була ртуть як добрий провідник електричного струму. Чому саме ртуть, а не мідь? Бо її можна було одержати у достатньо чистому вигляді, тобто фактично без домішок. (А здійснювалося очищення способом перегонки, схожим на процес дистиляції води).

Ще раніше було встановлено, що при охолодженні металу його електричний опір плавно зменшується. Проте навіть при гелієвій температурі (4,2 К) різні метали мають залишковий опір  $r_0$ . Величина  $r_0$  залежить від досконалості зразка, наявності дефектів та домішок.

Професора Г. Камерлінга-Оннеса, власне, цікавила насамперед величина залишкового опору. Він хотів з'ясувати, до якої межі можна зменшити  $r_0$ , якщо брати дедалі чистіший метал. Надпровідності, як такої, він, звичайно, не шукав, бо не міг про неї й здогадуватися. На те воно й відкриття!

Навесні 1911 р. Камерлінг-Оннес виявив, що при 4,15 К електричний опір ртуті до постійного струму майже зникає (рис. 2), тобто цей метал стає надпровідним. Так було відкрито явище надпровідності і започаткована нова галузь фізики і техніки.

Спроби виявити хоч якийсь електричний опір у надпровідниках не давали результатів. На основі використання найчутливіших методів та засобів вимірювань можна стверджувати, що питомий

електроопір надпровідника принаймні менший від величини  $10^{-24}$  Ом·см. Це на 13-15 порядків менше, ніж опір звичайних металів при кімнатній температурі. Тому можна вважати, що опір надпровідника практично відсутній, тобто дорівнює нулеві.

Принагідно зауважимо тут, що якнайточніші вимірювання дуже малих електроопорів – вельми непросте завдання. Найчастіше це роблять опосередковано, за параметром згасання кільцевого струму на підставі вимірювань магнетної дії струму.

Про відкриття надпровідності Камерлінг-Оннес у квітні 1911 р. зробив повідомлення на сесії Нідерландської королівської академії. А перші публікації з'явилися у "Leiden Communications" вже наприкінці квітня і в травні 1911 р. (Kamerlingh Onnes H. Leiden Comm. 1911. № 119, 120, 122).

З величезним зацікавленням і як наукову сенсацію сприйняли доповідь Камерлінга-Оннеса на першому Сольвеевському конгресі, що проходив того ж року з 30 жовтня до 3 листопада у Брюсселі. „Я поки що не можу повністю пояснити це явище”, – заявив доповідач на завершення свого виступу.

Як ми тепер знаємо, оте „поки що” затягнулося майже на півсторіччя ...

А у дипломі Нобелівського лавреата з фізики за 1913 рік було записано: „... за дослідження властивостей речовин при низьких температурах і одержання рідкого гелію”. Отака формула нагороди фундатора криогенної фізики і першовідкривача явища надпровідності. Точна формула. Нобелівський комітет завше про це пильно дбає. Член

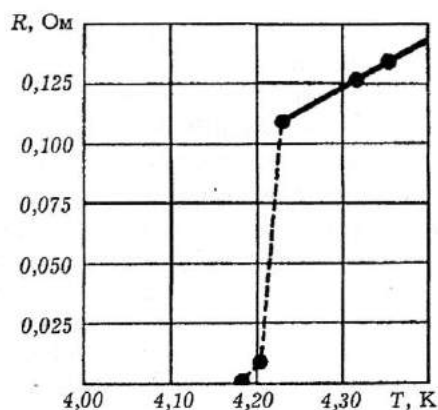


Рис. 2. Результати вимірювань Г. Камерлінга-Оннеса



Шведської королівської академії наук, представляючи лавреата, сказав, що „досягнення таких низьких температур має величезне значення для фізичних досліджень і праці Камерлінга-Оннеса зроблять свій внесок у розвиток електронної теорії”.

Г. Камерлінг-Оннес багато зробив для розвитку міжнародного співробітництва у галузі науки, охоче запрошував іноземних науковців працювати у своїй лабораторії. Його журнал „Повідомлення з фізичної лабораторії Лейденського університету” став найавторитетнішим виданням з фізики низьких температур. Науковець брав активну участь у розробленні методів використання низьких температур для зберігання харчових продуктів, створення вагонів-рефрижераторів і виробництва льоду.

Для підготовки кваліфікованих фахівців, Г. Камерлінг-Оннес 1909 року відкрив коледж для механіків і складувів. Його випускники працювали у фізичних лабораторіях усього світу. Лабораторія Камерлінга-Оннеса стала зразком, за яким створювались науково-дослідні інститути ХХ сторіччя.

Г. Камерлінга-Оннеса нагородили золотою медаллю Маттеуччі Національної академії наук Італії, медаллю Румфорда Лондонського королівського товариства і медаллю Франкліна Франклінського інституту. Він був почесним доктором Бер-

лінського університету. Коли йому не було ще й тридцяти його обрали членом Королівської академії наук в Амстердамі. Камерлінг-Оннес був членом академій наук Копенгагена, Геттінгена, Галле, Упсала, Туріна і Відня, СРСР (з 1925 р.).

З таких людей, як проф. Г. Камерлінг-Оннес, треба нам брати приклад. Талант, ерудиція і темперамент великого дослідника, хист та інтуїція неперевершеного експериментатора й інженера, комунікабельність і невтомна енергія організатора і, найголовніше, – людська доброзичливість, простота і скромність. Професора дуже поважали і любили. У науковому фольклорі його називали не інакше як Пан Абсолютний Нуль, або просто ПАН.

Дбав про користь людям від науки. Під час Першої світової війни він брав участь в організації допомоги знедоленим дітям різних країн. Коли ви, Читачу, зустрінете на автомагістралях або на рейках великі рефрижератори, у яких надійно зберігаються харчові продукти для людей, то і тут згадайте славного професора Г. Камерлінга-Оннеса. Бо саме він першим розробляв їх.

Гейке Камерлінг-Оннес помер 21 лютого 1926 року у Лейдені після недовгої хвороби.

**Галина Шопа,  
Олександр Гальчинський**

## МИКОЛАЇВСЬКІЙ ШКОЛІ – 200 РОКІВ

14 вересня 2003 р. Миколаївська школа, що на Пустомитівщині, відзначала свій 200-літній ювілей. За переказами інвентаризаційної книги Миколаївської сільської Ради, школу збудовано 1803 року. Напочатку школа функціонувала як трирічна, далі – як шестирічна, восьмирічна і, зрештою, у 1940–1950-их роках, як середня школа. Впродовж двох сторіч існування у школи навчання в ній не припинялось навіть під час Першої та Другої Світової воєн.

Миколаївська школи багата історією. Директором школи 1881р. було призначено В. Решитиловича, а 1883 р. у його сім'ї народилася майбутня поетеса О. Дучимінська. У 1887 р. Решитиловичів у Миколаєві відвідав І. Франко. О. Дучимінська прожила 105 важких років. У свої 100 років вона ще писала вірші. Трагізм її життя полягає в тому, що у 67-річному віці її заарештували за сфабрикованою справою Я. Галана.

У 1993 р. громадськість села урочисто відзначила 110-ту річницю від дня народження видатної землячки, а 8 червня 1995 р. у день 112-ї річниці від дня народження поетеси у кімнаті, де вона мешкала, було відкрито музей О. Дучимінської та посвячено меморіальну дошку на будинку школи.

Школа гордиться своїми випускниками: борцями за незалежність України Я. Диким та М. Сеньківим. Як протест тоталітарному режимові Я. Дикий написав збірку віршів „Мій Джекказган”, яку редагував колишній в'язень фашистських таборів письменник М. Петренко. Гордістю школи є науковець із світовим ім'ям, доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України, професор Г.С. Кіт, ім'я якого внесено до книги „Хто є хто в Україні”. У кабінеті математики 2003 р. відкрито куточок-музей цій надзвичайній людині. Там розміщені фотографії з сімейного архіву та копії документів, які свідчать про особливі його заслуги перед Україною.

*Продовження читайте на стор. 23.*



**Ярослав Остапович Довгий** – науковець, який своє життя присвятив прекрасній науці – фізиці, науковій та педагогічній праці у стінах Львівського національного університету імені Івана Франка.

Ярослав Довгий народився 30 вересня 1933 року в селі Німшин на Івано-Франківщині. Після закінчення 1951 року середньої школи, він вступив на фізико-математичний факультет Львівського університету на спеціальність „Фізика”, який з відзнакою закінчив 1956 року. У 1957–1960 рр. навчався в аспірантурі Інституту фізики АН України, де 1964 року захистив кандидатську дисертацію, присвячену дослідження оптичних властивостей гіротропних кристалів та молекулярних кристалів з домішками. Із 1960 року працює в Львівському національному університеті імені Івана Франка асистентом, доцентом (1966), професором (1987) кафедри експериментальної фізики. Докторську дисертацію на тему: „Оптичні спектри і енергетична структура нелінійних кристалів” Ярослав Довгий захистив 1985 року.

Професор Я. Довгий багато сил і часу віддає науковій та педагогічній праці, популяризації науки.

*До 70-річчя від дня народження  
Ярослава Довгого*

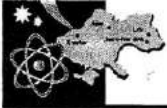
## ТВОРЧІСТЬ – ЙОГО КРЕДО

На початку 1960-х років на кафедрі експериментальної фізики Львівського університету імені Івана Франка Я. Довгий створив навчальну лабораторію з лазерної техніки. Весною 1963 року вперше у Львові запустив у дію гелій-неоновий лазер, розробив понад десяток оригінальних лабораторних робіт. У 1977 року у видавництві „Вища школа” вийшла з друку книжка Я. Довгого з лазерного практикуму. Це був перший такий посібник в Україні. Починаючи з 1970-х років, на замовлення львівського НВО „Полярон” Я. Довгий з колегами розпочали систематичні дослідження фізичних процесів в активних елементах гелій-неонових, гелій-селенових та гелій-кадмієвих лазерів, щоб вивчити вплив різних технологічних чинників на генераційні характеристики та ресурс лазерів.

Я. Довгий постійно стежить за науковими новинками, причому не лише у царині власних наукових інтересів, але значно ширше. Наукова ерудиція і використання у навчальних курсах результатів найновіших досліджень, уміння доступно й образно пояснювати механізми складних фізичних явищ, починаючи від чіткої постановки проблеми і до послідовного її аналізу – такі якості притаманні Ярославу Довгому, як університетському викладачеві та науковому керівнику.

Сьогодні під керівництвом Ярослава Довгого проводяться широкі цілеспрямовані дослідження нелінійно-оптичних кристалів складної кристалохімічної будови для встановлення закономірних залежностей між зонною структурою і динамікою ґратки та функціями нелінійних сприйнятливостей, знаходження фізичних критеріїв для технологічного пошуку нових нелінійних матеріалів, керування їхніми параметрами. Ці дослідження йдуть у руслі формування нової технологічної галузі нелінійно-оптичного матеріалознавства.

Науковець проводить оптико-спектральні дослідження керамічних, тонкоплівкових та монокрис-



талічних зразків високотемпературних надпровідників (ВТНП). Він одержав нові дані щодо впливу лазерного опромінення на властивості ВТНП. Це відкриває можливості керування їхніми параметрами у надпровідній і нормальній фазах.

Серед оригінальних наукових результатів можна відзначити: виявлення та встановлення критеріїв ідентифікації нового типу елементарних збуджень у гіротропних кристалах – циркулярних екситонів; обґрунтування ролі принципу локальності в оптичних дисперсійних співвідношеннях; експериментальне виявлення особливостей поляризованих збуджень у шаруватих кристалах; фотоіндуковані зміни у кристалах і тонких плівках та можливості їхнього використання для запису оптичної інформації; встановлено правило, яке дає змогу оптимізувати пошук та синтез нових нелінійно-оптичних кристалів для перетворювачів лазерного випромінювання; вироблена методика прогнозування довговічності газових лазерів за параметрами розрядної плазми; вперше розшифровано зонну енергетичну структуру важливих нелінійно-оптичних кристалів; одержано нові результати щодо впливу лазерного опромінення на властивості високотемпературних надпровідників. Ярослав Довгий запропонував спектроскопічні підходи для вивчення конфігураційних взаємодій у кристалах, узагальнив формулу Смакули на випадок урахування конфігураційних взаємодій. Виявив та проінтерпретував явища ізоструктурного фазового переходу та автоінтеркаляції зі зміною вмісту компонентів у твердих розчинах шаруватих кристалів. Відомі його публікації з актуальних проблем освіти та науки в Україні.

Ось як про Ярослава Довгого пише академік НАН України Михайло Бродин\*:

„Ярослав Остапович Довгий – яскравий приклад слідування відомій тезі В. Кубійовича: „Ідейність і жертвеність – це дві підставові чесноти, що на них ґрунтуються всі моральні цінності як одиниці, так і цілої суспільності. Це неначе два крила – духовні двигуни, що підіймають людину вгору понад приземний матеріалізм та низький егоїзм, так що сміло можна сказати, що без ідейності та жертвеності людина властиво не заслуговує на почесну назву людини...”

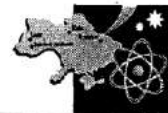
\*Детальніше про Я. Довгого читайте у книжці Г. Шопа, Я. Бондарчук „Творчість – його кредо”. – Львів: Євросвіт, 2003. – 92 с.

Як у науковій і педагогічній діяльності, так і в подвижницькій суспільно-громадській роботі він слідує традиціям кращої частини нашої інтелігенції попередніх часів – служити інтересам свого народу.

Моє близьке знайомство з Ярославом Остаповичем відбулося в далекі вже роки нашої молодості, коли ми (я раніше, а він дещо згодом) робили перші кроки в науці. Власне, наглядно ми знали один одного ще з студентських літ, бо навчалися в один час упродовж двох років на фізико-математичному факультеті Львівського університету імені Івана Франка і навіть мешкали в одному гуртожитку. Проте тісне особисте знайомство відбулось уже в Києві. Після закінчення університету 1953 року я вступив до аспірантури Інституту фізики Академії наук у Києві і виконував дисертаційну роботу під керівництвом А.Ф. Прихотько, тоді члена-кореспондента АН, а згодом академіка. Це був період створення та утвердження нового напрямку – фізики екситонів, і це формування відбувалось саме в Києві у відділі А.Ф. Прихотько. Після закінчення аспірантури (1956) і захисту кандидатської дисертації мене залишили для подальшої наукової роботи в тому ж відділі Інституту фізики, і я з невеликою групою займався дослідженнями особливостей оптичних властивостей кристалів у області їх екситонних збуджень.

Ярослав Остапович, закінчивши університет 1956 року, вступив до аспірантури Львівського університету (1957), і по деякому часі був відраджений для виконання своєї дисертації до Києва, до Інституту фізики. Така кооперативна форма підготовки наукових кадрів для вищих навчальних закладів тоді широко практикувалась. Оскільки Ярослав Остапович обрав для своєї наукової роботи галузь оптики і спектроскопії, він, прибувши до Інституту, потрапив у відділ А.Ф. Прихотько. Вона запропонувала йому займатись кількісними низькотемпературними дослідженнями загасання та дисперсії світла в кристалах з екситонним поглинанням, і, оскільки такі дослідження проводились у моїй групі, йому було рекомендовано приєднатись до неї. Так розпочалась наша співпраця.

Варто сказати декілька слів про ту наукову атмосферу, яка панувала тоді в Інституті фізики і, зокрема, у відділі оптики кристалів. Якщо вис-



ловитись коротко, то це була атмосфера великого зацікавлення наукою, ентузіазму, активності. Інститут за своїм складом був молодим, динамічним, навіть наукові лідери Інституту, відомі науковці – А. Прихотько, П. Борзяк, В. Лашкар'юв, С. Пекар, М. Пасічник та інші – були ще в досить молодому, активному віці, не кажучи вже про середню та нижню ланку. Тому життя в стінах Інституту буквально кипіло – велась напружена робота в лабораторіях, активно працювали наукові семінари, проводились дискусії на актуальні теми фізики. Інститут відвідували відомі науковці з інших наукових центрів та інших країн, виступали з цікавими доповідями. І ще одна важлива обставина: тут значно менше, ніж в університетському середовищі, особливо у Львові, відчувался ідеологічний тиск тодішньої радянської системи, і в цьому локальному маленькому світі можна було значною мірою абстрагуватись від зовнішніх обставин, займатись конкретною справою.

Ділова атмосфера в оптичному відділі була не менш, а може, і більш насиченою. Активно розвивався і стверджувався новий напрям – екситонної фізики, велись пошуки нових проявів екситонів у низькотемпературних спектрах поглинання і люмінесценції різноманітних молекулярних кристалів, вивчались особливості загасання та рефракції світла в околі екситонних резонансів. Удосконалювалась експериментальна методика.

У відділі підібрався дружній колектив цікавих людей, багато молоді. Ярослав Остапович досить швидко адаптувався до нової обстановки, добре вписався в колектив. Як людина інтелігентна, розважлива, доброзичлива, коректна в стосунках, він швидко завоював симпатії колег та А. Прихотько, яка завжди тепло відгукувалася про нього. Він продемонстрував високу дослідницьку працездатність, організованість, зацікавленість у творчій праці, вміння провадити експеримент і осмислювати його результати. Працювати з ним було цікаво й легко. Звичайно, він прилучився до загального напрямку – фізики екситонів, але в цьому напрямі він знайшов свою „ділянку”. Отримані Ярославом Остаповичем результати склали основу кандидатської дисертації.

Як це загалом водилось у аспірантів, Ярослав Остапович багато працював, з ранку до півночі був у лабораторії, (він мешкав поблизу Інституту), проводив експерименти, любив бувати у бібліотеці Інституту (до слова, одній з найкращих з фізики у Києві), дискутував з колегами. Слід зазначити, що коло колег-друзів було досить широким і цікавим. Це – А. Крочук, тоді також аспірант, а нині професор Львівського національного університету імені Івана Франка, Б. Цеквава, грузин, тоді аспірант С. Пекара, сьогодні – професор Тбіліського університету, М. Соскін, тоді аспірант А. Прихотько, зараз член-кореспондент НАНУ, зав відділом Інституту, В. Єременко, тоді аспірант Інституту, нині – академік НАНУ, директор ФТІНТУ (Харків), Н. Чіковані, аспірантка, та інші.

Та, звичайно, життя цим не обмежувалось. Бували години дозвілля, особливо в недільні та святкові дні, з походами до театру, кіно, у вихідні дні – на природу – в Голосіївський ліс з його озерами, чи на Дніпро, або на футбольні матчі. Переважно, робили ми це гуртом, і Ярослав Остапович зазвичай був у цьому гурті.”

В умовах національного відродження Ярослав Довгий вважав своїм святим обов'язком сприяти діяльності відновленого Наукового товариства ім. Шевченка (НТШ) та поверненню науковій громадськості імені всесвітньовідомих, а на батьківській землі замовчуваних, науковців О. Смакули і О. Стасіва та ін.

Нині Ярослав Довгий є головою фізичної комісії НТШ, відповідальним редактором Фізичного збірника НТШ, Головою Фондації ім. О. Смакули, членом редколегії декількох періодичних видань, зокрема журналу „Світ фізики”. З під його пера вийшло понад 300 наукових праць, зокрема книжки: „Оптичні квантові генератори” (Київ, 1977), „Електронна будова і оптика нелінійних кристалів” (Львів, 1996), „Чарівне явище надпровідності” (Львів, 2000). Має авторські свідоцтва на винаходи. Ярослав Довгий 2002 року став лавреатом премії ім. А.Ф. Прихотько АН України за низку праць „Нейтральні та зарядові збудження в твердотільних системах”.

*Вельмишановний Ярославе Остаповичу!*

*Вітаємо Вас з 70-річчям від дня народження.*

*Бажаємо Вам міцного здоров'я, наснаги і творчих успіхів.*

*Редколегія журналу „Світ фізики”*



# Умови задач

## ХІІ Всеукраїнського відкритого турніру юних фізиків 2003/2004 навчального року

### 1. „Придумай сам”

Придумайте і виготовте пристрій, який міг би визначати розмір краплинок туману за допомогою генератора звуку.

### 2. „Впертий лід”

Шматок льоду помістіть у посудину з олією. Постережіть за явищем і опишіть динаміку основних фізичних параметрів руху.

### 3. „Фонтанчик”

У шкільному лабораторному обладнанні є трубка, один кінець якої має вузький отвір. Якщо в цю трубку набрати трохи гарячої води і закрити пальцем широку її частину, тоді різко перевернути трубку вузьким отвором догори, то з неї „битиме” фонтан. Як і від чого залежить висота і тривалість дії фонтану?

### 4. „Ліфт”

У пробірку наливають воду, і вставляють трохи меншу за діаметром пробірку. Систему перевертають. Внутрішня пробірка починає підніматися. Опишіть це явище кількісно.

### 5. „Електричний маятник”

Між пластинками шкільного конденсатора на нитку підвішують кульку від настільного теніса. Пластинки заряджають, і кулька починає коливатися. Від чого залежить частота цих коливань?

### 6. „Крапельниця Кельвіна”

Виготовте крапельницю Кельвіна, виміряйте ЕРС і внутрішній опір цього джерела струму. Дослідіть, від яких чинників вони залежать.

### 7. „Очищення води”

Посудину з брудною водою розміщають трохи вище порожньої посудини. Один кінець марлевої

*Наука изоцряет ум,  
ученьє вострит память.*

*Козьма Прутков,  
афоризм № 7*

стрічки чи промокального паперу опускають у брудну воду, а інший – у порожню посудину. За деякий час вода перетече у порожню посудину. Скільки часу працюватиме такий очисний пристрій без заміни головного елемента, очищаючи воду?

### 8. „Пляма з пилу”

Поясніть і опишіть явища, які спостерігаються під час висипання на поверхню води суміші сухих, легких частинок (кави, пилу, сухого молока тощо) залежно від „керуючих” параметрів взаємодії частинок з рідиною (змочування, розчинність тощо).

### 9. „Петергофський Самсон”

Опишіть поведінку „вершечка” вертикального струменя фонтана.

### 10. „Швидше вітру”

Для збільшення швидкості розгону автомобіля використовують антикрило. Запропонуйте оптимальні умови розгону автомобіля до максимальної швидкості за мінімальний час.

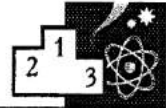
### 11. „Морська черепашка”

Якщо прикласти морську черепашку до вуха, то можна почути „шум моря”. Дослідіть головні характеристики цього шуму і механізм його утворення.

### 12. „Найкращий подарунок Карлсону”

Із бляшаної банки Nescafe, котушки від ниток, двох цвяхів із спиленими головками і палички від





морозива „Браво” виготовте два пропеллери завдовжки 15 см кожний і пристрій для їхнього запуску. Перший пропеллер має підніматися на найбільшу висоту, другий – утримуватися в повітрі якнайдовше. Зробіть розрахунки параметрів пропеллерів для виконання першої та другої умови.

### 13. „Лід та окріп”

Яку мінімальну температуру мусить мати вода, щоб лід, потрапивши у цю воду, розтріскався?

### 14. „Яке небо блакитне!”

Рівно в полудень космічний корабель ТЮФ–12 стартує з Одеського космодрому і піднімається вертикально догору. Командир корабля Остап Сулейман Берта Марія Бендер-бей уважно спостерігає в ілюмінатор як змінюється яскравість і колір неба залежно від висоти підйому. Опишіть кількісно спостереження командира.

### 15. „Ефект Зеєбека”

Дві видовжені пластинки з різних металів вигнуті дугою і запаяні на кінцях. За яких умов магнетна

стрілка, розміщена між цими пластинками, відхилиться на максимальний кут, якщо один із запаяних кінців нагріти у полум’ї стеаринової свічки?

### 16. „Чорнозем і суглинок”

Дослідіть вольтамперну характеристику зразків чорнозему і суглинка від 0 до 36 В залежно від їхньої вологості. Поясніть одержані результати.

### 17. „Поговори зі мною”

*„...Я буду говорити з Вами ще довго після того, як Ви підете.*

**О. Грін.** Біжуча хвилями.

А як можна спілкуватися за допомогою хвиль на воді?

*Задачі запропонували:*

**І. Анісімов, О. Кельник, Є. Коршак, Б. Кремінський (Київ), О.О. Камін, О.Л. Камін (Луганськ), П. Віктор, В. Колебошин, В. Кулінський, О. Матвійчук, Ю. Ткачов (Одеса), І. Ненашев, І. Гельфгат (Харків),**



Продовження, початок читайте на стор. 18.

Школу, як найстарішу в Львівській області, відвідали посол Швейцарії в Україні Жан-Франсуа Каммер та відомий на Західній Україні меценат, громадянин Швейцарії, отець Роберт Готц. Вони допомогли у ремонті школи. О. Роберт подарував школі десять комп’ютерів і принтер. Школу підключено до інтернету як нагороду за перемогу в конкурсі „Розвиток територіальних громад”.

Свято традиційно розпочалося молебню до Пресвятої Богородиці. У своїй промові о. Володимир наголосив, що Миколаївська школа є ініціатором об’єднання громади. Школі мають допомагати всі, оскільки вона є центром формування та розвитку особистості, важливим чинником закріплення молоді на селі, продовженням життя села.

Очолює педагогічний колектив школи молода та енергійна директор Лілія Свистович, яка зачитала вітання колективу школи від міністра освіти і науки України Василя Кременя. На ювілей школи з’їхались майже п’ятсот випускників школи. Ювілярів вітали начальник відділу освіти Львівської облдержадміністрації Михайло Брегін, який усіх потішив важливою інформацією, що наступного року буде довершено реконструкцію адмінбудинку під нову школу, начальник відділу освіти Пустомитівської райдержадміністрації Мирослава Лісна, голова Пустомитівської райдержадміністрації Мирон Мельник, депутат Львівської обласної Ради від Пустомитівщини Олександр Лемішко, заступник голови районної ради народних депутатів Марія Стахурська та інші. Випускник школи, почесний член Піклувальної ради Юрій Дармограй, не зміг приїхати із далекої Америки. Але душею він був присутній на ювілей школи. Він запросив на свято своїх друзів – лавреатів міжнародної премії „Дружба”, літературно-мистецької премії ім. С. Воробкевича, заслужених артистів України Оксану Савчук та Івана Кавачока – дует „Писанку”, шоу-балет “Фіміам”, керівниками якого є лавреати міжнародних конкурсів Тетяна та Володимир Рябоконі.

Педагогічний колектив, батьки та школярі сподіваються, що школа має майбутнє – із стін нової школи вийде ще не один талановитий школяр, який прославить рідне село та впише славу сторінку в історію сільської школи.



# УКРАЇНСЬКІЙ ФІЗИЧНІЙ ОЛІМПІАДІ 40 РОКІВ

Семен Гончаренко,  
*академік, доктор педагогічних наук*

Сорок років тому, далекого 1964 року в м. Харкові була проведена перша Всеукраїнська фізична олімпіада школярів. З цієї знаменної події ведуть відлік усі наші олімпіади. Саме тоді була започаткована традиція активно розвивати у юнаків і дівчат ще з шкільної парти зацікавлення наукою, ефективно сприяти розвитку й розквіту їхніх здібностей. Ця форма участі науковців-фізиків у роботі зі школярами принесла неоціненні результати: фізичні олімпіади дали в свій час „лутівки в життя” багатьом з тих, ким сьогодні пишається Україна.

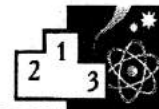
Перша Всеукраїнська олімпіада з фізики започаткувала швидкий розвиток олімпіадного руху в Україні, який охопив усі школи, перекинувся на інші навчальні предмети – математику, хемію, біологію, а згодом і на предмети соціально-гуманітарного циклу, інформатику, трудове навчання тощо. Олімпіадний рух став Міжнародним – щорічно проводять міжнародні олімпіади з фізики, математики, хемії, біології, в яких беруть участь і школярі з України. Сьогодні важко навіть повірити, що така природна річ, як олімпіади школярів, колись не існувала – настільки очевидними здаються досягнення олімпіадного руху в справі фізичної (та й не лише фізичної) освіти школярів, їхньої професійної орієнтації, пробудження і розвитку зацікавлення до наукових досліджень.

Однак повернімося до історії. Ініціаторами та організаторами першої фізичної олімпіади в Україні була група молодих науковців Інституту кібернетики АН України ім. академіка В.М. Глушкова і Київського національного університету імені Т.Г. Шевченка, яка запропонувала Міністерству освіти України систему проведення олімпіад. Ця система в своїй основі збереглася досі. Було запропоновано проводити олімпіаду в чотири ту-

ри: шкільний, районний, обласний (міський) і республіканський.

Перед проведенням першого (шкільного) туру була організована широка інформація про майбутню олімпіаду, її мету й організаційні засади, а також широко розповсюджено набір задач для орієнтації майбутніх учасників у характері майбутнього змагання. Крім того, організатори олімпіади звернулися до учнів і учителів із закликом не лише виявити обдарованих у науковому відношенні дітей, а й загалом підвищити тонус навчальної роботи в школі, розгорнути широку мережу шкільних наукових гуртків, районних і обласних наукових станцій, „малих академій наук” (МАН) і науково-технічних товариств, провести внутрішкільні наукові змагання і так залучити до занять фізичною наукою тисячі українських школярів. Ініціативу організаторів з глибоким розумінням і з великим зацікавленням підтримали освітяни та школярі. Задачі, попередньо запропоновані організаторами олімпіади, із захопленням розв’язували в школах. Цікаво, що на заключний, четвертий (республіканський) тур першої і декількох наступних олімпіад приїхали не лише переможці обласного туру, офіційно запрошені на заключний тур, а й багато батьків привезли своїх дітей і прохали оргкомітет дозволити їм поспробувати свої сили в розв’язуванні олімпіадних завдань поза конкурсом.

Організатори олімпіади опрацювали низку принципів положень щодо її організації й проведення, які, звичайно, від олімпіади до олімпіади удосконалювали, однак в основі своїй збереглися досі. Передусім це положення про спортивний характер олімпіад як чесного змагання між школярами, виявлення найсильніших у цьому виді діяльності. Змагання за звання „Кращий фізик” у школі й змога продовжити участь у наступних турах олімпіади аж до Міжнародної фізичної олім-



піади – серйозний стимул до систематичних занять фізикою для багатьох учнів. Враховуючи це, часто образно кажуть, що участь в олімпіаді школярів – це перший крок до майбутнього завоювання Нобелівської премії. Однак виявлення кількох кращих фізиків у школі, місті чи республіці не є головним і єдиним завданням олімпіади. Головне завдання олімпіади – розвивати зацікавлення і творчі здібності у можливо більшої кількості учнів, показати, що таке фізика, скільки у ній краси, залучення якомога більшої кількості учнів до активних занять у галузі фізики та її застосувань на практиці. Поряд з принципом „Нехай перемаже сильніший” під час підготовки і проведення олімпіади важливо керуватися відомим олімпійським принципом, який проголошує, що головне – не перемога, а участь, що в олімпіаді є переможці, однак немає переможених.

Розуміючи, що успіх у проведенні олімпіади значною мірою визначається якістю запропонованих учням для розв’язування завдань, організатори олімпіади виробили вимоги як до характеру й змісту окремих задач, так і до комплекту задач для того чи іншого туру олімпіади. На думку організаторів **олімпіадні задачі передусім мають бути цікавими й повчальними**. Цікавою, оскільки, щоб зацікавити підлітка якимсь предметом, треба розбудити його допитливість, а повчальною, щоб вона приносила користь у майбутньому.

Олімпіадні задачі розраховані на чітке розуміння школярами основних фізичних законів, справді творчого уміння застосовувати ці закони для пояснення фізичних явищ, розвинутого асоціативного мислення, кмітливості. Звичайно ж олімпіадна задача має бути елементарною, тобто допускати розв’язання на основі знань і умінь, які не виходять за межі шкільної програми. Цей розв’язок мусить, по можливості, спиратися на нестандартні (для школяра) ідеї і не вимагати, зазвичай, виконання громіздких математичних перетворень та обчислень. Розв’язок має бути досить прозорим, щоб його виклад на олімпіаді не забрав занадто багато часу. Найкращим типом олімпіадної задачі є не просто складна задача, яка має кілька етапів все повнішого або строгішого розв’язання.

Особливо цінною є олімпіадна задача, яка має кілька варіантів розв’язку. Ці варіанти можуть бу-

ти пов’язані із застосуванням різних підходів до розв’язання задачі: кінетичного, динамічного, енергетичного. Можливі варіанти, які ґрунтуються на аналітичному або графічному підході до розв’язання задачі. Істотно різними можуть бути варіанти розв’язання під час вибору різних систем відліку. В будь-якому з цих випадків учень може продемонструвати вміння обрати найраціональніший спосіб розв’язання, перевірити свій розв’язок, розв’язавши задачу принципово іншим способом.

Нарешті, найголовніше – **олімпіадна задача та її розв’язок мають бути гарними**. Зміст цього твердження зрозумілий кожному, хто хоч раз дістав задоволення від розв’язування олімпіадної задачі.

Важливим і відповідальним завданням під час підготовки олімпіади є раціональне складання добре збалансованого комплекту задач для проведення кожного її туру. Для того, щоб олімпіада, одночасно сприяла розвитку зацікавлення фізикою усіх учасників і давала змогу виявити найздібніших, у комплекті задач для кожного туру мають бути завдання різного рівня складності. Звичайно, погано, якщо всі задачі комплекту занадто прості – вимагають простого застосування знань за відомим алгоритмом, хоча й складним, який вимагає громіздких математичних перетворень та обчислень. Однак зовсім погано, якщо задачі занадто складні і більшість учасників йде з олімпіади, нічого не розв’язавши. Організатори першої і всіх наступних олімпіад виходять з того, що кожний комплект має містити п’ять задач різного рівня складності: дві легкі задачі, одна задача середнього рівня складності і дві складні задачі. Правда, сформулювати ознаки легкої і складної задачі досить важко. Іноді буває так, що задача, яку організатори олімпіади вважають складною, більшість учасників олімпіади розв’язують легко, і, навпаки, „легка” задача насправді з’ясовується є складною. Найкраще підбирати завдання комплекту так, щоб не менше половини учасників змогли розв’язати більше половини запропонованих задач, а повністю змогли б розв’язати всі задачі лише кілька найздібніших учнів.

Слід підкреслити, що організатори олімпіад, уже починаючи з першої, особливо увагу приділяють професійній орієнтації школярів. На олімпіадах у вільний від виконання завдань часто пе-

ред учасниками виступають з лекціями про найновіші досягнення фізичної науки провідні науковці України, для школярів організують екскурсії до наукових лабораторій університетів, технічних навчальних закладів і наукових установ. Представники різних вищих навчальних закладів розповідають про особливості навчання у цих закладах, про професії та спеціальності, яких можна набути, роздають матеріали про правила прийому. Переможці й призери заключного туру олімпіади одержують рекомендації для вступу в університети й вищі технічні навчальні заклади України.

Звичайно, кожна олімпіада була по своєму цікавою й повчальною і зробила великий внесок у становлення й розвиток олімпіадного руху в Україні. Однак деякі олімпіади заслуговують окремої розмови. Передусім це стосується V олімпіади, яка відбулася 1968 року в м. Львові. Саме на цій олімпіаді з ініціативи голови журі колишнього завідувача кафедрою теоретичної фізики Львівського університету імені Івана Франка, а нині академіка НАН України І. Юхновського та його колег було започатковано проведення експериментального туру олімпіади. Цікаво, що ця ідея дістала негайну підтримку організаторів Всесоюзної та Міжнародної фізичних олімпіад. Науковці Львівського університету М.О. Кицай, Є.С. Клос та інші запропонували цікаві експериментальні завдання. Нагадаємо їх.

Восьмикласникам запропонували таке завдання:

*До джерела з сталою напругою  $U = 30$  В приєднати послідовно два реостати I і II: I з максимальним опором 15 Ом і допустимою силою струму 5 А та реостат II з максимальним опором 30 Ом і допустимою силою струму 5 А. Реостат I треба увімкнути в коло так, щоб його опір не можна було регулювати, а реостат II – так, щоб можна було задавати на ньому різні значення опору. Встановити експериментально залежність потужності, яка споживається реостатом II, від його опору. Опір реостата II змінювати від нуля до максимального значення.*

Для розв'язання задачі школярі мусили скласти електричне коло за схемою (рис. 1). Позначмо опір реостата I через  $R_1$ , а частину опору реостата

II, яка вводиться в коло, через  $R_2$ . На змінному опорі  $R_2$  виділяється потужність  $P_x = IU_x$ . Якщо опір  $R_2$  зменшувати, то сила струму в колі збільшуватиметься, а спад напруги на  $R_2$  зменшуватиметься і навпаки. При  $R_2$ , близькому до нуля, потужність також наблизатиметься до нуля, оскільки

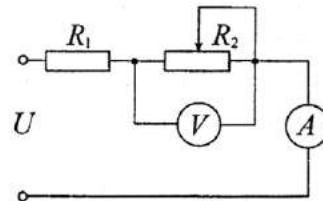


Рис. 1

ки напруга на реостаті II дуже мала. Із збільшенням опору потужність спочатку зростає до певного максимального значення, після чого з дальшим збільшенням опору, який вводиться в коло реостатом II, спадає. Знайдімо максимальне значення потужності, яка виділяється на реостаті II. До кола підведено незмінну напругу. Сила струму в колі

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2},$$

а потужність, що споживається реостатом II,

$$P_x = \frac{U^2 R_2}{(R_1 + R_2)^2} = \frac{U^2 R_2}{R_1^2 + 2R_1 R_2 + R_2^2}.$$

Виконавши перетворення знаменника

$$R_1^2 + 2R_1 R_2 + R_2^2 = (R_1 - R_2)^2 + 4R_1 R_2,$$

поділимо чисельник і знаменник на  $R_2$ . Дістанемо

Щоб знайти максимальне значення потужності  $P_x$ , треба взяти те значення  $R_2$ , при якому знаменник з усіх можливих набуває найменшого значення. З останнього виразу для  $P_x$  видно, що найменше значення знаменника буде тоді, коли  $R_2 = R_1$ . Отже, під час вимірювання потужності значення  $R_2$  зручно змінювати від нуля через кожні  $R_1/n$  одиниць опору, звернувши особливу увагу на момент, коли  $R_2 = R_1$ .

Дев'ятикласникам запропонували дослідити три рухи за допомогою стробоскопічної фотографії, склавши установку для стробоскопічного фотографування за схемою, зображеною на рис. 2.

Учням треба було встановити тривалість досліджуваного руху (наближено) і обчислити частоту, з якою слід обертати диск стробоскопа, щоб за час руху тіло було зафіксовано на плівці 10–15 разів. Обчислити значення центрального кута сектора отвору, при якій час кожної експозиції буде на меншим 0,001 с. Склавши установку, зробити стробоскопічну фотографію трьох рухів: 1) вільного падіння; 2) скочування кульки похилою площиною; 3) руху тіла, кинутого під кутом до гори-

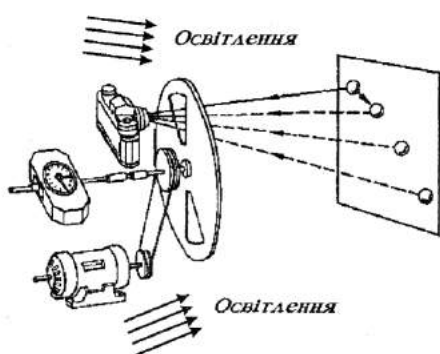


Рис. 2

зонту. Після проявлення плівки, виконати потрібні вимірювання між окремими зображеннями на плівці розрахувати дійсні значення, зафіксованих на плівці, відстаней та встановити характерні особливості цих рухів. На підставі результатів вимірювань знайти числові значення усіх величин, які характеризують кожний із трьох рухів.

Десятикласникам запропонували розв'язати два експериментальні завдання. Перше завдання було таким. Учням давали п'ять закритих непрозорих скриньок („чорних скриньок”), в яких було вмонтовано і виведено назовні до клем електричні кола, що містили резистори, котушки індуктивності, конденсатори. Треба було за допомогою вимірювань встановити, яку схему вмонтовано в кожну з цих скриньок.

Щоб визначити, яка схема вмонтована в кожній з п'яти скриньок, потрібно було виміряти опір між клемми, користуючись постійним і змінним струмами різної частоти. Результати вимірювань можна було звести до такої таблиці:

Результати вимірювання	Схема в скриньці
Опір постійному і змінному струму однаковий і не залежить від частоти	
Опір змінному струму більший, ніж постійному, і монотонно зростає зі збільшенням частоти	
Існує певний опір постійному струму а опір змінному струму монотонно спадає із збільшенням частоти	
Опір постійному струму швидко змінюється до нескінченно великого. Під час повторного вимірювання він нескінченно великий. Коротке замикання клем супроводжується іскровим розрядом. Опір змінному струму має мінімум.	
Існує певне значення опору постійному струму, а опір змінному струму різної частоти має максимум	

Друге експериментальне завдання передбачало складання із запропонованих приладів найпростішої схеми для утворення пилкоподібної напруги і демонстрацію характеру цієї напруги за допомогою осцилографа.

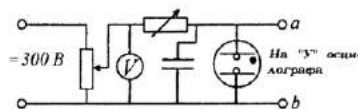


Рис. 3

Найпростіша схема для утворення пилкоподібної напруги зображена на рис. 3. На клеммах *a* і *b* дістають пилкоподібну напругу, якщо напруга *U*, опір резистора *R* та ємність конденсатора *C* відповідно підібрані. Напруга *U* має бути не меншою від потенціалу запалювання неонові лампочки, опір реостата  $R = 0,5 \text{ Ом}$ , а ємність  $C \sim 0,1\text{--}2 \text{ мФ}$ . Щоб продемонструвати характер утвореної напруги, її подають на вхід „*u*” осцилографа, частоту розгортки якого роблять у кілька разів більшою від частоти релаксаційних коливань.

Ідея проведення на Всеукраїнських олімпіадах експериментального туру була підтримана і далі розвинута на наступних олімпіадах. Зокрема, на VI-й олімпіаді, яка була проведена в м. Донецьку. Роботою журі олімпіади керував відомий український фізик-теоретик, член-кореспондент НАН України К. Толпиго. На VII-й олімпіаді, яка відбулася в м. Одесі, цікаві завдання для експериментального туру якої запропонував ветеран олімпіадного руху в Україні викладач Одеського університету В. Манакін.

Цікаво, що вже з самого початку проведення експериментального туру на ньому пропонували завдання на визначення кінематичної, електричної або оптичної схеми „чорної скриньки” і параметрів елементів цієї схеми. З того часу експериментальні завдання з дослідження „чорних скриньок” здобули велику популярність у багатьох країнах світу і на Міжнародних олімпіадах. Найбільше поширення дістали „чорні скриньки”, які містять всередині різні електричні схеми. Для розв’язання таких задач треба знати загальні принципи проведення експериментального дослідження, спрямованого на з’ясування прихованої електричної схеми і параметрів її елементів.

Експериментальні задачі на дослідження „чорних скриньок” пропонують на всіх етапах Всеукраїнських фізичних олімпіад і учням усіх класів. Восьмикласникам, зазвичай, пропонували електричні „чорні скриньки”, з’ясування схем яких виконується за допомогою джерела постійного струму й електровимірювальних приладів. У схемах використовували лише лінійні елементи-резистори. Переважно пропонували визначити не лише електричну схему, яка знаходиться в „чорній скриньці”, а й параметри елементів кола.

В експериментальних завданнях для учнів 9-го і 10-го класів пропонували „чорні скриньки”, які містять нелінійні елементи: діоди, лампи розжарення, термістори. Для визначення елементів кола всередині „чорної скриньки” потрібно дослідити залежність сили струму в колі від напруги. Для цього під час експерименту треба зняти значну кількість показів амперметра і вольтметра, приєднаних до виводів „чорної скриньки” за схемою (рис. 4). Вигляд графіка вольтамперної характеристики  $I = f(U)$  дає змогу з’ясувати схему „чорної скриньки”.

Одинадцятикласникам пропонували завдання дослідити в „чорних скриньках” змінного струму. Це дає змогу включити в схеми конденсатори і котушки індуктивності, розпізнавання яких не-

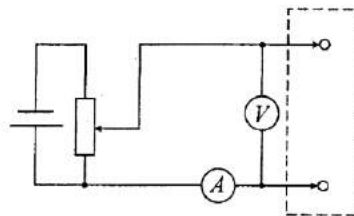


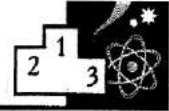
Рис. 4

можливе або дуже складне за допомогою джерел постійного струму. Для визначення схем таких „чорних скриньок” і параметрів елементів електричного кола, які знаходяться в „скриньці”, можна вести дослідження залежності сили струму від частоти прикладної напруги при постійному значенні амплітуди коливань змінної напруги. Як джерело змінної напруги використовується шкільний звуковий генератор, який дає змогу змінювати частоту коливань напруги від 20 Гц до 20 кГц. Для вимірювання сили струму і напруги використовуються амперметр і вольтметр змінного струму або авометр.

Учням 11-го класу пропонували також експериментальні завдання на визначення оптичної схеми „чорної скриньки” і параметрів елементів цієї схеми.

Окремо треба сказати про діяльність журі, яке займається „фізичним забезпеченням” олімпіади. Основна робота журі – це придумування чи підбір задач і організація перевірки їхнього розв’язання учнями на самій олімпіаді. Якщо друге завдання вимагає високої кваліфікації, доброзичливості й педагогічної майстерності, то перше – великої, непомітної і безкорисливої праці. Згідно прийнятих вимог на українських олімпіадах журі прагнули дотримуватися принципу „новизни” у підборі задач, тобто пропонувати, по можливості лише ті задачі, які раніше не пропонували на жодній олімпіаді і які не включалися в широко доступні збірники задач, підручники, посібники тощо.

Придумувати задачі для олімпіади – справа не проста, вона вимагає фантазії і смаку. Це свого роду композиція на зразок шахової чи музичної.



Тут немає ніяких готових рецептів. Найчастіше задачі народжуються під час аналізу різних фізичних чи технічних проблем в міру заглиблення в розв'язання якоїсь початкової проблеми вона розростається, з'ясовуються її зв'язки з іншими проблемами, виникають нові проблеми, відтак час від часу виникають запитання, які можуть становити цікаву теоретичну чи експериментальну задачу. Важливо підкреслити, що, зазвичай, складаючи задачі, автор не має відразу її готової концепції. Більшість задач народжуються в результаті тривалих і глибоких роздумів.

За минулі сорок років на українських олімпіадах було запропоновано чимало цікавих задач, багато з яких добре знайомі читачам зі спеціальних збірників обласних і Всеукраїнських олімпіад та з публікацій у журналі „Світ фізики” в рубриці „Олімпіади, турніри...”

Значну роботу з організації й проведення олімпіад, їхнього „фізичного наповнення” проводить відділ роботи з обдарованою молоддю Міністерства. Освіти і й науки України і передусім завідувач цього відділу Борис Кремінський, у минулому переможець Всеукраїнських фізичних олімпіад. Він багато років очолює команду українських школярів на Міжнародних фізичних олімпіадах, організовує підготовку школярів до цих престижних молодіжних змагань.

Журі українських олімпіад завжди складалось з ентузіастів, людей, яким не шкода витратити свій час і сили, з „любові до мистецтва” фізичних олімпіад. Ці люди – викладачі, студенти, учителі, заслуговують на те, щоб їхні імена були названі в ювілейній статті. Звичайно, всіх, хто за 40 років зробив свій внесок у справу українських фізичних олімпіад, згадати не можливо. Згадаймо деяких.

Очоловали роботу журі в різні роки академіки НАН України Іван Горбань і Ігор Юхновський, член-кореспондент НАН України Кирило Толпиго. Своїми успіхами українська олімпіада багато в чому завдячує зацікавленій самовідданій праці завідувача кафедрою теоретичної фізики Київського університету імені Т.Г. Шевченка Адольфа Федорченка, який багато років керував роботою журі і згуртував його у великий дружний колектив, зацікавлених у роботі з обдарованими дітьми, людей. Учасники олімпіад бережуть пам'ять про Адольфа Михайловича як про високоерудовану, справедливу й принципову людину.

Започатковане Адольфом Михайловичем успішно продовжує його колега, теперішній завідувач кафедрою теоретичної фізики Київського національного університету професор Ігор Пінкевич. Він не лише дбає про підбір цікавих олімпіадних завдань для українських олімпіад, а й здійснює велику роботу з підготовки українських школярів до участі в Міжнародних фізичних олімпіадах.

Особливо активну участь у складанні олімпіадних завдань і проведенні олімпіад беруть викладачі Київського національного університету ім. Т.Г. Шевченка професори Ігор Анісімов, Іван Доценко, Вадим Мальнев, професор Національного педагогічного університету ім. М.П. Драгоманова Євген Коршак, професор Чернігівського педагогічного університету Віталій Савченко, доцент Дніпропетровського національного університету Олег Орлянський, викладач Одеського національного університету Вадим Манакін, викладачі Рішельєвського ліцею м. Одеси доценти Павло Віктор і Валерій Колебошин, заступник директора Львівського фізико-математичного ліцею Олександр Гальчинський, викладач фізико-математичної гімназії № 17 м. Вінниці Юрій Пасіхов, заступник директора середньої школи № 24 м. Києва. Віктор Пуклін, учитель природничого ліцею № 145 м. Києва. Анатолій Шапіро, учитель Українського фізико-математичного ліцею Ігор Яковлев, учителі Валерій Доній і Василь Смолянець, студент Київського національного університету ім. Т.Г. Шевченка Олександр Зозуля і студентка Національного технічного університету „Київська політехніка” Олена Рябініна.

Слід згадати про наступність у роботі журі українських олімпіад. Більшість його членів – це колишні переможці олімпіад. Можливо саме тому українському олімпіадному рухові вдалось за 40 років зберегти своєрідність, свої фізичні традиції.

Для більшості колишніх переможців олімпіад фізика стала професією. Значна частина переможців олімпіад успішно захистила кандидатську й докторські дисертації, ведуть серйозні теоретичні й експериментальні дослідження, й з теплою згадують про свою участь в олімпіадах.

Оцінюючи пройдений українською фізичною олімпіадою 40-річний шлях, можна впевнено констатувати, що основне завдання, поставлене організаторами олімпіади, а саме, виявити серед учнів особливо обдарованих до вивчення фізичної нау-



ки, поглибити їхнє зацікавлення до фізичних досліджень, розвинути творчі здібності, олімпіада виконує вміло й ефективно. Але поряд з цим олімпіада дає величезний матеріал про рівень вивчення фізики у середніх школах України, на підставі якого можна зробити важливі висновки для оцінки як досягнень у галузі фізики, так і для виявлення негативних явищ і тенденцій у викладанні фізики в Україні.

Результати олімпіад переконують у тому, що в Україні є багато профільованих середніх загальноосвітніх шкіл, ліцеїв, коледжів тощо, які забезпечують високий рівень знань фізики у школярів. Учні цих навчальних закладів систематично з року в рік перемагають на заключному турі Всеукраїнської олімпіади та успішно виступають на Міжнародних фізичних олімпіадах. Передусім це ліцеї природничого чи фізико-математичного профілю при Київському і Львівському національних університетах, Рішельєвський ліцей м. Одеси, фізико-математичний ліцей № 27 м. Харкова. На високому рівні викладають фізику в фізико-математичній гімназії № 17 м. Вінниці, в ліцеї № 15 м. Чернігова, ліцеї м. Жовті Води тощо.

Водночас доводиться з сумом констатувати істотне зниження рівня фізичної освіченості учнів звичайних загальноосвітніх шкіл України.

Із року в рік зростає розрив у якості знань учнів спеціалізованих чи профільних шкіл і звичайних загальноосвітніх шкіл. Особливо низьким є рівень фізичних знань учнів із сільської місцевості. З року в рік зменшується кількість дітей із сільської місцевості, які виборюють право участі в заключному турі Всеукраїнської олімпіади. Вони не можуть успішно змагатися з краще підготовленими учнями спеціалізованих шкіл і дуже рідко є переможцями олімпіад.

Причини такого стану речей добре відомі. Передусім, це бездумне скорочення часу на вивчення фізики у звичайній школі, спрощення, а часом й примітивізація програм під лозунгом диференціації вивчення фізики. З програми так званого рівня В просто вилучаються окремі важливі фізичні проблеми, насамперед фізичні теорії й закони. В результаті в школах різко знизився престиж фізики, учні, не задумуючись, обирають для вивчення легші за фізику предмети, або ж фізику

рівня А, що психологічно, очевидно, зрозуміло. Керівники освіти й учителі як слід не усвідомлюють зростаючу роль фізики як одного з найважливіших чинників, який визначає рівень освіченості суспільства, загалом, базовий рівень освіти інженерів, фахівців у галузі точних і природничих наук, чинника, істотного для забезпечення національної безпеки.

Низьку якість вивчення фізики в школах сільської місцевості можна пояснити втратою сільською школою кваліфікованих педагогічних кадрів, відсутністю в школах навчального обладнання наукової і навчальної літератури. Кваліфіковані учителі фізики-професіонали „вимиваються” з сільської школи, де їм доводиться викладати, крім фізики, все що завгодно. В загальноосвітніх школах, особливо, сільських майже ніхто не цікавиться виявленням обдарованих дітей та організацією додаткової роботи з ними.

Школа сьогодні гостро потребує допомоги і видання відповідної наукової і навчальної літератури з фізики. Нині джерелом інформації з фізики як для вчителя, так і для учня, є лише шкільний підручник. Однак багато виданих досі підручників і посібників є недостатньо якісними. Видані поспіхом приватними видавництвами без належного фахового й літературного редагування книжки мало чого можуть навчити дітей. Тому бажане видання якісних фізичних посібників журналів, збірників задач, хрестоматій тощо, з яких учителі могли б поповнювати й розширювати свої фізичні знання.

Подібно до цього бажаним є видання фізичної літератури, зокрема фізичного журналу для учнів. Досі це завдання досить успішно виконує журнал „Світ фізики”, публікуючи цікаві задачі й інші матеріали для допитливих учнів. Цікаво, що часто авторами таких матеріалів є учні шкіл чи ліцеїв, студенти університетів.

Минулі сорок олімпіад показали, що фізична олімпіада є важливою ланкою у вивченні фізики у середніх школах, виробленні у школярів цілісного уявлення про будову й закономірності довколишнього світу. Немає сумніву в тому, що олімпіади відкриють ще чимало талановитих людей, які так потрібні українській науці й народному господарству.





# Фізична задача і рисунок

Олег Орлянський,  
доцент кафедри теоретичної фізики  
Дніпропетровського національного університету

*Щоб розв'язати більш-менш складну задачу з фізики насамперед треба добре собі уявити, що відбувається. У цьому нам, зазвичай, допомагає рисунок. Однак деколи рисунок не допомагає, а заважає розв'язуванню задачі, або підказує хибні ідеї. Спробуймо на прикладах розібратися, коли і чому це відбувається і як цього уникнути.*

*Пропонуємо низку задач, для розв'язання яких потрібно поважне ставлення до рисунка. Якщо Ви бажаєте перевірити себе, спробуйте розв'язати задачі самостійно перед тим як переглянути статтю далі.*

## УМОВИ ЗАДАЧ

**Задача 1.** Літак на автопілоті пролітає над одним містом, а за годину – над іншим. Визначіть відстань між містами, якщо спрямована догори підйомна сила увесь час дорівнює 99 % від сили тяжіння, що діє на літак.

**Задача 2.** Промінь світла падає під кутом  $\alpha = 50^\circ$  до поверхні стола. Визначіть, під яким кутом до поверхні стола слід розташувати дзеркало, щоб відбитий промінь був горизонтальним.

**Задача 3.** Із поверхні Землі тіло кинули під кутом до горизонту. Через час  $t_1 = 5$  с тіло досягло найвищої точки свого руху, а за час  $t_2 = 6$  с тіло віддалилося від початкової точки руху на найбільшу відстань. Визначіть час  $t_3$ , за який відстань від тіла до початкової точки руху знову почала збільшуватись. Опором повітря знехтуйте.

**Задача 4.** Колоду, яка завужена до лівого краю, підвісили так, щоб вона знаходилася у рівновазі (див. рис.). Визначте, яка частина колоди має більшу масу: та, що праворуч чи та, що ліворуч від мотузки. Обґрунтуйте свою думку.



**Задача 5.** З якою найменшою швидкістю має стрибнути жаба, щоб перескочити колоду радіусом  $R$ ? Розмірами жаби порівняно з розмірами колоди, а також опором повітря знехтуйте.

**Задача 6.** Штучний супутник Землі проходить над однією й тією ж точкою екватора через кожні  $t = 8$  год. Визначіть, на якій висоті  $h$  над поверхнею Землі рухається супутник, якщо він має колову орбіту, яка лежить у площині екватора.

**Задача 7.** Тіло рухається зі сталим прискоренням. За першу секунду воно проходить 2 м, за другу – 1 м. Скільки метрів тіло пройде за третю секунду?

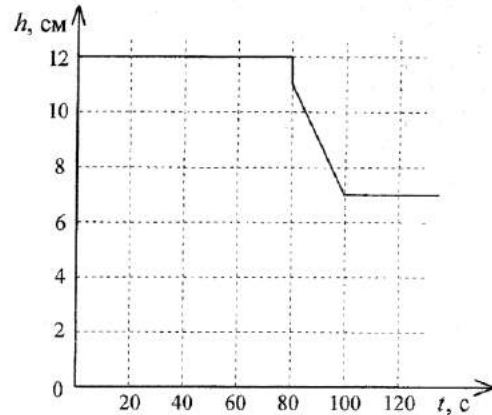
**Задача 8.** Зарядженій частинці, що знаходиться в однорідному магнетному полі у точці А, надають початкову швидкість під кутом  $\alpha = 60^\circ$  до ліній магнетної індукції. Після двох з половиною обертів заряджена частинка проходить через точку В. Визначіть кут  $\beta$  між лініями магнетної індукції й напрямком з точки А у точку В.

**Задача 9.** Хлопець двічі перепливав річку і двічі його зносило течією на одну й ту ж відстань  $l = 45$  м уздовж берега річки. Але другого разу, незважаючи на те, що швидкість течії 1,5 м/с і швидкість



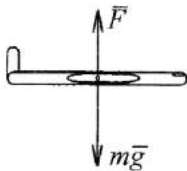
хлопця відносно води  $1 \text{ м/с}$  залишилися незмінними, подорож тривала менше на  $\Delta t = 4/5$  хвилини. Визначіть ширину річки  $h$ . Береги річки вважайте прямими і паралельними один до одного. Траєкторії руху хлопця відносно берегів обидва рази були однакові (гіпотенуза прямокутного трикутника з катетами  $h$  і  $l$ ).

**Задача 10.** У великій циліндричній каструлі плаває порожня каструля меншого розміру. Рівень води у великій каструлі  $h_0 = 12 \text{ см}$ . Воду починають обережно переливати з великої каструлі у малу (щосекунди переливають  $20 \text{ г}$  води). Залежність рівня води у великій каструлі від часу переливання зображено на графіку. Поясніть цю залежність. Спробуйте визначити масу та об'єм меншої каструлі.



## РОЗВ'ЯЗКИ ЗАДАЧ

### Задача 1.



Наведений рисунок не дає змоги розв'язати задачу. Виникають ідеї щодо падіння (красивіше, планування) літака з деякої початкової висоти. Але прискорення  $a = (mg - F)/m = 0,01g$ , з яким це планування відбувається у вертикальному напрямку, і час руху, який має бути не меншим ніж година, дають фантастичне значення для початкової висоти:  $h = at^2/2 \approx 600 \text{ км}$ . На таких висотах вже літають супутники. До того ж горизонтальна складова швидкості літака залишається невизначеною, що не дає змоги знайти відстань між містами. Не будемо далі фантазувати відносно сил опору повітря, повітряних потоків, нахилу літака тощо.

Річ у рисунку. Розв'язання цієї задачі ґрунтується на тому, що Земля має форму кулі. Тобто треба виконати зовсім інший рисунок. Літак, який на автопілоті летить зі сталим значенням швидкості на однаковій висоті, рухається вздовж кола радіусом майже  $R = 6370 \text{ км}$  з доцентровим прискоренням  $a = v^2/R$ . Це прискорення визначають за другим законом Ньютона. Отже,

$$\frac{v^2}{R} = (mg - F)/m = 0,01g,$$

звідки маємо, що

$$v = 0,1\sqrt{gR} = 0,1v_1,$$

де  $v_1 = 7,9 \text{ км/с}$  – перша космічна швидкість. Відстань між містами  $S = vt \approx 2800 \text{ км}$ . Зазначмо, що під час польоту будь-якого літака на сталій висоті підйомна сила має бути меншою від сили тяжіння, щоб різниця цих сил забезпечувала доцентрове прискорення.

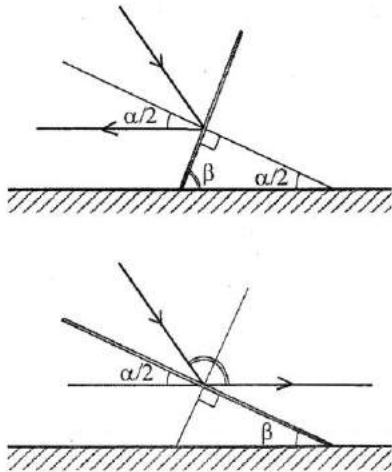
*Порада.* Перед початком розв'язування задачі проаналізуйте, які інтерпретації і моделі можуть задовольняти умові. Пам'ятайте, що Земля має форму кулі, і що це теж лише модель.



**Задача 2.**

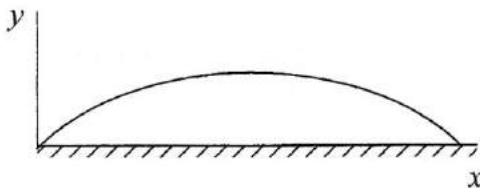
Зазвичай на цю задачу дають лише одну відповідь: або відповідну до першого рисунка  $\beta = 90^\circ - \alpha/2 = 75^\circ$  або до другого  $\beta = \alpha/2 = 25^\circ$ .

Правильна відповідь містить нескінченну кількість розв'язків:  $\beta \in [25^\circ; 75^\circ]$ .

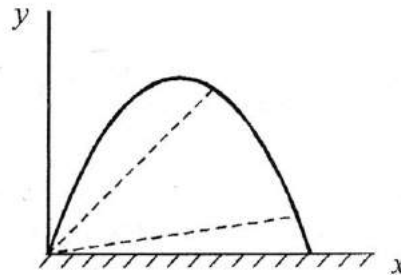


*Порада.* Пам'ятайте, що площина рисунка обмежує багатовимірну реальність. Спробуйте вийти за площину.

**Задача 3.**



Оскільки час, за який тіло досягло найвищої точки руху, дорівнює 5 с, початкова швидкість тіла була невеликою, а тому вважатимемо, що тіло рухалося в однорідному полі тяжіння, а його траєкторією є парабола. Із рисунка видно, що відстань від тіла до початкової точки руху увесь час збільшується, й умова задачі видається абсурдною. Та річ не в умові, а в рисунку. Якщо тіло кинути вертикально догори, відстань від нього до початкової точки руху першу половину часу буде збільшуватись, а другу – зменшуватись. Отже, мають існувати і параболічні траєкторії, які хоча б на якісному рівні задовольняли умові задачі. На другому рисунку зображено приклад такої траєкторії.



Рівняння руху тіла, яке кинули під кутом  $\alpha$  до горизонту з початковою швидкістю  $v_0$  мають вигляд:

$$\begin{cases} x = v_0 \cos \alpha \cdot t \\ y = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2} \end{cases}$$

Відстань до тіла від початку координат

$$l = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(v_0 \cos \alpha \cdot t)^2 + \left(v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}\right)^2} = \sqrt{v_0^2 t^2 - v_0 g \sin \alpha \cdot t^3 + \frac{g^2 t^4}{4}}$$

набуває найбільших і найменших значень, коли її похідна за часом дорівнює нулеві, тобто

$$g^2 t^3 - 3v_0 g \sin \alpha \cdot t^2 + 2v_0^2 t = 0.$$

Рівняння має три розв'язки. Перший  $t = 0$  означає, що якби ми розглядали від'ємні значення часу і рух уздовж параболи без обмежень, то тіло наближалось б до початку координат і досягло б його у момент часу  $t = 0$  після чого почало б віддалятися. У цій задачі цей розв'язок нас не цікавить. Два інші розв'язки відповідають максимальному віддаленню у момент часу  $t_2 = 6$  с:

$$t_2 = \frac{v_0}{2g} \left( 3 \sin \alpha - \sqrt{9 \sin^2 \alpha - 8} \right)$$

і максимальному наближенню у момент часу  $t_3$ :

$$t_3 = \frac{v_0}{2g} \left( 3 \sin \alpha + \sqrt{9 \sin^2 \alpha - 8} \right)$$

Разом з умовою, за якої тіло досягло найвищої висоти у момент часу  $t_1 = 5$  с:

$$t_1 = \frac{v_0 \sin \alpha}{g},$$

маємо систему з трьох рівнянь, з якої знаходимо, що  $t_2 + t_3 = 3t_1$ . Отже,  $t_3 = 3t_1 - t_2 = 9$  с.

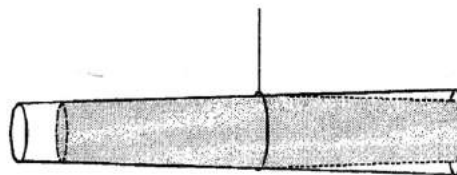
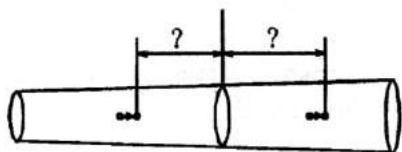


Розв'язати задачу можна і без використання похідної, якщо помітити, що в екстремальних точках швидкість тіла перпендикулярна до радіус-вектора.

*Порада.* Виконуючи рисунок, намагайтесь якомога точніше дотримуватись пропорцій, які відповідають умові задачі. Якщо пропорції не відомі, зробіть декілька рисунків, які відповідають різним можливостям. Обов'язково розгляньте граничні випадки.

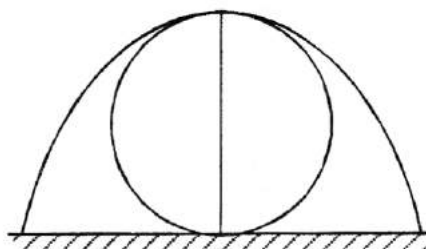
**Задача 4.**

Переважно наводять такі міркування: оскільки ліва частина вужча і довша від правої, центр ваги лівої частини знаходиться далі від мотузки ніж центр ваги правої. Отже, колода може перебувати у рівновазі, якщо вага правої частини буде більша від ваги лівої (у стільки разів, у скільки відстань від мотузки до центру мас лівої частини колоди більша від відстані від мотузки до центру мас правої). Центри ваги кожної частини колоди не знаходяться посередині цих частин, а зміщені у бік більших перерізів. Ліва частина вужча і довша, але центр її ваги зміщений відносно її середини у бік мотузки, водночас, як центр ваги коротшої правої частини знаходиться далі від мотузки ніж середина правої частини. Зауваження про те, що центри ваги кожної частини колоди зміщені у бік більших перерізів, наводить на думку, що відповідь у задачі залежить від форми колоди. Спроба точного розв'язку хоча б для конічної поверхні досить громіздка. З'ясувалося, задача може бути легко розв'язана для будь-якої форми колоди, що звужується, якщо зробити акуратний рисунок і виділити найбільші об'єми однакової форми в обох частинах колоди. Зрозуміло, що сила тяжіння, яка діє на маси у цих об'ємах, не приведе до порушення рівноваги. Якби маси частин колоди, що не увійшли у виділені об'єми, виявилися б однаковими, ліва частина колоди перетягла б, оскільки плече сили тяжіння, що діє на додаткову масу ліворуч очевидно більше. Оскільки колода знаходиться у рівновазі, маса правої частини більша.



*Поради.* Використовуйте поняття симетрії під час розв'язування задач. Шукайте елементи симетрії там, де їх не видно з першого погляду (шляхом додавання, віднімання або виділення однакових частин).

**Задача 5.**



Мінімальна висота, на яку має стрибнути жаба, дорівнює діаметру колоди. Радіус кривизни параболи у верхній точці траєкторії мусить бути не меншим від радіуса колоди, тобто  $v^2/g \geq R$ . Швидкість жаби  $v$  у верхній точці знаходимо із закону збереження енергії:

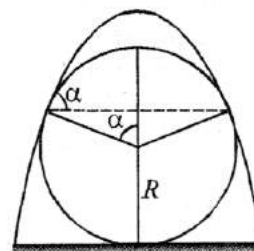
$$\frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + 2mgR.$$

Після нескладних перетворень отримаємо:

$$v_0 \geq \sqrt{5gR}.$$

Найменше значення початкової швидкості

$$v_0 = \sqrt{5gR}.$$



Однак з'ясувалося, що існує економічніша стратегія польоту. Для того, щоб її знайти, треба розглянути інший рисунок. Припустімо, що жаба під час польоту піднімається на більшу висоту



ніж  $2R$ , але збільшення вертикальної складової початкової швидкості компенсується зменшенням горизонтальної (за рахунок збільшення часу польоту і зменшення відстані між початковою і кінцевою точками руху). Тобто парабола дотикається до кола у двох симетрично розташованих точках (несиметричний випадок потребує більшої початкової швидкості). Оскільки ці точки розташовані на однаковій висоті, відстань між ними  $2R$  може бути записана через відому формулу для дальності польоту

$$(v^2/g) \sin 2\alpha$$

де  $v$  – швидкість жаби у точці дотику. Прирівнюючи ці вирази, знаходимо, що  $v^2 = Rg/\cos\alpha$ . Для визначення початкової швидкості скористайтесь законом збереження енергії

$$\frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + mgR(1 + \cos\alpha),$$

звідки знаходимо, що

$$\begin{aligned} v_0^2 &= Rg \left( 2 + 2\cos\alpha + \frac{1}{\cos\alpha} \right) = \\ &= Rg \left( 2 + 2\sqrt{2} + \left( \sqrt{2\cos\alpha} - \frac{1}{\sqrt{\cos\alpha}} \right)^2 \right). \end{aligned}$$

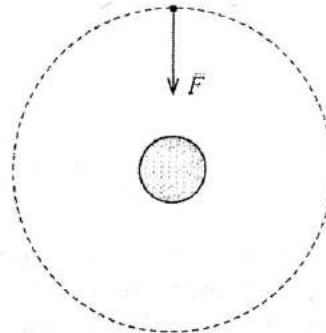
Оскільки найменше значення повного квадрату це нуль, найменше значення початкової швидкості

$$v_0 = \sqrt{Rg(2 + 2\sqrt{2})}.$$

При цьому  $\alpha = 45^\circ$ . Зазначмо, що траєкторія руху, яка дотикається колоди у двох точках, економічніша ніж траєкторія з однією точкою дотику і для інших кутів  $\alpha$ , а саме для всіх  $\alpha \in (0^\circ; 60^\circ)$  початкова швидкість  $v_0 < \sqrt{5gR}$ .

*Порада.* Перед початком розв'язування задачі проаналізуйте різні можливості. Якщо якась з них здається маловірогідною або навіть безглуздою, доведіть це і лише після цього відкиньте її. Колись Лобачевський спробував довести безглуздість припущення, що через точку, яка не належить прямій, проходять дві прямі паралельні даній. Попри всі зусилля довести безглуздість цього припущення йому так і не вдалося, проте вдалося побудувати першу неевклідову геометрію.

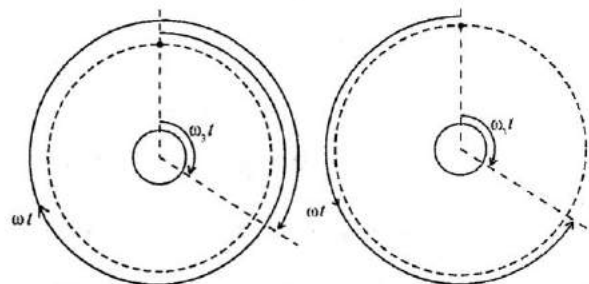
### Задача 6.



Супутник рухається вздовж кола з доцентровим прискоренням  $\omega^2 r$  під дією сили всесвітнього тяжіння  $F = G \frac{mM}{r^2}$ . Із другого закону Ньютона знаходимо радіус його орбіти

$$r = \sqrt[3]{\frac{GM}{\omega^2}},$$

де  $M$  – маса Землі,  $\omega$  – кутова швидкість супутника. Висота супутника над поверхнею  $h = r - R$ , де  $R$  – радіус Землі. Визначмо кутову швидкість супутника. З першого погляду  $\omega = 2\pi/t$ . Та цей вираз у цьому випадку помилковий, оскільки ми розглядаємо рух супутника в інерціальній системі відліку, а  $\omega = 2\pi/t$  – це кутова швидкість супутника відносно неінерціальної системи відліку, пов'язаною з Землею, яка обертається.



Залежно від того, обертаються Земля і супутник в одному напрямку, чи в протилежних, умовам задачі можуть відповідати дві орбіти. Якщо і Земля, і супутник обертаються в одному напрямку за час  $t = 8$  год супутник має обігнати Землю на кут  $2\pi$ , тобто  $\omega t - \omega_3 t = 2\pi$ , де  $\omega_3 = 2\pi/T$ ,  $T = 24$  год. У випадку протилежного руху Землі й супутника має виконуватись рівність  $\omega t + \omega_3 t = 2\pi$ . Об'єднуючи обидва випадки, маємо



$$\omega = 2\pi \left( \frac{1}{t} \pm \frac{1}{T} \right) = \frac{2\pi}{T} (3 \pm 1).$$

Отже,

$$h = \sqrt[3]{\frac{GM}{\omega^2}} - R = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2(3 \pm 1)^2}} - R \approx \begin{cases} 10 \\ 20 \end{cases} \text{ тис. км.}$$

Можливі дві орбіти. Відстань від поверхні Землі до супутника, який обертається у тому ж напрямку, що й Земля, дорівнює 10 тис. км, а до супутника, який обертається у протилежному напрямку, – 20 тис. км.

*Порада.* Уявіть собі, що відбувається. Подумки переберіть головні властивості об'єктів, про які йде мова. Як вони можуть вплинути на розв'язок задачі?

#### Задача 7.

Тіло сповільнює свій рух. Позначмо початкову швидкість тіла через  $v_0$ , а абсолютне значення прискорення через  $a$ . Тоді

$$S_1 = v_0 t - \frac{at^2}{2}, \quad S_2 = v_1 t - \frac{at^2}{2},$$

де  $v_1 = v_0 - at$  – швидкість тіла наприкінці першої секунди руху,  $t = 1$  с. Розв'язавши систему рівнянь, отримаємо:

$$a = \frac{S_1 - S_2}{t^2} = 1 \text{ м/с}^2,$$

$$v_0 = \frac{3S_1 - S_2}{2t} = 2,5 \text{ м/с}.$$

Для третьої секунди руху формально маємо:

$$S_3 = v_2 t - \frac{at^2}{2} = 0 \text{ м} \quad (v_2 = v_0 - 2at = 0,5 \text{ м/с}).$$

Це й зрозуміло, адже, як неважко було помітити з того, що  $a = 1 \text{ м/с}^2$ ,  $v_0 = 2,5 \text{ м/с}$ , тіло змінило напрямку руху в момент часу 2,5 с. Тобто, схематично рух тіла можна зобразити приблизно так:



Третю секунду руху тіло половину часу рухалось в одному напрямку, а половину – у зворотньому, тобто, його шлях можна розрахувати як подвоєне

$$\text{значення } \frac{a(t/2)^2}{2}: \quad S_3 = \frac{at^2}{4} = 0,25 \text{ м.}$$

Насправді наведений розв'язок не повний. Якщо тіло змінило напрямку руху на третій секунді, то чому воно не могло цього зробити на першій або на другій? З першою секундою все зрозуміло. Неважко довести, що якби тіло змінило напрямку руху на першій секунді, то під час другої секунди воно пройшло б більшу відстань, що суперечить умові задачі. Розгляньмо випадок, коли тіло змінює напрямку руху на другій секунді. Схематично це виглядає приблизно так:



Позначмо момент часу зміни напрямку руху через  $\tau$ . Тоді  $v_0 - a\tau = 0$ ,

$$S_1 = v_0 t - \frac{at^2}{2}, \quad S_2 = \frac{a(\tau - t)^2}{2} + \frac{a(2t - \tau)^2}{2}.$$

Підставляючи початкову швидкість з першого рівняння у друге, отримаємо систему двох рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{2S_1}{a} = 2\tau - t^2 \\ \frac{2S_2}{a} = (\tau - t)^2 + (2t - \tau)^2 \end{cases}$$

Розв'язуючи цю систему рівнянь, знаходимо:

$$\tau = \frac{7 \pm \sqrt{5}}{4},$$

$$a = 2 \pm \frac{2}{\sqrt{5}} \text{ м/с}^2.$$

Нашому випадку задовольняє нижній знак, оскільки для верхнього  $\tau \approx 2,31 \text{ с} > 2 \text{ с}$ . Отже,

$$\begin{aligned} S_3 &= \frac{a(3t - \tau)^2}{2} - \frac{a(2t - \tau)^2}{2} = \\ &= 2 + \frac{4}{\sqrt{5}} \end{aligned}$$

і задача має два розв'язки: 0,25 м і  $2 + \frac{4}{\sqrt{5}}$  м.

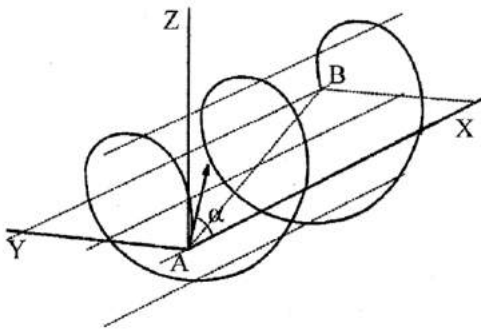
*Порада.* Перед початком розв'язування задачі проаналізуйте, чи не може задача мати інші розв'язки, крім очевидного.



**Задача 8.**

Заряджена частинка рухається в однорідному магнетному полі вздовж гвинтової лінії. Якщо розглянути рух частинки в проекціях, то вздовж ліній магнетної індукції частинка переміщується зі сталою швидкістю  $v_0 \cos \alpha$ , а у площині перпендикулярній до ліній магнетної індукції описує коло зі швидкістю  $v_0 \sin \alpha$ . Через 2,5 оберти вона віддалиться від початкової точки  $A$  вздовж ліній магнетної індукції на відстань  $S = v_0 \cos \alpha \cdot (2,5T)$ , а у перпендикулярному напрямку на відстань  $2R$ , де  $R$  – радіус кола,  $T = \frac{2\pi R}{v_0 \sin \alpha}$  – період. Деколи,

посилаючись на симетрію і не затруднюючи себе побудовою рисунку, вважають, що у перпендикулярному напрямку частинка віддаляється на відстань  $R$ .



Найпростіше знайти кут  $\beta$  між напрямком з точки  $A$  в точку  $B$  і напрямком початкової швидкості частинки  $\vec{v}_0$  через скалярний добуток векторів  $\vec{a}$ , який з'єднує точки  $A$  і  $B$ , і  $\vec{v}_0$ :

$$\cos \beta = \frac{\vec{a} \cdot \vec{v}_0}{|\vec{a}| \cdot |\vec{v}_0|}$$

Оберімо початок системи координат у точці  $A$ . Спрямуємо вісь  $AX$  уздовж ліній магнетної індукції, вісь  $AY$  – перпендикулярно до осі  $AX$ , так, щоб вектор  $\vec{a}$  опинився у площині  $XY$ . Третю вісь  $AZ$  спрямуємо перпендикулярно до  $AX$  і  $AY$ . У площині  $XZ$  лежатиме вектор початкової швидкості  $\vec{v}_0$ . Вектори мають координати:  $\vec{a} = (S; 2R; 0) = (5\pi R \operatorname{ctg} \alpha; 2R; 0)$ ,  $\vec{v}_0 = (v_0 \cos \alpha; 0; v_0 \sin \alpha)$ .

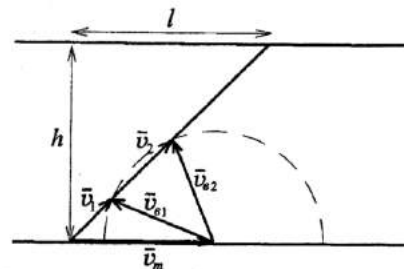
$$\begin{aligned} \cos \beta &= \frac{\vec{a} \cdot \vec{v}_0}{|\vec{a}| \cdot |\vec{v}_0|} = \frac{5\pi R v_0 \cos \alpha \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{R v_0 \sqrt{25\pi^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha + 4}} = \\ &= \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 + \frac{4}{25\pi^2} \operatorname{tg}^2 \alpha}} \end{aligned}$$

Не важко переконатись, що у загальному випадку (інше значення  $\alpha$ , інший знак заряду частинки або інший напрямок ліній магнетної індукції) відповідь залишиться такою ж самою. Для умов задачі

$$\begin{aligned} \beta &= \arccos \left( \frac{1}{2\sqrt{1 + 12/(25\pi^2)}} \right) = \\ &= \arccos 0,488 = 60,8^\circ \end{aligned}$$

*Порада.* Спробуйте найточніше уявити, що відбувається (особливо це важливо для задач з тривимірним рухом). Зробіть зручний рисунок і переконайтесь, що він відповідає всім умовам задачі. Пам'ятайте, що у багатьох задачах введення системи координат полегшує розрахунки.

**Задача 9.**



За умовою задачі начебто все залишилося без змін, а час подорожі зменшився. Отже, щось-таки мало змінитися. З аналізу умови можна зробити висновок, що єдине, що могло змінитися – це напрямок швидкості хлопчика відносно води  $\vec{v}_b$ . За законом додавання швидкостей  $\vec{v} = \vec{v}_m + \vec{v}_b$  маємо два трикутники швидкостей, з яких стає зрозумілою причина розходження у часі руху. З проєкцій руху хлопчика на два взаємоперпендикулярні напрямки знаходимо:



$$\begin{cases} l = (v_m + v_{вх})t, \\ h = v_{вн}t \end{cases}$$

Звідки  $v_b^2 t^2 = (v_{вх}^2 + v_{вн}^2)t^2 = (l - v_m t)^2 + h^2$ .

Розв'язуючи квадратне рівняння відносно  $t$ , отримуємо дві відповіді, два часи руху:

$$t_{1,2} = \frac{v_m l \pm \sqrt{v_m^2 l^2 - (v_m^2 - v_b^2)(h^2 + l^2)}}{v_m^2 - v_b^2}$$

Отже,

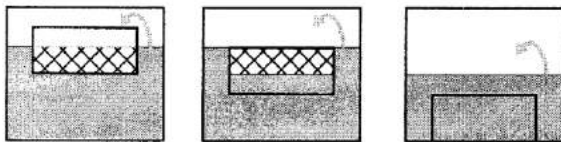
$$\Delta t = t_1 - t_2 = 2 \frac{\sqrt{v_m^2 l^2 - (v_m^2 - v_b^2)(h^2 + l^2)}}{v_m^2 - v_b^2}$$

З останнього рівняння знайдемо ширину річки.

$$h = \frac{\sqrt{4l^2 v_b^2 - (v_m^2 - v_b^2)^2 \Delta t^2}}{4(v_m^2 - v_b^2)} \text{ м.}$$

*Порада.* Уважно читайте умову задачі. Розгляньте різні можливості та їхні комбінації.

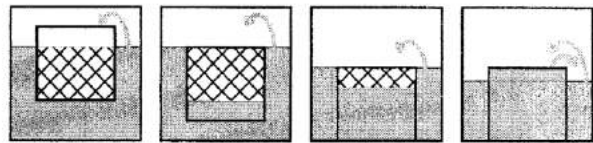
### Задача 10.



Перші 80 секунд рівень води у великій каструлі не змінюється. Це може означати, що менша каструля плаває і під час заповнення її водою поступово занурюється, витісняючи той самий об'єм води, який у неї переливають. Справді, додаткова вага  $\Delta mg$  перелитої води компенсується додатковою силою Архімеда  $\rho g \Delta V$ . Звідси знаходимо, що мала каструля додатково витісняє об'єм  $\Delta V$ , який дорівнює об'ємові перелитої води  $\Delta V = m/\rho$ . Далі мала каструля тоне і йде на дно великої, після чого хоч переливай в неї воду, хоч ні, а рівень у великій каструлі залишається незмінним і згідно умови становить 7 см (див. рис.). Після цього пояснення залишається почуття незадоволення, пов'язане з поведінкою рівня води з 80 до 100 с.

Щось довго і якимось дивно тоне мала каструля, можливо черпаючи воду боками і вирівнюючись... До того ж після того, як мала каструля повністю опинилась під водою чи можна казати, що в неї продовжують переливати воду?

Річ у тім, що розв'язати цю задачу, користуючись зображеним рисунком, не можна. Проаналізуємо ділянку графіка з 80 до 100 с. Спочатку рівень у великій каструлі миттєво зменшується. Це можна пояснити тим, що мала каструля пішла на дно і вода за якусь секунду перелилась в неї з великої. Далі рівень води у великій каструлі рівномірно зменшується. Таке враження, що воду з великої каструлі виливають назовні. Але з умови задачі воду увесь час переливають у меншу каструлю. Це може означати, що мала каструля ще не заповнена водою. На сотій секунді мала каструля наповнюється, і далі вода, яку переливають у неї, витікає назад, отже рівень води у великій каструлі залишається незмінним.



*Порада.* Не залишайте незрозумілими будь-які деталі умови. Розгляньте різні можливості та їхні комбінації і не заспокоюйтесь доки не стануть зрозумілими всі дрібниці.

На багатьох прикладах можна переконатися, що рисунок не завжди допомагає розв'язуванню задачі. Поспіхом виконаний рисунок може привести до абсурдних висновків, а в окремих випадках навіть до лікарні. Як приклад розглянемо геометричне доведення маловідомого факту, який стверджує, що всі трикутники рівнобедренні. Будьте уважні, і ви зможете переконатися, що помилки у доведенні немає.

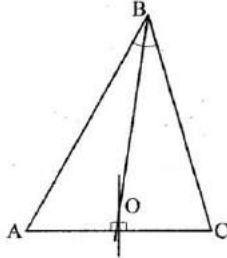
Побудуємо деякий довільний трикутник  $ABC$ .

Проведімо бісектрису до кута  $B$  і серединний перпендикуляр до протилежної сторони  $AC$ . Точку їхнього перетину позначмо літерою  $O$ . Точка  $O$  може лежати: а) всередині трикутника; б) ззовні трикутника; в) на стороні  $AC$ .



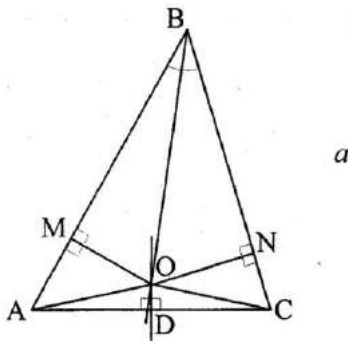


Розгляньмо спочатку випадок *a*. Точка *O* лежить всередині трикутника.



Опустімо з точки *O* перпендикуляри на сторони *AB* і *BC* (у точки *M* і *N*) і з'єднаймо точку *O* з вершинами трикутника *A* і *C*. Середину сторони *AC* позначмо через *D*.

Оскільки *BO* – бісектриса, кути  $\angle ABO$  і  $\angle CBO$  однакові, а прямокутні трикутники *MBO* і *NBO* рівні (за трьома кутами та однією стороною). Отже,  $BM = BN$ ,  $OM = ON$ .



У прямокутних трикутниках *AOD* і *COD* однакові катети, отже, за теоремою Піфагора вони мають і однакові гіпотенузи:  $OA = OC$ . Трикутники рівні за трьома сторонами.

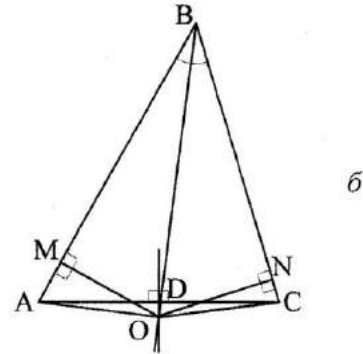
У прямокутних трикутниках *AMO* і *CNO* однакові катети *OM* і *ON* та однакові гіпотенузи. Отже, за теоремою Піфагора вони мають також однакові катети *AM* і *CN*. Трикутники рівні за трьома сторонами.

Оскільки  $BM = BN$  і  $AM = CN$ ,  $AM + BM = CN + BN$ . Отже,  $AB = BC$ , трикутник *ABC* рівнобедрений.

Розгляньмо випадок *б*. Точка *O* лежить ззовні трикутника.

Як і у попередньому випадку, опустімо з точки *O* перпендикуляри на сторони *AB* і *BC* та отримаймо два рівні трикутники *MBO* і *NBO*. З'єднаймо точку *O* з вершинами трикутника *A* і *C* та отримаймо два рівні трикутники *AOD* і *COD*.

У прямокутних трикутниках *AMO* і *CNO* однакові катети *OM* і *ON* та однакові гіпотенузи *OA* і *OC*. Отже, за теоремою Піфагора їхні катети *AM* і *CN* також однакові.



Оскільки  $BM = BN$  і  $AM = CN$ ,  $AM + BM = CN + BN$ . Отже,  $AB = BC$ , трикутник *ABC* рівнобедрений.

Останній випадок *в* також підтверджує, що трикутник *ABC* може бути лише рівнобедрений. Справді, якщо точка перетину бісектриси і серединного перпендикуляра лежить на стороні *AC*, то вона співпадає з точкою *D*, серединою цієї сторони. Отже, бісектриса є також і медіаною, а це можливо лише у рівнобедреному трикутнику.

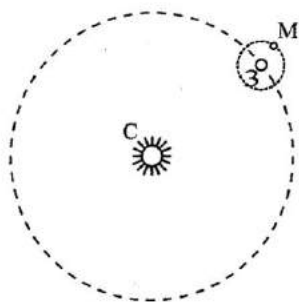
Ми розглянули всі три можливості розташування точки перетину бісектриси і серединного перпендикуляра. Для всіх випадків доведено, що  $AB = BC$ , отже трикутник *ABC* рівнобедрений. Оскільки вершина *B* нічим не краща за вершину *C*, аналогічні аргументи можуть бути використані для доведення того, що  $AC = BC$ . Тоді  $AB = BC = AC$ , трикутник *ABC* рівносторонній.

Звичайно, не всі трикутники рівносторонні. У цьому легко перекопати фізичним методом: взяти лінійку і провести вимірювання. Але де ж тоді помилка? У логічних етапах доведення її немає. Неточність криється у рисунку. Зробіть акуратний рисунок за допомогою циркуля і лінійки, і все стане зрозумілим.

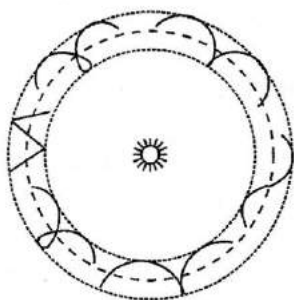
Не менш яскравий приклад задачі, розв'язок якої суперечить здоровому глуздові. Візьмімо із збірника задач з фізики для 7-го класу Л.Е.Генденштейн, І.М.Гельфгат, Л.А.Кирик „Задачі з фізики 7 клас” (Харьків, „Гімназія”, Київ, „Перун”, 1999). До речі, на мою думку, це один з найкращих збірників задач з фізики.



## Задача № 3.10\*



Накресліть приблизну траєкторію руху Місяця відносно Сонця, враховуючи як його обертання навколо Землі, так і обертання Землі навколо Сонця (див. рис.). Вважайте, що траєкторії Місяця і Землі лежать в одній площині, і за один рік Місяць здійснює 13 обертів навколо Землі.



Щоб не склалося враження, що я схильний перебільшувати, наведу фрагменти найпоширеніших неправильних варіантів відповіді. Водночас зазначмо, що для семикласників деякі з наведених відповідей можна вважати правильними. Згадайтеся, які саме і якою має бути справді правильна відповідь.

Спробуймо виділити найхарактерніші особливості рисунку, які можуть зумовити помилки.

1. **Двовимірність.** Рисунок – двовимірний, а світ – тривимірний.
2. **Статичність.** Рисунок – статичний, а фізичне явище, зазвичай, динамічне.
3. **Непараметричність.** Рисунок відображає одну з можливостей, а їх у задачі може бути декілька.
4. **Консервативність** (зворотній зв'язок). Побудова рисунка започатковує певне уявлення про задачу, формує модель її розв'язання.
5. **Неточність.**

Отже, не поспішайте з побудовою рисунку.

- Спочатку уважно прочитайте умову задачі.
- Спробуйте уявити всі можливості, які можуть задовольняти умові, обов'язково згадайте про граничні випадки, подивіться на все з різних точок простору.
- Переберіть подумки головні властивості об'єктів, про які мовиться в задачі і особливо про ті їхні властивості, про які мова не йде. Зважте, як вони можуть вплинути на розв'язок задачі?
- Оживіть картину, надайте їй руху. Якщо це статична задача, невеликі зміщення підкажуть, де прикладені і як спрямовані сили, які напруження виникають в елементах конструкції, що саме забезпечує рівновагу.
- Випишіть, чим нехтуємо в задачі, які випадки слід розглянути.
- Поверніться до умови задачі. Чи не залишилося якихось не зрозумілих деталей?
- Зробіть попередньо декілька схематичних рисунків, порівняйте їх.
- Пам'ятайте, рисунок має бути зручним і максимально точним. Саме тоді він допоможе швидко розв'язати задачу і залишить приємне почуття успішно виконаної справи.

І нарешті остання порада.

Після того, як розв'язані всі задачі (контрольної роботи, олімпіади, вступного іспиту тощо), перегляньте їх ще раз критичним і уважним поглядом (стримуючи почуття добре зробленої справи): можливо з'явиться якась нова ідея чи буде помічена прихована помилка.

Наприклад, якщо після розв'язання задачі № 6 про супутник, від напрямку обертання якого залежить відповідь, повернутися до першої задачі про літак з підйомною силою в 99 % від сили тяжіння, виникає враження, що треба врахувати напрямок руху літака. Найзручнішою для розв'язування задачі є система відліку, яка пов'язана із Землею. У цій системі на літак, крім сили тяжіння і підйомної сили крил, діють відцентрова сила інерції й сила Коріоліса, і виявляється, що жодною з них не можна знехтувати. Та залишимо вичерпний розв'язок цієї задачі на майбутнє. Адже аналіз двох поглядів, звичного інерціального і, трохи незвичного, неінерціального, заслуговує окремої розмови.

# Розв'язки задач IV етапу Всеукраїнської олімпіади з фізики Запоріжжя, 2003 р.

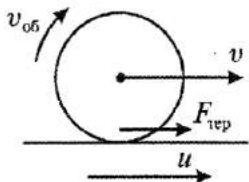
(Умови задач IV етапу Всеукраїнської олімпіади з фізики 2003 року  
дивіться у журналі „Світ фізики”, 2003. № 2 (22). С. 29–32;  
розв'язки задач за 8-й та 9-й класи – С. 38–42.)

## 10-й клас

### Задача 1.

Використаймо систему координат, пов'язану з верхнім боком стрічки. Початок відліку ( $t=0$ ) – момент вкочення трубки на стрічку. Початкова швидкість центра маси трубки  $v(0) = v_0 - u$ , початкова швидкість точок на поверхні трубки відносно центра маси  $v_{об}(0) = v_0$ . Під час проковзування трубки на неї діє сила тертя ковзання  $F_{тр} = \mu Mg$  (див. рис.). Запишімо часові залежності цих швидкостей:

$$v(t) = v_0 - u + \mu g t, \quad v_{об}(t) = v_0 - \mu g t.$$



Трубка прокотиться без проковзування при  $t = t_1$ , коли  $v(t_1) = v_{об}(t_1)$ , тобто

$$v_0 - u + \mu g t_1 = v_0 - \mu g t_1,$$

звідси

$$t_1 = \frac{u}{2\mu g}.$$

Швидкість трубки після закінчення проковзування:

$$v_0(t_1) = v_0 - \frac{u}{2},$$

звідси

$$v_{об}(t_1) = v_0 - \frac{u}{2}.$$

У нерухомій системі координат швидкість усталеного руху центра маси трубки при  $t \geq t_1$  дорівнюватиме  $v_1 = v_0 - \frac{u}{2}$ . Початкова кінетична енергія трубки дорівнює

$$T_0 = \frac{Mv_0^2}{2} + \frac{Mv_0^2}{2} = Mv_0^2,$$

а при  $t = t_1$

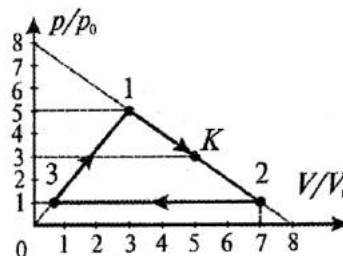
$$T_1 = \frac{M(v_0 + u/2)^2}{2} + \frac{M(v_0 - u/2)^2}{2} = Mv_0^2 + M \frac{u^2}{2}.$$

Зміна кінетичної енергії

$$\Delta T = T_1 - T_0 = M \frac{u^2}{4}.$$

### Задача 2.

Тиск, об'єм і температура газу в точках 1, 2, 3 позначмо  $p, V, T$  з відповідними індексами.



1. На ділянці 3–1 (див. рис.):  $\frac{V_3}{p_3} = \frac{V_1}{p_1}$ .

Оскільки  $p_3 = p_0, p_1 = 5p_0, V_1 = 3V_0$ , то  $V_3 = 3V_0/5$ . Знаючи  $p_3, V_3$ , з рівняння стану газу знаходимо

$$T_3 = \frac{p_3 V_3}{\nu R} = \frac{3p_0 V_0}{5\nu R}.$$

2. Робота над газом за цикл дорівнює

$$A = \frac{1}{2}(V_2 - V_3)(p_1 - p_2) = 12,8p_0 V_0.$$

3) На ділянці 2–3 газ віддає тепло, а на ділянці 3–1 отримує кількість тепла

$$Q_{31} = \frac{i}{2}(p_3 V_3 - p_1 V_1) + \frac{p_1 + p_3}{2}(V_1 - V_3) = 28,8p_0 V_0.$$

Можна показати, що на ділянці 1–2 є точка  $K$ , якій відповідає об'єм  $V_K$  такий, що при  $V < V_K$  газ отримує тепло, а при  $V > V_K$  – віддає, тобто, в самій точці  $K$  теплообміну не має і вона лежить на адіабаті. У точці  $K$  пряма 1–2 дотична до адіабати.

Рівняння адіабати:

$$\gamma p dV + V dp = 0, \text{ де } \gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i+2}{i} = \frac{5}{3}. \quad (1)$$

Рівняння прямої 1–2:

$$\frac{p}{p_0} = 8 - \frac{V}{V_0}. \quad (2)$$

Розв'язавши рівняння (1) та (2) сумісно, отримуємо, що  $V_K = 5V_0$ . До того ж  $p_K = 3p_0$ ,  $T_K = 15 \frac{p_0 V_0}{\nu R}$ .

Отже, за цикл газ отримує тепло тільки на ділянках 3–1 та 1– $K$ , до того ж

$$Q_{1K} = \frac{i}{2} (p_K V_K - p_1 V_1) + \frac{p_1 + p_K}{2} (V_K - V_1) = 8 p_0 V_0.$$

Коефіцієнт корисної дії машини

$$\eta = \frac{A}{Q_{31} + Q_{1K}} = \frac{8}{23} \approx 0,35.$$

### Задача 3.

Доведемо спочатку, що в зовнішньому колі виділяється тим більша потужність, чим ближчий опір навантаження до внутрішнього опору джерела. Знайдемо силу струму в колі, що складається з увімкнених послідовно джерелом з ЕРС  $E$  і внутрішнім опором  $r$  і навантаження з опором  $R$ .

$$I = \frac{E}{R+r}.$$

Тому потужність, яка виділяється на навантаженні, дорівнює

$$W = \frac{E^2 R}{(R+r)^2}.$$

Побудуємо графік залежності  $W$  від опору навантаження  $R$ .

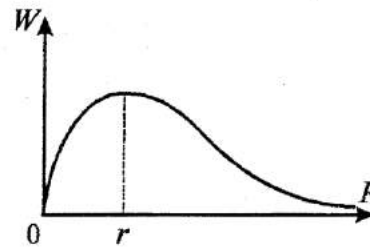


Рис. 1

При  $R = 0$ ,  $W = 0$ , при  $R \rightarrow \infty$ , можна знехтувати  $r$  порівняно з  $R$  у знаменнику дробу. Тоді  $W \approx \frac{E^2}{R}$ . Тобто при великих  $R$  ( $R \gg r$ ) графік залежності  $W$  від  $R$  – гіпербола, яка асимптотично наближається до осі  $R$ . Оскільки функція  $W(R)$ , неперервна і дорівнює нулеві при  $R = 0$  і зменшується при  $R \rightarrow \infty$ , то вона має мати максимум.

Вираз  $\frac{E^2 R}{(R+r)^2}$  максимальний, якщо обернений вираз  $\frac{(R+r)^2}{E^2 R}$  – мінімальний. Але

$$\frac{(R+r)^2}{E^2 R} = \frac{1}{E^2} \frac{R^2 + 2Rr + r^2}{R} = \frac{2}{E^2} r + \frac{1}{E^2} \left( R + \frac{r^2}{R} \right).$$

Цей вираз мінімальний, якщо мінімальний вираз  $R + \frac{r^2}{R}$ .

$$\text{Оскільки } R + \frac{r^2}{R} \geq 2\sqrt{R \frac{r^2}{R}}$$

(відношення між середнім арифметичним і середнім геометричним двох чисел  $R$  та  $\frac{r^2}{R}$ ), то

$$R + \frac{r^2}{R} \geq 2r.$$

Отже, мінімум досягається при  $R = r$ .

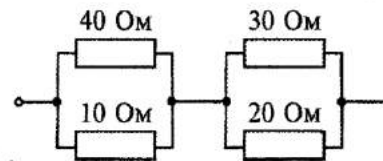


Рис. 2

З усіх можливих схем з'єднання найкраща зображена на рис. 2. Опір такого нагрівника дорівнює 20 Ом, нагрівнику виділяється потужність 5 Вт. Неважно підрахувати, що найбільша потужність виділяється на спіралі з опором 20 Ом, і дорівнює 1,8 Вт.

**Задача 4.**

Ємність початкового кола:

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C} + \frac{1}{2C} + \frac{1}{3C} = \frac{11}{6C}, \quad C_0 = \frac{6}{11}C.$$

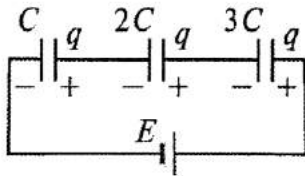


Рис. 1

При послідовному з'єднанні конденсаторів (рис. 1) на кожному з них перебуватимуть однакові заряди, які дорівнюватимуть

$$q = C_0 E = \frac{6}{11} CE. \quad (1)$$

При цьому енергія системи

$$W = \frac{6}{11} CE^2.$$

Після того, як конденсатори від'єднали від джерела ЕРС і приєднали до них резистори, схема нового з'єднання виглядатиме як зображено на рис. 2. На обкладках конденсатора  $C$  будуть заряди  $\pm q'_1$ , на обкладках  $2C$  –  $\pm q'_2$ , а на  $2C$  –  $\pm q'_3$ .

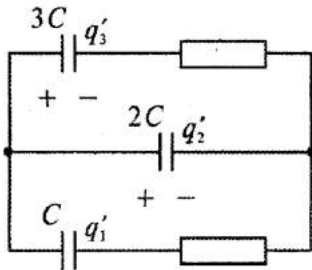


Рис. 2

За законом збереження заряду

$$q'_1 + q'_2 + q'_3 = q. \quad (2)$$

Оскільки після перезаряджання конденсаторів струму в колі немає, то напруги на всіх конденсаторах будуть однакові:

$$U_1 = U_2, \quad U_1 = U_3.$$

або

$$\frac{q'_1}{C} = \frac{q'_2}{2C}, \quad \frac{q'_1}{C} = \frac{q'_3}{3C}. \quad (3)$$

Виразивши заряди  $q'_2$  і  $q'_3$  з (3):

$$q'_2 = 2q'_1, \quad q'_3 = 3q'_1$$

і підставивши в (2), знайдемо  $q'_1$ :

$$q'_1 + 2q'_1 + 3q'_1 = q, \quad q'_1 = \frac{1}{6}q.$$

Тоді з урахуванням (1) отримаємо

$$q'_1 = \frac{1}{11}CE, \quad q'_2 = \frac{2}{11}CE, \quad q'_3 = \frac{3}{11}CE.$$

Після перезаряджання конденсаторів енергія системи дорівнює

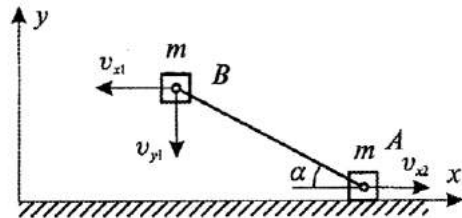
$$W' = \frac{q'^2_1}{2C} + \frac{q'^2_2}{4C} + \frac{q'^2_3}{6C} = \frac{3}{121}CE^2,$$

а в процесі перезаряджання на резисторах виділиться

$$Q = W - W' = \frac{3}{11}CE^2 - \frac{3}{121}CE^2 = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$$

**Задача 5.**

За законом збереження енергії



$$mg\Delta h = \frac{mv^2_2}{2} + \frac{mv^2_1}{2}. \quad (1)$$

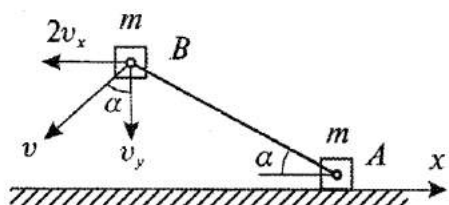
$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{mv_{x1}^2}{2} + \frac{mv_{y1}^2}{2}, \quad \frac{mv_2^2}{2} = \frac{mv_{x2}^2}{2}.$$

Оскільки в першому випадку на систему по осі  $Ox$  сили не діють, то імпульс:

$$p_x = \text{const}, \quad |v_{x1}| = |v_{x2}| = v_x.$$

Із (1):  $2g\Delta h = 2v_x^2 + v_y^2.$  (2)

Перейдімо до системи відліку, яка пов'язана з другим тілом:



$$\frac{2v_x}{v_y} = \text{tg}\alpha, \quad (3)$$

або  $v_x = \frac{v_y \text{tg}\alpha}{2}.$

Підставмо  $v_x$  у (2):

$$2g\Delta h = 2 \frac{v_y^2 \text{tg}^2\alpha}{4} + v_y^2,$$

звідси

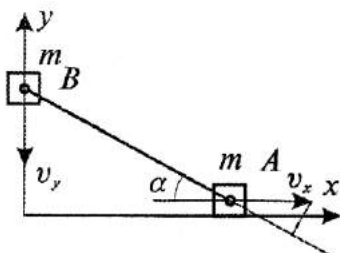
$$v_y^2 = \frac{2g\Delta h}{1 + \frac{\text{tg}^2\alpha}{2}}.$$

Отже, миттєва швидкість  $v_y$  у першому випадку:

$$v_{yI} = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 + \frac{\text{tg}^2\alpha}{2}}}. \quad (4)$$

У другому випадку, оскільки стрижень нерозтяжний, то:

$$v_x \cos \alpha = v_y \sin \alpha, \quad \text{або} \quad v_x = v_y \text{tg}\alpha. \quad (5)$$



За законом збереження енергії:

$$mg\Delta h = \frac{mv_y^2}{2} + \frac{mv_x^2}{2}. \quad (6)$$

Підставмо (5) у (6):

$$2g\Delta h = v_y^2 + v_y^2 \text{tg}^2\alpha. \quad (7)$$

Звідси миттєве значення  $v_y$ :

$$v_{yII} = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 + \text{tg}^2\alpha}}. \quad (8)$$

Тобто ми знайшли залежність миттєвої вертикальної швидкості у першому (4) і другому (8) випадках від параметрів  $\Delta h$ ,  $\alpha$ , а їхнє відношення буде:

$$\frac{v_{yI}}{v_{yII}} = \sqrt{\frac{1 + \text{tg}^2\alpha}{1 + \frac{\text{tg}^2\alpha}{2}}} > 1.$$

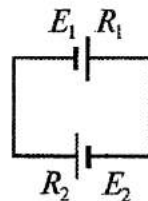
Отже,  $t_1 < t_2$ , тобто в першому випадку тіло  $B$  впаде раніше.

### 11-й клас

#### Задача 1.

Позначмо через  $E_1$  та  $E_2$  електрорушійні сили, які наводяться у момент часу  $t$  у „контурах” ( $I$ ) та ( $II$ ), а через  $R_1$  та  $R_2$  – опори цих контурів.

Враховавши конфігурацію петлі, зображену на рис. а і те, що ЕРС індукції генерується по всьому периметру кільця, еквівалентне коло виглядатиме так:



Миттєве значення сили струму в петлі  $a$ :

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2}. \quad (1)$$

Різниця потенціалів між точками  $M$  та  $N$  у момент часу  $t$ :

$$U_1 = E_1 - IR_1, \quad (2)$$

Із (1) та (2):

$$U_1 = \frac{E_1 R_2 + E_2 R_1}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

За законом електромагнетної індукції:

$$E_1 = \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

Враховавши, що  $\Phi_i = BS_i \cos \alpha$ , де  $S_i$  – площа контура, який пронизує поле  $B$ , за умовою  $B = \alpha t$ ,  $\alpha = 0^\circ$ , отримуємо:

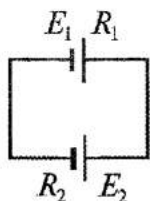
$$E_1 = \pi r_1^2 \alpha, \quad E_2 = \pi r_2^2 \alpha, \quad (5)$$

де площа круга  $S_i = \pi r_i^2$ .

Оскільки  $R = \rho l/S$ , де  $\rho$  – питомий опір провідника,  $l$  і  $S$  – його довжина і площа поперечного перерізу, то

$$U_1 = \pi r_1 r_2 \alpha. \quad (6)$$

Розгляньмо випадок *б* аналогічно до випадку *а*.



Після нескладних перетворень

$$(I = \frac{E_1 + E_2}{R_1 + R_2}, U_2 = E_1 - IR_1 = IR_2 - E_2):$$

$$U_2 = \pi r_1 r_2 \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2} \alpha.$$

*Зауваження.* Під час розв'язування задачі ми вважали, що для довільного моменту часу  $t$  значення активного опору петлі  $R_1$  та  $R_2$  суттєво більші за значення реактивних опорів цих кілець.

### Задача 2.

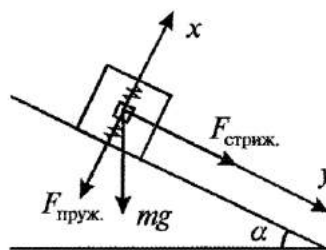
Дивіться розв'язок задачі 2 за 10-й клас 2003 р.

### Задача 3.

Для тіла  $m$ :

$$m\ddot{x} = -F_{\text{пруж.}} - mg \cos \alpha, \quad (1)$$

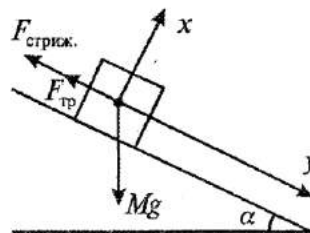
$$m\ddot{y} = mg \sin \alpha + F_{\text{стриж.}} \quad (2)$$



Для  $M$ :

$$0 = N - Mg \cos \alpha - F_{\text{пруж.}} \quad (3)$$

$$M\ddot{y} = Mg \sin \alpha - F_{\text{стриж.}} - F_{\text{тр.}} \quad (4)$$



Із рівнянь (1) та (3):

$$N = -F_{\text{пруж.}} + Mg \cos \alpha = Mg \cos \alpha + m\ddot{x} + mg \cos \alpha.$$

Із рівнянь (2) та (4):

$$(M + m)\ddot{y} = (M + m)g \sin \alpha - F_{\text{тр.}}$$

$F_{\text{тр.}} = \mu N$  (вважаймо, що через достатньо тривалий час скринька не зупиниться)

$$\ddot{y} = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) - \frac{F_{\text{тр.}}}{(M + m)}$$

$$= g \sin \alpha - \frac{\mu((M + m) \cos \alpha + m\ddot{x})}{(M + m)},$$

$$\ddot{y} = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) - \frac{\mu m \ddot{x}}{M + m} \quad (5)$$

$$x = A \sin \omega t, \quad \dot{x} = -A\omega \cos \omega t, \quad \ddot{x} = -A\omega^2 \sin \omega t.$$

Проінтегруймо (5):

$$\dot{y} = C - \frac{\mu m}{M + m} \dot{x}, \quad \text{звідси } v_y = C - \frac{\mu m}{M + m} \dot{x}.$$

$$v_y = \frac{\mu m}{M + m} A\omega(1 - \cos \omega t). \quad (6)$$

У середньому за період

$$v_y = \frac{2\pi A}{T} \frac{\mu m}{M+m} \quad (7)$$

Умовою того, що скринька не підскакує, є

$$Mg \cos \alpha \geq F_{\text{пруж}},$$

$$F_{\text{пруж.}} = -mg \cos \alpha - m\ddot{x},$$

$$Mg \cos \alpha \geq -mg \cos \alpha - m\ddot{x},$$

$$\ddot{x} = -A\omega^2 \sin \omega t,$$

$$(M+m)g \cos \alpha \geq mA\omega^2 \sin \omega t,$$

Максимальне значення  $\sin \omega t$  дорівнює одиниці

$$(M+m)g \cos \alpha \geq mA\omega^2,$$

$$\left(\frac{M}{m} + 1\right) \geq \frac{4\pi^2 A}{T^2 g \cos \alpha}.$$

#### Задача 4.

Направмо вісь  $x$  донизу, помістивши початок координат у точку, яка відповідає рівноважному положенню тягара. Нехай у деякий момент тягар має координату  $x$ . Рівняння руху:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -BII - k(x + x_0) + mg.$$

Тут  $I$  – сила струму в колі,  $x_0$  – видовження пружини в положенні рівноваги, причому  $kx_0 = mg$ . У будь-який момент часу напруга на конденсаторі дорівнює ЕРС індукції в рейці:

$$\frac{q}{C} = B \frac{dx}{dt} l,$$

де  $q$  – заряд конденсатора.

Знайдімо

$$I = \frac{dq}{dt} = BC \frac{d^2 x}{dt^2} l.$$

Вилучаючи  $x_0$  та  $I$ , отримуємо диференціальне рівняння гармонічних коливань величини  $x$ :

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m + B^2 l^2 C} = 0.$$

Звідси період коливань

$$T = 2\pi \sqrt{(m + B^2 l^2 C) / k}.$$

#### Задача 5.

Замінімо таке сферично симетричне середовище з неперервним розподілом показника заломлення  $n(R)$  сферично шаруватим середовищем. Розгляньмо два тонких сферичних шари, радіуси яких  $R_1$  та  $R_2$  (див. рис.). Промінь падає на межу їх розподілу під кутом  $\alpha$ . За законом заломлення

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta. \quad (1)$$

Із трикутника  $OAB$  за теоремою синусів

$$\frac{\sin \gamma}{\sin \beta} = \frac{R_1}{R_2}, \text{ звідси } \sin \beta = \frac{R_2}{R_1} \sin \gamma. \quad (2)$$

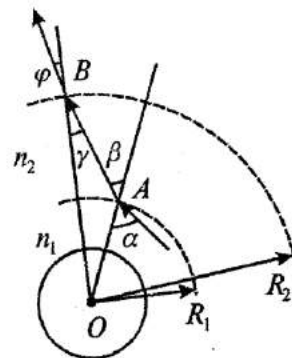
Підставивши (2) у (1), отримаємо

$$R_1 n_1 \sin \alpha = R_2 n_2 \sin \gamma. \quad (3)$$

Таке співвідношення означає, що уздовж напрямку поширення променя в сферично симетричному середовищі

$$Rn(R) \sin \varphi(R) = \text{const}, \quad (4)$$

де  $R$  – поточне значення радіуса,  $n(R)$  – показник заломлення, що відповідає цьому радіусові,  $\varphi(R)$  – кут падіння світла на сферичну границю радіуса  $R$ .



$$\frac{1}{R_0} R^2 \sin \varphi = \text{const}. \quad (5)$$

При мінімальній відстані від центра симетрії до траєкторії променя кут  $\varphi = 90^\circ$ . Це означає, що

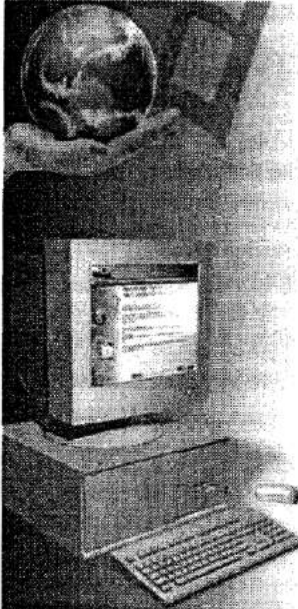
$$\frac{1}{R_0} R_1^2 \sin 30^\circ = \frac{1}{R_{\text{min}}} R_{\text{min}}^2,$$

звідси  $R_{\text{min}} = R_1 \sqrt{\sin 30^\circ} = 56,6$  см.

Розв'язки підготував  
Віталій Лесівців



## Чи знаєте Ви, що...



### 2006 року фізики планують

### зареєструвати гравітаційні хвилі

Гравітаційні хвилі – це коливання кривизни простору, що поширюється з швидкістю світла, „дрижання на поверхні тканини простору-часу”. Можна сказати, що вони так відносяться до звичайної ньютонівської сили гравітації, як електромагнетні хвилі до кулонівської електростатичної сили. Гравітаційні хвилі передбачив ще А. Айнштейн у Загальній теорії відносності. Їхнє існування опосередковано підтверджується характером руху подвійних пульсарів, але безпосередньо вони й досі ще не зареєстровані.

Гравітаційні хвилі випромінюються будь-якими масами речовини, що рухається зі змінним прискоренням. Гравітаційне випромінювання від доступних у звичайних лабораторних умовах мас дуже і дуже мале. Однак в астрофізичних процесах спалахи такого випромінювання можуть бути доволі потужними. Наприклад, під час злиття двох нейтронних зір енергія спалаху становить майже  $10^{45}$  Дж (майже 1% маси зорі перетворюється у

гравітаційну хвилю). Якщо таке злиття відбуватиметься навіть на віддалі 100 мільйонів світлових років від Землі, то, коли хвиля досягне нашої планети, її інтенсивність становитиме  $10^{-3}$  Вт/м<sup>2</sup>. Потужні спалахи такого випромінювання виникають також під час вибуху наднових зір та інших астрофізичних катастроф.

У гравітаційні хвилі міститься інформація, яка може істотно розширити уявлення науковців про структуру Всесвіту. Гравітаційні хвилі навіть великої інтенсивності дуже слабо взаємодіють із звичайною речовиною. Нині у багатьох країнах працюють, або створюються пристрої для детектування гравітаційних хвиль. Реєстрацію випромінювання космічних джерел здійснюватимуть у різних діапазонах довжин хвиль. У височастотному діапазоні (від 10 до 10 000 Гц, довжина хвилі від 300 до 30 000 км) її здійснюватиме мережа лазерних інтерферометричних гравітаційних антен. До цієї мережі входять американський проєкт LIGO, французько-італійський VIRGO, німецько-англійський GEO-600 та японський TAMA. Ця мережа функціонує з 2002 року. Низькочастотний діапазон (від 1 до 0,0001 Гц, довжина хвилі від 0,1 до 10 радіусів земної орбіти) реєструватиме євро-американська супутникова система LISA, яка почне працювати з 2010 року. У третьому діапазоні (довжина хвилі від 1 до 1000 світлових років) нині вже працює „антена” на основі розташованих по земній кулі радіотелескопів, яка дуже точно реєструє час „приходу” на Землю радіоімпульсів від мілісекундних пульсарів.

У проєкті LIGO використовують дві гравітаційні антени, розташовані в США на віддалі декілька тисячів кілометрів одна від одної. Кожна антена складається з двох плечей – інтерферометрів Фабрі-Перо, завдовжки майже 4 км. Якщо гравітаційна хвиля приходить на детектор, вона збільшує довжину одного плеча, і зменшує довжину другого. За півперіод хвилі все відбувається навпаки. Складність реалізації цього проєкта полягає, насамперед, у надзвичайно малій взаємодії гравітаційних хвиль із звичайною матерією. Наприклад, при інтенсивності  $10^{-3}$  Вт/м<sup>2</sup> гравітаційна хвиля зумовлює коливання двох оптичних дзеркал, рознесених у проєктах LIGO і VIRGO на відстані 3–4 км з частотою майже 100 Гц й амплітудою всього лише  $10^{-16}$  см. Водночас науковці вже 2006 року під час реалізації проєкта LIGO-2 планують досягти чутливості під час вимірювання амплітуди малих механічних коливань майже  $10^{-17}$  см. Досягнення такої чутливості – важке технологічне завдання. Однак його вирішення дасть змогу реєструвати гравітаційні хвилі від злиття двох нейтронних зір на віддалі до мільярда світлових років від Землі.

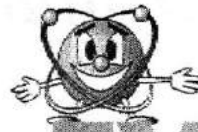


## У ВСІХ НА ЧОБОТІ ЛАТКА

Досвідчений педагог Микола Жуковський говорив, що він вже по тому, як студент підходить до екзаменаційного столу, може сказати, добре чи погано він відповідатиме. Але деколи розсіяність заважала знаменитому аеромеханіку застосовувати це правило.

Одного разу студент, провалившись уже двічі, пішов до Жуковського складати іспит втретє. Професор сидів, замислившись, опустивши голову. Раптом він повернувся до інших екзаменаторів і з здивуванням сказав:

„Дивна річ, третій студент відповідає однаково погано, і в усіх трьох на правому чоботі латка”.



# ГУМОР



## КАПЕЛЮШКИ З ГРОЗОЗАХИСТОМ

Після того, як Франклін 1760 року встановив перший грозозахист (блискавичник) на будинку купця Беста у Філадельфії, Європа та Америка розділились на два табори – прихильників грозозахисту та його противників.

Цікаво те, що в Парижі в свій час навіть жіночі капелюшки виготовляли з блискавичниками і вважали їх дуже модними.

## КОРОВ'ЯЧА ТРАГЕДІЯ

У 1830 році в Англії була побудована залізнична лінія від Ліверпуля до Манчестера.

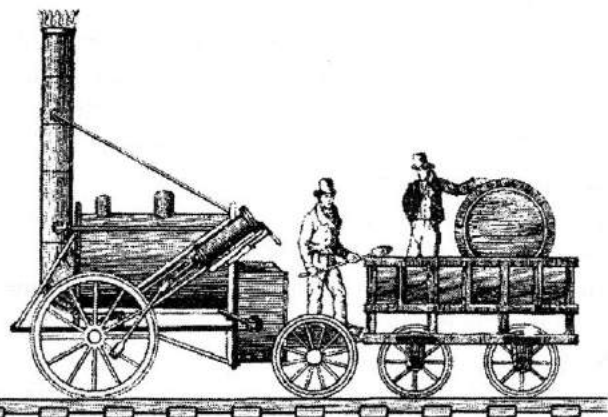
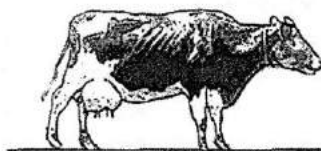
„Яка швидкість вашого паровоза?” – запитав Джорджа Стефенсона директор компанії.

„Десять миль за годину”, – відповів знаменитий винахідник.

„Що? – здивувався директор. – Невже ви думаєте, що можна розвинути таку швидкість?”

Не наважтесь сказати про це кому-небудь, а то вас засміють. Ви тільки уявіть собі, містер Стефенсон, що буде, якщо на рейках появиться, наприклад, корова.”

„Ця зустріч може обернутись трагедією для корови”, – резюмував Стефенсон.





Серія „Бібліотека „Світ фізики”

**Шопа Г., Бондарчук Я. Творчість – його кредо.**

Збірник на пошану Ярослава Довгого. – Львів: Євросвіт, 2003. – 92 с.: 28 світлин.

У книжці, підготовленій до 70-річчя від дня народження українського фізика, професора Львівського національного університету імені Івана Франка, дійсного члена НТШ, відображено основні етапи його життя, наукової, педагогічної, громадської діяльності Ярослава Довгого. Показчик друкованих праць знайомить читача з доробком науковця.

Для науковців, викладачів, аспірантів, студентів та усіх, хто цікавиться історією науки.

**Клим М.М., Якібчук П.М. Молекулярна фізика.**

Навчальний посібник. – Львів: Львівський національний університет імені Івана Франка, 2003. – 544 с.

У посібнику подано виклад основ кінетичної теорії і термодинаміки. Висвітлені питання, пов'язані з внутрішньою будовою і фізичними властивостями рідин і твердих тіл, явищами перенесення, фазовими переходами першого і другого роду, розчинами, а також з явищами, які протікають у газах при малих тисках. Детально виведено основні співвідношення і наведено приклади, що їх підтверджують. Значну увагу приділено розкриттю фізичного змісту законів молекулярної фізики.

Для студентів фізичних спеціальностей вищих навчальних закладів.

М.М.Клим, П.М.Якібчук

**МОЛЕКУЛЯРНА  
ФІЗИКА**

**ВИДАВНИЦТВО „ЄВРОСВІТ” ПРОПОНУЄ:**

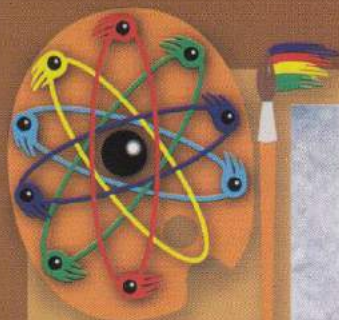
**НАУКОВУ ТА НАВЧАЛЬНУ ЛІТЕРАТУРУ:**

1. Ващенко В., Літинський В., Перій С. Геодезичні прилади і приладдя. Навчальний посібник. – Львів: Євросвіт, 2003. – 160 с.: іл.
2. Іван Карпинець. Белз і Белжчина під Австрією (1772–1918). – Львів: Євросвіт, 2003. – 136 с.
3. Василь Артимович. Велика Білина і довкілля. (Серія „Українські села”). – Львів: Євросвіт, 2003. – 216 с.
4. Марія Деленко. Кольорова пісня слова. Дидактичні матеріали для 5-го класу (українська мова). – Львів: Євросвіт, 2003. – 76 с.
5. Алексейчук В., Гальчинський О., Шопа Г. Обласні олімпіади з фізики. Задачі та розв'язки. – Львів: Євросвіт, 2000. – 168 с.
6. Всеукраїнські олімпіади з фізики. Задачі та розв'язки. За ред. Б. Кремінського. – Львів: Євросвіт, 2003. – 232 с.
7. Краус Іво. Вільгельм Конрад Рентген. Нашадок щасливої випадковості/ Пер. з чеської В. Іванової-Станкевич. – Львів: Євросвіт, 2002. – 84 с.: іл.
8. Білянок Олекса. Тахіони. – Львів: Євросвіт, 2002. – 160 с.: іл.
9. Іван Вакарчук. Теорія зоряних спектрів. Навчальний посібник. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2002. – 359 с.
10. Іван Вакарчук. Вступ до проблеми багатьох тіл. Посібник. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 1999. – 220 с.
11. Іван Болеста. Фізика твердого тіла. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2003. – 480 с.
12. Довгий Ярослав. Чарівне явище надпровідність. – Львів: Євросвіт, 2000. – 440 с.

**Приямасмо замовлення за адресою:**

**„Євросвіт”, м. Львів, 79005, а/с 6700**

**phworld@franko.lviv.ua**



МИСТЕЦЬКА  
СТОРІНКА  
ЖУРНАЛУ  
"СВІТ ФІЗИКИ"



**І.Труш. (1869-1941)**  
**Трембітарі. Початок ХХ ст.**

Ім'я Івана Труша, видатного живописця, критика і громадського діяча, борця за правду і національну самобутність, стоїть у ряду найвидатніших українських постатей кінця ХІХ початку ХХ ст. Все життя він присвятив боротьбі за розвиток українського національного мистецтва. Пейзажі Труша, пройняті хвилюючою любов'ю до природи рідного краю, поетичні сцени з гуцульського життя, глибоко психологічні портрети видатних сучасників художника є дорожочинним внеском в історію українського образотворчого мистецтва.

Іван Іванович Труш народився 17 січня 1869 року в селі Висоцькому, Бродівського повіту, на Львівщині. Батько його був бідним малоземельним селянином. Закінчивши початкову школу у Висоцькому, І. Труш з великими труднощами вступив 1881 року до Бродівської реальної гімназії. Вчитися було нелегко, бо заробляти на життя доводилося самому. Юнак давав приватні уроки, малював на замовлення невеликі портрети. У гімназії Труш скоро виділяється своїми неабиякими здібностями до малювання, а також чудовим знанням античної та європейської класичної літератури. До цього ж періоду належать і його перші, ще несміливі й боязкі етюди з натури. Саме тоді він остаточно прийняв рішення присвятити себе живопису.

І. Труш 1891 року вступив до Академії красних мистецтв у Кракові. Семестрові свідоцтва Труша рясніють найвищими оцінками і похвалами професури, срібними та бронзовими медалями за академічні постановки та пейзажі. Матеріальні труднощі, про які художник згодом говорив як про "безперервне голодування", перебивання уроками і випадково замовленими портретами, не заважали Трушеві жити напруженим духовним життям.

У 1897 році І. Труш відмінно закінчив Краківську Академію, переїхав до Львова і відразу ж активно долучився до його громадського і мистецького життя. Пристрасно захоплений ідеєю відродження національної культури, І. Труш 1898 року виступив одним з ініціаторів створення першого об'єднання західноукраїнських художників "Товариство для розвою руської штуки", яке відіграло певну роль у боротьбі за утвердження національної тематики в мистецтві. Того ж року на сторінках "Літературно-наукового вісника", що виходив тоді фактично за редакцією Івана Франка, він почав свою плідну діяльність публіциста і літературно-художнього критика.

Перші півтора десятиріччя ХХ ст. – це період найвищого розквіту всіх творчих і духовних сил І. Труша. Саме в ці роки він створив свої найкращі праці: „Портрет Івана Франка”, „Портрет Лесі Українки”, „Гуцулка з дитиною”, „Трембітарі”, „Сільський господар” та інші.

Творча спадщина І. Труша нараховує майже 6000 картин і етюдів. Багато з них прикрашають музеї Києва, Харкова, Львова, Одеси, Ужгорода та інших міст України. Поетичні пейзажі Труша глибоко і своєрідно розкривають неповторну красу України.