

С В І Т

# ФІЗИКА

науково-популярний журнал

№2  
2010

нові та маловідомі явища фізики

читач



олімпіади турніри  
винаходи

теоричні фізики

видатні науковці

Зовнішній світ є незалежним від людини,  
це щось абсолютне, і пошук законів,  
що керують цим абсолютним,  
видається мені найпіднесенішим  
науковим пошуком у житті

Макс Планк



## *Вітаємо з ювілеєм* **ЮРІЯ РАНЮКА**



*Ніщо так не просуває вперед допитливий розум, як самостійне дослідження*

**Дж. К. Максвел**

Наукова громадськість України 2010 року відзначила 75-річний ювілей видатного вченого, професора, фізика, популяризатора науки, автора унікальних науково-популярних книжок, члена Наукового товариства імені Тараса Шевченка Юрія Миколайовича Ранюка.



*Юрій Ранюк та Олександр Бакай  
в редакції журналу "Світ фізики"  
(Львів, 2008)*

*Біля пам'ятника у честь видатного експерименту –  
розщеплення атомного ядра, здійсненого вченими  
українського Фізико-технічного інституту  
10 жовтня 1932 року*

*Редакційна колегія та читачі журналу "Світ фізики" щиро вітають  
відомого фізика, професора, завідувача лабораторії  
ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут",  
члена редколегії журналу "Світ фізики"*

**Юрія Миколайовича РАНЮКА**

*з 75-річчям від дня народження.*

*Бажають йому доброго здоров'я, наукових здобутків  
і щасливого творчого натхнення.*

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 Шюпа**

Редакційна колегія:

**Ігор Анісімов**

**Михайло Бродин**

**Петро Голод**

**Семен Гончаренко**

**Ярослав Довгий**

**Іван Климишин**

**Юрій Ключковський**

**Богдан Лукіянець**

**Олег Орлянський**

**Максим Стріха**

**Юрій Ранюк**

**Ярослав Яцків**

Художник **Володимир Гавло**

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) 39 46 73

у Києві 380 (044) 416 60 68

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

www.franko.lviv.ua/publish/phworld

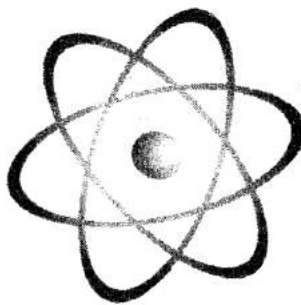
Журнал "Світ фізики" виходить  
в Україні майже 15 років.

За цей період на шпальтах видання  
надруковано велику кількість статей  
відомих українських та іноземних  
фізиків, матеріали учителів, студентів,  
школярів.

Об'єднано чисельну спільноту людей,  
яких поєднує любов до фізики,  
прагнення пізнати довколишній світ,  
бажання поділитися з іншими  
надбаннями фізичної науки чи в май-  
бутньому пов'язати своє життя з цією  
дивовижною наукою – фізикою.

Систематичне накопичення матеріалів  
на сторінках журналу спонукало до  
виникнення серії книжок "Бібліотека  
"Світ фізики" та "Бібліотека молодого  
науковця", а також "Нобелівські  
лауреати з фізики", збірники задач  
і розв'язків Всеукраїнських  
та Обласних олімпіад з фізики.

Вітаємо членів редколегії, літературного  
редактора, художника, працівників  
редакції, засновників журналу,  
дописувачів і Читачів із виходом  
ювілейного числа "Світ фізики".



*Не забудьте  
передплатити журнал  
"Світ фізики"*

**Передплатний індекс  
22577**

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

© СП "Євросвіт"

# ЗМІСТ

## **1. Нові та маловідомі явища фізики**

*Вайданич В. І., Пенцак Г. М.* Біоелектричні потенціали 3  
*Федон Аворіс.* Вуглецеві нанотрубки в електроніці 10

## **2. Фізика світу**

*Шона Г.* Вільям Шоклі – автор відкриття транзисторного ефекту 16

## **3. Фізика України**

*Бакай О., Довгий Я., Плячко Р., Шона Г.* Фізик, краєзнавець, історик науки (до 75-річчя від дня народження Ю. Ранюка) 19

*Шона Г.* Успішний фізик (до 50-річчя від дня народження Ігоря Мриглода) 23

## **4. Творчість юних**

*Зьобро М., Семак С.* Визначення часу останнього застосування зброї в криміналістиці 25

## **5. Олімпіади, турніри...**

Задача з казки “Аліса в країні див”. Мавпа і вантаж 28

Умови задач XLVII Всеукраїнської олімпіади з фізики (Чернігів, 2010) 30

Розв’язки задач III (Обласного) етапу Всеукраїнської олімпіади з фізики (10–11 класи) 36

## **6. Реальність і фантастика**

*Стефанюк Б. М.* Сухі смерчі та озон 46







## БІОЕЛЕКТРИЧНІ ПОТЕНЦІАЛИ

В. І. Вайданич, Г. М. Пенцак,

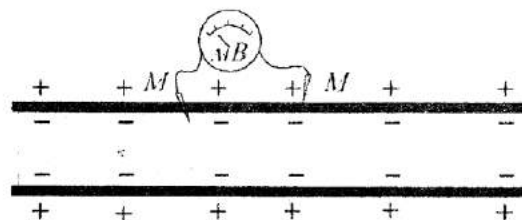
Національний лісотехнічний університет України

Фізика живого розпочалась із знаменитих “балконних дослідів” Л. Гальвані, який підвишуючи жаб’ячі лапки за допомогою мідних гачків, що проходили крізь хребет, на залізні балконні прутки, виявив скорочення лапок і короточасні імпульси електричного струму, поклавши початок новим напрямкам у науці – електрофізіології та біофізиці. Неабияку роль у стрімкому злеті останньої відіграли роздуми основоположника теоретичних основ квантової механіки Е. Шредингера, які він виклав у книжечці “Що таке життя? З погляду фізика”. У ній Шредингер намагається з погляду фізики пояснити процес передачі спадкових ознак на основі генів. Шредингерівський підхід до фундаментальних питань біології вплинув на ціле покоління фізиків і біологів.

Видатний фізик Г. Гамов, який розробив теорію  $\alpha$ -розпаду, висунув теорію генетичного коду. Засновник наукових основ і технології просвітленої оптики О. Смакула ідентифікував вітаміни А, В<sub>2</sub>, Д. Талановиті фізики Ф. Крік, Дж. Вотсон, М. Вілкінс, володіючи найновішою технікою фізичного експерименту “штурмують” біологію і встановлюють структуру гена ДНК, складеної з чотирьох нуклеотидів: аденін, гуанін, цитозин і тимін. 1962 року вони стали лауреатами Нобелівської премії за це відкриття. Як тільки був встановлений склад ДНК, Гамов запропонував розшифровку генетичного коду, алфавітом якого є слова, складені з послідовності відкритих нуклеотидів. Колишній учень Н. Бора М. Дельбрюк ідентифікував віруси в електронному мікроскопі.

Нижче подаємо ще один напрям біофізики, до якого долучилися фізики – біоелектричні потенціали<sup>1</sup> (БЕП).

**1. Потенціал спокою (ПС).** Нервові м’язи здатні генерувати електрорушійні сили – біопотенціали. Електрична активність клітин виявляється у формі коротких розрядів, кожен з яких триває  $\sim 1$  мс. Потенціал спокою постійно існує в живих клітинах у спокої між внутрішнім середовищем клітини та зовнішнім розчином і за величиною становить 60–90 мВ. Внутрішній бік мембрани заряджений негативно відносно зовнішнього. На мал. 1 зображено схему вимірювання мембранного потенціалу за допомогою внутрішньоклітинних електродів *M* та мілівольметра (мВ) або іншого чутливого приладу.



Мал. 1

Мембрана клітини – це її оболонка, “шкіра”, товщиною менше від 0,01 мкм, складається з двох білкових шарів, розділених шаром ліпідних (жирових) молекул (мал. 2). Клітинна мембрана вибірково понижує швидкість пересування йонів у клітину і з неї, через що кон-

<sup>1</sup>Подано з деяким скороченням із підручника Вайданич В. І., Пенцак Г. М. “Фізика” (з лісоекологічними та біофізичними аспектами). – Львів: НЛТУ України. Видавництво “ЗУКЦ”, 2009. – 648 с.



центрація окремих йонів всередині й поза клітиною може відрізнятися в десятки і більше разів (табл. 1). З таблиці видно, що концентрація йонів калію всередині клітини в 34 рази вища, ніж зовні. Натомість, концентрація йонів натрію всередині клітини майже в 10 разів менша, ніж зовні. Різна проникність мембрани для цих йонів пов'язана з їхньою здатністю по-різному притягувати до себе молекули води: один йон натрію притягує п'ять йонів води, а калію – тільки три. Тому діаметр йона калію разом з оточенням молекул води виявляється меншим від діаметра натрію.

Коли помістити клітину з мембраною, проникною тільки для йонів калію, в електроліт, в якому їхня концентрація менша, ніж всередині клітини, йони калію почнуть дифундувати з клітини назовні, переносячи позитивний заряд. На кожен йон калію, що виходить з клітини, буде діяти електрична сила, яка перешкоджає таким переходам. Внаслідок цього, між внутрішнім і зовнішнім розчинами клітини виникне різниця потенціалів, яка отримала назву потенціалу спокою. Його величина буде то більша, що більшою буде кількість перенесених йонів.

Таблиця 1

Йон	Порядковий номер елемента	Діаметр у кристалічній ґратці, нм	Концентрація йонів, ммоль/л	
			Всередині клітини	Зовні клітини
Na <sup>+</sup>	11	0,19	50	460
Cl <sup>-</sup>	17	0,36	114	590
K <sup>+</sup>	19	0,26	340	10
Ca <sup>++</sup>	20	0,20	0,4	10

Величину *ПС* можна визначити, ґрунтуючись на термодинамічних припущеннях, що характеризують стан електрохімічної рівноваги. Оскільки кожний йон зазнає впливу двох сил – дифузійної та електростатичної, то й сумарна енергія буде складатися з концентраційної та електричної потенціальної енергій на мембрані.

Потенціальну електростатичну енергію визначмо як роботу, яка виконується внаслідок

переміщення одного моля йонів калію через мембрану проти електростатичних сил  $dF_e$ , що діють на йони калію, тобто з клітини:

$$\delta A_e = adF_e,$$

де  $a$  – товщина мембрани, через яку відбувається перенесення.

Друга, концентраційна складова потенціальної енергії, може бути виражена через роботу, яку треба затратити, щоб перемістити один моль йонів калію через мембрану проти градієнта концентрації (у клітину) із сталою температурою (осмотична робота):

$$\delta A_0 = adF_0,$$

де  $dF_0$  – сила, зумовлена різницею внутрішньоклітинної і позаклітинної концентрацій йонів калію (осмотичним тиском). У стані термодинамічної рівноваги сума згаданих робіт має дорівнювати нулеві:

$$\delta A_0 + \delta A_e = 0;$$

$$\delta A_0 = -\delta A_e.$$

Із врахуванням попередніх виразів перейдемо до рівності згаданих сил

$$dF_0 = -dF_e.$$

Перенесення однозарядних йонів калію з клітини в позаклітинне середовище призведе до утворення напруженості електричного поля та електричної складової сили:

$$dF_e = Edq = eEnSdx,$$

де  $n$  – концентрація йонів  $K^+$  всередині клітини;  $nSdx$  – кількість йонів  $K^+$  у приконтатному мембранному шарі об'ємом  $Sdx$ ;  $e$  – заряд одновалентного йона  $K^+$ . Дифузійну складову  $dF_0$  визначмо через силу осмотичного тиску, оскільки для розведених розчинів допустиме застосування законів ідеального газу:

$$dF_0 = Sdp = SkTdn,$$





де  $dn$  – зміна концентрації йонів калію внаслідок дифузії на ділянці товщини шару мембрани  $dx$ . У стані термодинамічної рівноваги

$$kTdn = -eE dx.$$

Напруженість електричного поля, утвореного перенесенням йонів калію, зв'язана з потенціалом співвідношенням

$$E dx = -d\phi,$$

тому

$$d\phi = \frac{kT}{e} \frac{dn}{n}. \quad (1)$$

Якщо добути інтеграл з отриманого виразу в межах для  $d\phi$  від нуля до потенціалу  $\Delta\phi_m^k$  і для концентрацій йонів калію всередині клітини і поза нею, то отримаємо вираз:

$$\Delta\phi_m^k = \frac{kT}{e} \ln \frac{K_a^+}{K_b^+}, \quad (2)$$

де  $K_a^+$  і  $K_b^+$  – позаклітинна і внутрішньоклітинна концентрації йонів калію, відповідно.

Оскільки  $k = R/N_A$ , де  $N_A$  – стала Авогадро, для потенціалу спокою отримаємо:

$$\Delta\phi_m^k = \frac{RT}{eN_A} \ln \frac{K_a^+}{K_b^+}. \quad (3)$$

Вираз (3) має назву формули Нернста для калієвого рівноважного потенціалу  $\Delta\phi_m^{k+}$ .

Величина  $F = eN_A = 96500$  Кл/моль – стала Фарадея. Після підстановки концентрації йонів калію з табл. 1, мембранний потенціал спокою для кімнатної температури ( $T = \text{const}$ ) набуває значення  $\Delta\phi_m^{k+} = -91$  мВ, що співпадає з експериментально визначеним.

Ці результати стали підґрунтям для створення мембранної теорії генерації потенціалів у клітині, яку висунув на початку ХХ сторіччя німецький учений Д. Бернштейн, і яку експериментально обґрунтували в 50–60 роках ХХ сторіччя у працях англійські учені А. Ходжкін, А. Хакслі та Б. Кац.

Мембранний потенціал клітини визначається не тільки калієвим, а й натрієвим та хлорним рівноважними потенціалами, внесок кожного з яких у величину мембранного потенціалу спокою зумовлюється співвідношенням між проникністю мембрани для цих йонів. Значення ПС різних клітин не однакове і коливається від  $-80$  до  $-100$  мВ.

Наявність різних концентрацій йонів  $K^+$  і  $Na^+$  всередині й ззовні клітини породжує дифузійну йонів натрію всередину клітини та йонів калію назовні. Така дифузійна отримала назву *пасивного транспорту*. Вона зумовлена наявністю концентраційних градієнтів. Коли б діяв лише цей механізм, то за деякий час було б досягнуто стану рівноваги. Насправді останнє не досягається, тому що поряд з пасивною дифузійною наявне вимушене перенесення йонів  $Na^+$  і  $K^+$  через мембрану проти градієнта концентрацій.

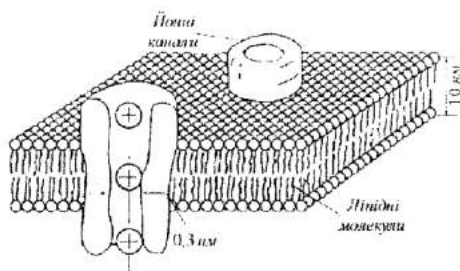
Ця дифузійна отримала назву *активного транспорту*. Активне перенесення йонів здійснюється комплексом хемічних реакцій за участю молекул АТФ. Такий специфічний механізм отримав назву *«калій-натрієвої помпи»*. Він забезпечує інжекцію йонів  $K^+$  у клітину і виведення з клітини йонів  $Na^+$ , відновлюючи в такий спосіб потенціал спокою.

З викладеного випливає, що біологічна мембрана, оточена з обох боків розчинами електролітів, може бути джерелом електрорушійної сили. Біологічні джерела ЕРС можуть мати мініатюрні розміри, оскільки товщина мембрани, як згадувалося, не перевищує  $0,01$  мкм. Останніми роками розпочато розроблення електричних джерел, аналогічних до біологічних мембран, на які чекають конструктори мінікомп'ютерів. 2002 року створені перші найпростіші запам'ятовуючі пристрої, в яких перемикачами є синтезовані органічні молекули. Початок, треба сподіватися, *молекулярній електроніці покладено*.



**2. Потенціал дії.** Багатоклітинний організм, як єдине ціле, реагує на зміни зовнішнього та внутрішнього середовища відповідною системою зв'язків на основі електричних імпульсів. Електричний сигнал, що відповідає одному імпульсу, тобто збудженню, дістав назву потенціалу дії (*ПД*).

Процеси збудження в різних клітинах відрізняються один від одного тільки своєю швидкістю і типом збудження йонів. Найкраще вивчено збудження нервової клітини, основну роль в якому відіграють йони натрію. Йони рухаються по своєрідних отворах – каналах (мал. 2). Кожен йон має “свій” канал. Пропускна здатність каналу мембрани нервової клітини різко зростає зі збільшенням потенціалу  $\varphi$  внутрішньоклітинного середовища. Досліди, проведені з радіоактивним ізотопом  $^{24}\text{Na}$ , встановили, що порівняно з незбудженим станом, внаслідок збудження коефіцієнт проникності для натрію зростає в 500 разів! Відповідно, різко зменшується опір мембрани.



Мал. 2

Нехай завдяки збудженню нам вдалося збільшити потенціал  $\varphi$ . Відразу зростає пропускна здатність натрієвого каналу, порція йонів зайде в клітину, завдяки чому знизиться амплітуда *ПС* калієвого сигналу (відбувається деполяризація внутрішньої мембрани), а, отже, ще більше зростає пропускна здатність натрієвого каналу. Відтак, невелике початкове збільшення потенціалу  $\varphi$  призводить до вибухоподібного процесу, наслідком якого є зрос-

тання проникності мембрани для йонів натрію, що в десятки разів перевищує проникність для йонів калію. Це зумовлено тим, що кількість натрієвих каналів у мембрані майже в 10 разів перевищує число калієвих. Використовуючи вираз (3) і замінивши  $\text{K}^+$  на  $\text{Na}^+$  з відповідними концентраціями цих йонів всередині й зовні клітинної мембрани, отримаємо для потенціалу дії  $\Delta\varphi_{\text{м}}^{\text{Na}^+} \approx 60$  мВ, що узгоджується з низкою експериментальних результатів.

Амплітуда *ПД* нервових і м'язових волокон перебуває в межах 60–120 мВ, тривалість змінюється в широкому діапазоні від 0,1–1 мс для нервових клітин теплокровних тварин до 50–600 мс для волокон м'язів серця. Після короткотривалого скачка *ПД* натрієвий канал закривається, але водночас зростає проникність для йонів калію, що сприяє відновленню попереднього до збудженого стану – потенціалу спокою.

Потенціал дії – один з найважливіших складових процесу збудження. В нервових клітинах він забезпечує проведення збудження через чутливі закінчення (рецептори) до нервової клітини, а від неї до синаптичних закінчень, які розміщені на різних нервових, м'язових та ін. клітинах.

**3. Біопотенціали рослин.** Усі рослини здатні до повільних “ростових згинів”, потрібних для того, щоб адаптуватися до освітлення, напрямку сили тяжіння тощо. Такі рухи зумовлені неоднаковою швидкістю росту різних боків відповідного органу. До того ж, деякі рослини здійснюють добові періодичні рухи, інші можуть швидко реагувати на різноманітні зовнішні чинники – світло, дотик, коливання тощо. Відкрито немало інших дивовижних властивостей у рослин. Наприклад, якщо надрізати корінь гарбуза, то виникає електричний імпульс. Ще більший імпульс спостерігається, коли проросле зерно ячменю занурити в гарячу воду. Встановлено також, що рослини





мають елементи пам'яті. З'ясувалося, що огірки, квасоля, картопля, пшениця та ін. запам'ятовують частоту спалахів світла. Після серії світлових імпульсів рослини відтворювали заданий ритм з винятковою точністю.

Вирішальну роль у реакції рослин на зовнішні подразники відіграють електричні процеси. У клітинах рослин, подібно до тваринних, між внутрішньою і зовнішньою поверхнями мембрани теж виникає різниця потенціалів 80–100 мВ завдяки різному йонному складу і проникності йонів через мембрани. Під дією зовнішніх подразників мембрана рослинної клітини збуджується зростає її проникність для йонів, переважно кальцію. Тобто, ту роль, яку відіграють йони  $\text{Na}^+$  у клітинах тварин, тут відіграють йони кальцію  $\text{Ca}^{++}$ . Механізм збудження теж подібний, тільки змінюється співвідношення йонів  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  та ін., які беруть участь у транспортних переносах. Зате тривалість потенціалу дії в рослинних клітинах у сотні разів довша, ніж у тваринних і може продовжуватися  $\sim 20$  с.

До речі, йони кальцію відіграють унікальну роль у процесах життєдіяльності. Вони керують не тільки майже всіма функціями клітини, а й її життєвим циклом загалом. Ефективність такого керування ґрунтується на здатності живих клітин підтримувати в цитоплазмі мінімальний (наномольний!) рівень йонів кальцію у вільному стані, витрачаючи на усунення їхнього надлишку значну частину своєї метаболічної енергії. Якщо порушується робота механізмів, що підтримують потрібний баланс, ті ж самі йони можуть перетворитися на ефективну зброю знищення клітини. Воістину кальцій – йон життя, йон смерті.

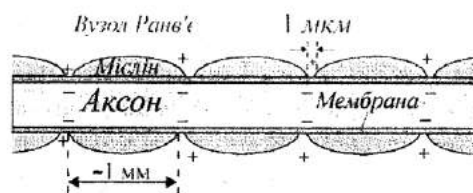
Біоелектричні процеси деревних рослин, на відміну від тваринних організмів і трав'янистих видів, вивчені значно менше. БЕП, які генерують деревні рослини тісно пов'язані з процесами обміну речовин і можуть виступати показниками їхньої життєвості. Щоб виз-

начити фізіологічний стан дерев, вимірюють різницю біопотенціалів між кореневою шийкою та вершиною рослини поточного або попереднього років.

#### 4. Розповсюдження нервового імпульсу.

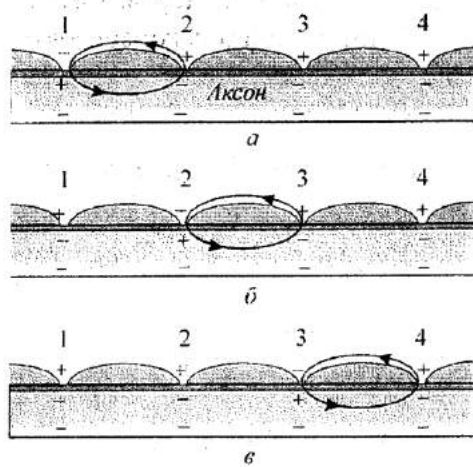
Природа придумала для обміну інформацією між різними частинами живого організму дві різні системи зв'язку. Перша ґрунтується на дифузії або перенесенні з потоком рідини біологічно активних речовин з місця, де вони синтезуються, по всьому організму. Ця система є єдиною у найпростіших організмах, а також у рослинах. Їй притаманна велика інерційність, тому непридатна для вищих організмів.

У багатоклітинних організмах, крім першої, існує й друга, нервова система. Нервове збудження розповсюджується по нейронах у вигляді електричних імпульсів, що виникли як результат потенціалу дії. Як бачимо, живий організм є електрифікованою системою. Завдяки електриці існує життя.



Мал. 3

У XIX сторіччі вважалося, що струм розповсюджується вздовж нервових волокон як по звичайних електричних провідниках. Згодом з'ясувалося, що швидкість розповсюдження нервового імпульсу становить лише 1–100 м/с. Не підтвердилась і гіпотеза про розповсюдження вздовж нервових волокон хемічної реакції. Щоб зрозуміти механізм передачі нервового імпульсу, розгляньмо, як облаштоване нервове волокно. Аксон (нервове волокно) можна розглядати як циліндр, бічну поверхню якого утворює мембрана. Аксони оточені мієліновою (жировою) оболонкою (мал. 3), яка захищає його від довколишнього середовища.



Мал. 4

Мієлінова оболонка переривається через кожні 1–2 мм довжини аксона звуженнями – вузлами Ранв'є (“сосисочний ланцюжок”), довжиною майже 1 мкм. У місцях вузлів мембрана аксона безпосередньо контактує з доволі високим середовищем. Мієлінова оболонка збільшує товщину мембрани та її опір. Останній на одиницю довжини волокна діаметром 1 мкм становить  $10^9$ – $10^{10}$  Ом·см, тобто перевищує опір мідної дротини такого ж діаметра в  $10^8$  разів. Утворений у такому нервовому волокні імпульс мав би згаснути на короткому проміжку. Водночас аксон передає первинний імпульс на відстані до одного й більше метрів без згасання і без жодних спотворень.

Для зменшення втрат найпростіше було б збільшити діаметр нервового волокна. Таким шляхом природа пішла, наділивши нервові волокна кальмара гігантськими розмірами, діаметр яких становить не менше 0,5 мм. Завдяки цьому досягається швидка передача збудження і вводяться в дію захисні функції з виявленням небезпеки. Для вищих тварин такий шлях призвів би до відведення великих об'ємів їхніх організмів для нервових волокон. Отже, аксон не може працювати як звичайний лінійний провідник струму. Природа пішла іншим шляхом. Цей механізм вдалося з'ясувати в середині ХХ сторіччя.

Як вже згадувалося, в стані спокою внутрішнє середовище аксона характеризується негативним зарядом відносно зовнішнього середовища, завдяки чому створюється потенціал спокою. З накладанням на мембрану стимулюючого потенціалу, зростає її проникність для йонів  $\text{Na}^+$ , а відтак, має місце переполяризація мембрани і виникнення потенціалу дії. Нехай цьому збудженому стану відповідає ділянка 1 (мал. 4, а). Зовнішня поверхня мембрани заряджена в цьому випадку негативно, а внутрішня – позитивно.

Ділянка 2 перебуває у стані спокою. Між точками 1 і 2 створюється різниця потенціалів і виникає струм, що тече в напрямку від незбудженої 2 до збудженої ділянки 1 (мал. 4, а). Після відновлення попереднього потенціалу вузла 1, паралельно відбувається переполяризація вузла 2. Останній стає проникним для йонів  $\text{Na}^+$  і формується черговий потенціал дії в цій новій точці, відповідно. Генерується новий скачок струму на ділянці 2–3 (мал. 4, б). Згодом у ланцюжок під'єднують наступні вузли 3–4 (мал. 4, в). У процесі стрибкоподібних передач збудження переміщується з положення 1 в положення 4. Отже, збудження – це по суті регенеративне підвищення проникності мембрани для йонів натрію, яке поширюється на щораз нові ділянки мембрани внаслідок замикання колових струмів.

Через нижчий опір мембрани у вузлах Ранв'є порівняно з мієліновою оболонкою, колові струми замикаються між сусідніми вузлами нервового волокна. Це означає, що потенціали дії генеруються мембраною волокна тільки в вузлах Ранв'є і поширюючись перескакують з одного вузла на інший. Водночас з цим відбувається підсилення імпульсу. Тому передача нервового збудження зводиться до проведення незгасаючого електричного імпульсу. Його тривалість постійна і становить  $\sim 1$  мс, а передана інформація може бути найбільше вигадливо закодована в послідовності цих імпульсів.





З огляду на викладене, потенціал дії, через його здатність поширюватись нервовими волокнами, треба радше розглядати як одиничний елемент коду в передаванні команд та інформації загалом. Отже, нервові волокна вкупі з вузлами Ранв'є є високошвидкісним та економним каналом зв'язку в нервовій системі.

Внаслідок потенціалу дії та розповсюдження нервового імпульсу вздовж збудженого волокна відбувається "відтік" іонів натрію з позаклітинного середовища, а іонів калію з клітини. Для компенсації "втрат" і повернення системи в стаціонарний стан вступає в дію, як згадувалося, натрій-калієва помпа. Це мембранні білки, які виконують роль ферментів аденозинтрифосфатази (АТФ-фази). Ферменти розщеплюють АТФ на АДФ та неорганічний фосфат. Головним результатом розщеплення є вивільнення енергії, яка витрачається на транспорт іонів в напрямі зростання калієвого та натрієвого потенціалів, тобто зростання концентрацій іонів  $K^+$  всередині клітини, а  $Na^+$  за її межами, отже, досягається відтворення початкового стану. Розщеплення АТФ стимулюється наявністю іонів  $Mg^{++}$ .

Перенесення збудження в рослинних клітинах відрізняється від тваринних. Рослинні клітини є розчинами солей, оточені мембраною, добре проникною для води. Внаслідок дифузії води, тиск всередині клітини зростає і може досягати  $5 \cdot 10^6$  Па, що в 50 разів вище від атмосферного. Зменшення концентрації іонів калію всередині клітини в процесі збудження супроводжується падінням внутрішньоклітинного тиску.

Нехай один з листяних черешків складається з двох поздовжньо розміщених груп клітин (мал. 5, а), а збудження охоплює тільки нижню групу клітин. Внаслідок збудження нижня частина черешка частково ослабне, а набубнявіла верхня його частина згинає чере-

шок (мал. 5, б). За таким же механізмом може відбуватися рух інших частин рослини. Електричні сигнали, що розповсюджуються рослиною, є, як і у випадку з тваринами, важливим засобом зв'язку між різними клітинами, координуючи їхню активність. Швидкість поширення таких сигналів незначна.

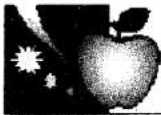


Мал. 5

Біоелектричні потенціали знаходять широке використання. Вимірюючи біоелектричні потенціали від окремих нервів або частин рослин, можна отримати інтегральний результат дії фізико-хімічних і фізіологічних процесів у живих системах. У медичній практиці вони розвинулися в такі важливі методи діагностики, як електрокардіографія, електроенцефалографія, електроміографія тощо.

У комплексі морфологічних показників БЕП можуть бути використані як ефективний критерій відбору дерев з господарсько цінними ознаками для створення високопродуктивних лісових, декоративних та сільськогосподарських культур.

З викладеного ще раз переконуємось у слушності передбачення академіка Національної академії наук України Вадима Локтева, що фізика неживих об'єктів, залишаючись важливою ділянкою фізичної науки, поступово віддаватиме пальму першості фізиці живого.



## ВУГЛЕЦЕВІ НАНОТРУБКИ В ЕЛЕКТРОНІЦІ \*

Федон Аворіс (Phaedon Avouris),  
Дослідницький центр (Нью Йорк, США)

Раніше вуглецеві нанотрубки були лише предметом теоретичного дослідження, а нині вони входять до складу вимикачів, транзисторів і приладів, що випромінюють світло та мають надзвичайно корисні властивості.

Від мобільних телефонів і ноутбуків до Ікс-боксів і АйПодів – всі сфери сучасного життя так чи інакше пов'язані з новітніми досягненнями електроніки, комунікацій та комп'ютерної техніки. Цей прогрес став можливим завдяки найменшим електронним приладам, особливо, якщо мова йде про кремнієві польові транзистори, які поклали край містким, повільним енерговитратним мережам. Проблема полягає в тому, що процес зменшення чи “масштабування” не може тривати вічно, існують фундаментальні наукові і технологічні обмеження, які не дають змогу створити кращі та ще менші кремнієві прилади.

Це вражаюче досягнення підштовхнуло світ до розроблення альтернативних технологій для створення приладів з одновимірних (1D) матеріалів або з тих, що використовують в електроніці і обертання спіна, як заряд. Один багатообіцяючий і, по суті, найпростіший підхід полягає в тому, щоб залишити принцип роботи тих польових транзисторів, що вже існують, але замінити їхній основний компонент, напівпровідниковий кремнієвий канал, 1D наноструктурами з ширшими електричними властивостями.

Серед різноманітності 1D матеріалів найкращі властивості мають “одностінкові” вуглецеві нанотрубки. Першу таку трубку створили Суміо Іджіма з корпорації NEC у Лабораторії фундаментальних досліджень (м.Текуба, Японія), і Дональд Бес'юн з Дослідницького центру Альмаден корпорації IBM у Каліфорнії.

\*Phaedon Avouris. *Electronics with carbon nanotubes*/ “Physics World”, 2007. – P. 40–45.  
Переклала з англійської Анастасія Бистра.

- **Вуглецеві нанотрубки** – це крихітні циліндри, зроблені з площин графену, що міститься в графіті. Вони з'явилися на початку 1990-х років.
- Маленькі 1D трубки дуже міцні. Вони мають добрі електронні властивості, що дають змогу вченим на їхній базі створити надшвидкий польовий транзистор.
- Нещодавно дослідникам вдалося створити транзистор, який передає або електрони, або дірки, чи навіть і те, й інше.
- Вуглецеві нанотрубки, в яких є лише один тип носія заряду, можна використовувати як дуже яскравий світлодіод.
- Нанотрубки також можна використовувати як звичайні сонячні батареї, що перетворюють світло на пари електрон-дірка.





Це порожнисті трубки, зроблені із згорнутого графену (площин вуглецю завтовшки один атом). Одноштовкові нанотрубки складаються лише з однієї згорнутої площини, а в багатоштовкових нанотрубках є декілька трубок, що вкладені одна в одну.

Нанотрубки – це ідеальний 1D матеріал, оскільки їхня довжина може коливатися від кількох мікронів до сантиметрів, а діаметр становить лише 1–2 нм. Не менш важливими вони є і для інженерії: трубки надзвичайно міцні (модуль Юнга трубки в 10 разів перевищує показник сталі) і добре проводять тепло. Але саме через електричні властивості вуглецеві нанотрубки стали цікавими для електроніки. Залежно від розташування атомів вуглецю нанотрубки можуть бути або металами, або напівпровідниками (останні є основою нових надшвидких польових транзисторів).

До того ж, з часом ми зможемо створити електронну мережу, в якій транзистор міститиме напівпровідникові нанотрубки, а об'єднуюча лінія складатиметься з металевих нанотрубок.

Уже сьогодні ми можемо використовувати вуглецеві нанотрубки для генерації та виявлення світла. За допомогою лише зміни напруги з вуглецевих нанотрубок можна створити прилад, який буде і транзистором, і джерелом і детектором світла, до того ж останній відкриває шлях до одномолекулярної спектроскопії. Вуглецеві нанотрубки зможуть також посилати світлові імпульси з одного мікрочіпа до іншого, а, отже, один матеріал слугуватиме і електричним, і оптоелектронним технологіям.

### Особливі властивості

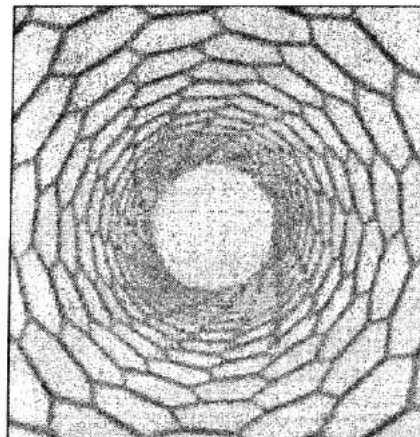
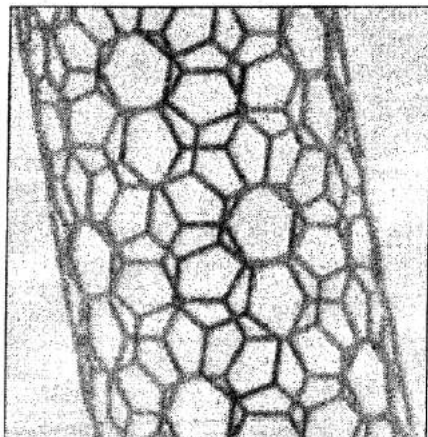
Електричні властивості вуглецевих нанотрубок можна пояснити незвичною електронною будовою графену – гексагональні ґратки з одного шару атомів вуглецю. Найкраще різни-

цю між графеном і звичайним напівпровідником можна зрозуміти, розглянувши енергетичні рівні носіїв заряду (електронів чи дірок), які групуються в кількох зонах. Наприклад, матеріал може бути напівпровідником *n*-типу, коли електрони переходять із заповненої носіями зони (зона валентності) до вільної від носіїв (зона провідності). Між ними знаходиться заборонена зона.

Завдяки гексагональній будові графену зони валентності та провідності дотикаються в 6 окремих точках. Коли ж площини графену згортають у вуглецеві нанотрубки відбуваються незвичні речі. Тепер електрони обмежені в русі по колу в трубці, тому що складова швидкості руху по колу,  $k_{\varphi}$ , є квантованою і дорівнює  $2\pi n/C$ , де  $n$  – ціле число, що не дорівнює нулеві, а  $C$  – коло. З іншого боку, електрони можуть вільно рухатися вздовж трубки і в такому разі складова швидкості руху в цьому напрямку постійно змінюється.

Проте квантування  $k_{\varphi}$  призводить до того, що в кожній трубці енергетичні підзони мають (дискретний) переривчастий характер, і залежно від структури графену, зумовлює те, що трубка є або металом, або напівпровідником.

Як і всі макроскопічні структури, нанотрубки мають певний опір, ємність та індуктивність; ці чинники визначають її взаємодію з іншими об'єктами. Ці властивості мають велике значення, оскільки саме вони визначають, як працюватиме прилад з нанотрубок. Загальний опір трубки відносно малий, тому що електрони в ній майже не розсіюються на дефектах чи коливаннях ґраток, які є основним джерелом опору в провідних матеріалах. Однак вуглецеві нанотрубки внаслідок зв'язків з будь-якими макроскопічними металевими електродами отримують додатковий, квантовий опір. Є й інша форми контактного опору, наприклад, паразитний опір, що виникає зав-



дяки поганих зв'язків, або опір завдяки бар'єрові Шоттки на поверхні між металевими електродами і напівпровідниковими нанотрубками.

Ще одна унікальна властивість вуглецевих нанотрубок полягає в тому, що в трубці нема розсіяння електронів, і вони рухаються "балістично". Іншими словами, вони рухаються без затрат енергії. В такому разі відстань, на якій нанотрубка може бути провідником, залежить від різних чинників – температури, досконалої структури і величини електричного поля. За звичайних умов електрони можуть балістично подолати понад 100 нм – ідеальна відстань для сучасних електронних засобів. Коли нанотрубка подовжується чи поле збільшується, тоді електрони починають розсіюватись, а, досягнувши певної межі, нанотрубки починають поводитися як звичайні матеріали. Проте розробники надшвидких електронних пристроїв радіють тому, що навіть у таких довгих трубках електрони в сотню разів рухливіші, ніж у кремнії.

### Нанотрубки – електричні вимикачі

Головна привабливість напівпровідникових вуглецевих нанотрубок полягає в їхній здатності вмикати та вимикати струм, а це означає, що їх можна використовувати як новий матеріал для транзисторів. Звичайні польові транзистори ввійшли в наше життя ще на початку 1960-х. Зазвичай вони склалися з шматка напівпровідника, який називають каналом; двома кінцями він приєднаний до металевих електродів: з одного боку розташований витік, а з іншого – стік. Між каналом та вхідним електродом знаходиться заслінковий діелектрик, тонка плівка з двоокису кремнію.

Коли до заслінки подають напругу (залежно від її полярності) енергетичний бар'єр для носіїв у напівпровіднику зменшується або зростає. Позитивна напруга в напівпровіднику *p*-типу, де носіями заряду є дірки, підвищить бар'єр у зоні валентності до такої межі, що дірки не зможуть рухатися – транзистор вимкнено. Негативна напруга в заслінці зменшить бар'єр і ввімкне транзистор. У напівпровіднику *n*-типу електрони проходять крізь зону провідності.



Дослідники Інституту технологій у Дельфті (Нідерланди) 1998 року створили першу карбонову нанотрубку. Ці пристрої діяли так само, як і звичайні польові транзистори, але замість кремнієвого каналу в них були кілька напівпровідникових нанотрубок. Нанотрубки як матеріал для каналів мають декілька переваг. Насамперед вони проводять балістично, що допоможе у створенні швидших пристроїв, по-друге, вони добре з'єднують електричне поле заслінки та каналу, а це означає, що здатність контролювати струм у каналі за допомогою заслінки не залежатиме від довжини пристрою.

Вуглецеві нанотрубки також мають гладку поверхню, отже, дефекти не спричинять розсіяння, яке могло би вплинути на рухливість носіїв заряду. До того ж, всі атоми вуглецю на поверхні зчеплені між собою, тому в матеріалі нема вільних зв'язків, які б затримували небажані заряди. Хоча зазвичай у транзисторах використовують двоокис кремнію, щоб уникнути появи вільних кремнієвих зв'язків, для заслінкового діелектрика можна застосовувати й інші матеріали. Електроніка докладає чималих зусиль, щоб перейти від двоокису кремнію до діелектриків з вищими константами, як це зробили компанії IBM та Intel, створивши нове покоління транзисторів з гафнієвими діелектриками.

### Як працює транзистор?

Ще одна цікава властивість польових транзисторів з вуглецевих нанотрубок полягає у їхній природній амбіполярності, тобто через канал можуть одночасно проходити і електрони, і дірки. Звичайні ж транзистори є однополярними, тому вони можуть пропускати або електрони, або дірки. Це пояснюється різницею роботи виходу нанотрубки від контактів металів між каналом, витокком і стоком, які зазвичай виготовляють з паладію, золота,

титану чи алюмінію. Заряд рухається по поверхні доти, доки два рівні Фермі не зрівняються. Так виникає електричний диполь, який не дає змогу заряду рухатися далі, і створює бар'єр Шотткі.

У транзисторі з вуглецевих нанотрубок є два таких бар'єри – один на витокці, а другий – на стоці. Деколи польовий транзистор з нанотрубок може бути однополярним і переносити лише один тип носіїв. Це залежить від розміру бар'єрів для різних носіїв заряду. Наприклад, паладій має високу роботу виходу, а, отже, зона валентності карбонової нанотрубки наближається до рівня Фермі в металі. Бар'єр у витокці тоді низький, а за цих умов дірки рухаються в контакт майже вільно. Проте електрони, які намагаються потрапити в канал через інший контакт натрапляють на вищий бар'єр. І навпаки, якщо контакти зроблені з металу з низькою роботою виходу, наприклад, з алюмінію, зона провідності наближатиметься до рівня Фермі для металів, і рухатимуться не дірки, а електрони.

Насправді все виглядає складніше, оскільки рух носія по межі між металом та нанотрубкою залежить не від температури, а від квантово-механічного тунелювання крізь бар'єр Шотткі. Іншими словами, важлива не лише висота, а й товщина бар'єру. Якщо бар'єр достатньо тонкий, то рухатимуться і дірки, і електрони. У таких амбіполярних транзисторах дірки рухаються, якщо напруга заслінки є негативною, а якщо напруга позитивна, то рухатимуться електрони. Коли напруга заслінки є такою, що струм мінімальний, то в ньому рухаються обидва типи носіїв. Коли напруга заслінки знаходиться посередині між показником витокці і стоку, то потоки електронів і дірок однакові.

Транзистори з вуглецевих нанотрубок зазвичай амбіполярні, особливо якщо трубки мають великий діаметр чи на заслінці є тонкий шар оксиду. Однак амбіполярні транзистори





неможливо повністю ввімкнути чи вимкнути, тому їх не використовують для створення приладів, які здійснюють логічні операції. У таких транзисторах можна лише змінювати тип носія.

На щастя, існує два шляхи, як змінити амбіполярний характер приладу і досягти чіткого ввімкнення чи вимикання:

1. Використовувати вуглецеву нанотрубку з двома заслінками (одна заслінка вибірково стоншує бар'єри Шотткі, а інша вмикає чи вимикає прилад).

2. Хемічний підхід: у зони контактів на поверхню нанотрубки поміщають молекули з донорними або акцепторними властивостями.

Однак розбіжності в кількості та місці додаткових молекул можуть дуже впливати на функціонування приладу. Тому дослідники працюють над створенням вуглецевих нанотрубок без додатків, амбіполярний характер яких можна було б контролювати.

### Освітлення

Одне з найзахопливіших відкриттів у сфері вуглецевих нанотрубок було зроблено нещодавно – з'ясувалося, що трубки можуть випромінювати світло. Цей винахід відкриває двері до мереж, в яких стандартні мідні провідники буде замінено на оптичні хвилеводи з нанотрубок, тобто мережі стануть оптоелектронними.

Відомо, що електрони і дірки в напівпровіднику можуть рекомбінуватися так, що виділятиметься або тепло (у формі фононів), або світло (у формі фотонів). Цей процес рекомбінації зумовлює електролюмінесценцію, основу твердотільного джерела світла, наприклад, світлодіодів. Щоб збільшити інтенсивність світла в світлодіоді, треба пропустити одночасно якомога більше дірок та електронів. Теоретично це можливо зробити, поєднавши *p*-леговані та *n*-леговані напівпровідники.

Але в амбіполярних транзисторах з вуглецевих нанотрубок в один канал одночасно можуть поступати обидва носії зарядів. Оскільки нанотрубки належать до 1D матеріалів, то рух носіїв обмежений. До того ж, вони рухаються в напрямку один до одного, даючи змогу так збільшувати інтенсивність світла.

Джеймсові Місевичу та його колегам з корпорації IBM 2003 року пощастило вперше спостерігати за рекомбінацією в транзисторах з вуглецевих нанотрубок. Хоча подібний процес випромінення світла відбувається в світлодіодах, є одна важлива відмінність: вуглецеві нанотрубки нелеговані, тому їх легше виготовляти. А найкраще те, що світло випромінюється не з одної точки вздовж трубки, оскільки немає *p-n*-переходу. Натомість випромінення залежить від заслінкової напруги. Іншими словами, вуглецеві нанотрубки можуть використовувати на мікронному рівні як надмалі джерела світла.

Навіть в одностінковій нанотрубці, що працює як однополярний транзистор, є локалізовані точки електролюмінесценції. Оскільки світло випромінюється лише коли є і дірки, і електрони, то існує припущення, що вони якось генеруються в цих точках. До складу цих світлогенеруючих точок входять різноманітні дефекти в заслінковому діелектрику і на стику матеріалів з різними діелектричними константами, які призводять до перепадів напруги в нанотрубці, а, отже, утворюють великі локальні електричні поля. Ці поля можуть настільки збільшувати енергію електрона, що він, потрапивши в провідникову зону з нижчою енергією й утворивши пару дірка-електрон, втрачатиме трохи енергії.

Це "імпульсне збудження" у вуглецевих нанотрубках надзвичайно сильне. Їх багато досліджують, тому що однополярні джерела світла виявилися яскравішими, ніж амбіполярні. До того ж, можливо створити ланцюгову реакцію. Носії, що з'явилися внаслідок збуд-



ження, пришвидшуватимуться завдяки впливові електричного поля і створюватимуть нові електрони і дірки та зростатиме випромінення світла.

Недавно в IBM показали, як можна застосувати імпульсне збудження в приладах, що випромінюють світло. У каналі вуглецевої нанотрубки вирізали канавку, а, отже, між каналом і заслінкою зник заслінковий діелектрик. Тому в певній точці напруга в каналі різко падає. Подібне переривання розганяє електрони так, що вони можуть набувати достатньої енергії, щоб подолати поріг імпульсного збудження і випромінювати яскраве світло, корисна дія якого в 1000 разів перевищуватиме показник звичайних комбінацій в однополярних польових транзисторах. Таке світло потрібне для міжчипової комунікації та одномолекулярної спектроскопії.

Прилади з локалізованою електролюмінесценцією можна також використовувати як аналітичний інструмент для знаходження пошкоджень власне нанотрубок чи заслінкового діелектрика. Нині дефекти нанотрубок, які входять до складу приладів, важко знайти, оскільки до них не застосовують жоден з відомих видів сканування.

Врешті решт, вуглецеві нанотрубки можна використовувати як фотопровідники, в яких за допомогою світла утворюватимуться вільні електрони та дірки. Оскільки струм утворюється в трубці завдяки резонуючому збудженню, то їх можна використовувати як надмалі фотодетектори, фотоперемикачі чи інструменти для спектроскопії. Під дією сонячного світла у нанотрубці з'являтиметься фотонапруга, а, отже, вона працюватиме як сонячна батарея.

Отже, варто лише змінити електроживлення – і одна вуглецева нанотрубка може бути і транзистором, і світлодетектором, і джерелом світла чи напруги.

### Майбутнє за трубками

Нанотрубки мають й інше застосування. Із нанотрубкових транзисторів, додавши хемічну групу, яка чіпляється до певних біологічних молекул, можна виготовляти біосенсори. Коли біомолекула приєднується до трубки, вона змінює електричне поле заслінки, а, отже, і струм, що проходить крізь пристрій.

Тож які відкриття чекають нас у майбутньому?

Головна перешкода на шляху до розвитку нанотрубової електроніки та фотоніки – це сам матеріал. Як й інші наноматеріали, нанотрубки мають різну будову і розмір. Проблема полягає в тому, що нині ми не маємо надійного способу виготовлення одного виду нанотрубок. Хоча зрештою такі технології ймовірно з'являться, деякі вчені вже повідомили про виокремлення одного типу нанотрубок із суміші.

Вуглецеві нанотрубки також дають нам змогу вивчати електричні та оптичні явища на рівні нанометрів. Упродовж довгого часу 1D матеріали та їхні незвичайні властивості досліджувалися лише теоретично, нині ми можемо експериментувати з ними. Дослідження нанотрубок дає змогу дізнатися більше про виробництво та використання наноматеріалів, допомагає розвивати нанотехнології загалом. Завдяки нанотрубкам ми безсумнівно отримуватимемо нову інформацію про фізику на нанорівні.

---

*Кожен видатний дослідник вписує своє ім'я в історію фізики не лише власними відкриттями, а й тими, до яких він спонукав інших.*

Макс Планк



*До 100-річчя від дня народження  
Нобелівського лауреата  
з фізики 1956 року  
Вільяма Б. Шоклі*

## Вільям Шоклі – автор відкриття транзисторного ефекту

**Галина Шопа**

*Львівський національний університет  
імені Івана Франка*

**Ш**оклі Вільям Брандфорд народився 13 лютого 1910 року в Лондоні (Велика Британія) в сім'ї інженера Вільяма Гілмена Шоклі. Коли хлопчикові було три роки, сім'я повернулася до США й оселилася в Пало-Альто (штат Каліфорнія), де Вільям одержав початкову освіту. Під впливом сусіда, який викладав фізику в Стенфордському університеті, батьки заохочували хлопця до вивчення фізики.

Закінчивши 1927 року середню школу в Голлівуді, В. Шоклі вступив до Каліфорнійського університету в Лос-Анджелесі, а за рік перейшов до Каліфорнійського технологічного інституту. Закінчивши інститут, він 1932 року здобув ступінь бакалавра. На учительську стипендію В. Шоклі навчався в аспірантурі Массачусетського технологічного інституту, де вивчав фізику твердого тіла. Його праця з кристалів стала підґрунтям для подальшої наукової діяльності. В. Шоклі 1936 року захистив докторську дисертацію на тему: "Обчислення хвильових функцій електронів у кристалах хлориду натрію" і почав працювати у Дослідній лабораторії телефонної компанії "Белл" у Мюррей-Гіллі (штат Нью-Джерсі). Його першим завданням стало проектування електронного підсилювача. Згодом В. Шоклі працював у галузі фізики



*Вільям Брандфорд Шоклі  
(William Bradford Shockley)  
(13.02.1910–12.08.1989)*

твердого тіла і 1939 року запропонував план розроблення твердотільних підсилювачів як альтернативи до вакуумних електронних ламп. Його проект не здійснився через відсутність на той час потрібних матеріалів, але основний задум збігався з напрямом досліджень лабораторії "Белл" – розвитком телефонного зв'язку через заміну механічних перемикачів на електронні.

Під час Другої світової війни В. Шоклі працював над військовими проектами. У 1942–1944 рр. він виконував обов'язки наукового керівника в дослідницькій групі, яка вивчала шляхи боротьби з підводними човнами, у 1944–1945 рр. – був консультантом при канцелярії військового міністра. На новому місці праці військові завдання аналізували і вирішували науковими методами, наприклад, розроблення оптимальних схем скидання глибинних бомб під час полювання за підводними човнами або вибір цілей і оптимального часу для бомбування авіацією.

В. Шоклі 1945 року повернувся до лабораторії "Белл" як директор програми наукових досліджень з фізики твердого тіла. До колективу, який вивчав ці проблеми, входили фізик-теоретик





Дж. Бардін і фізик-експериментатор В. Браттейн. Вони продовжили розпочаті перед війною дослідження напівпровідників.

Напівпровідники мають електропровідність, проміжну між електропровідністю провідників (до них належить більшість металів) й ізоляторів. Електропровідність напівпровідників дуже залежить від температури, а також від природи і концентрації домішок у матеріалі. Напівпровідники тоді уже використовували як випрямлячі – пристрої, що проводять (електричний струм лише в одному напрямку) і тому здатні перетворювати змінний струм на постійний. Ще в перших радіоприймачах для детектування радіосигналів використовували контакт між металом і напівпровідником.

Згодом такі кристалічні детектори замінили електронними лампами, які стали найважливішими та найпоширенішими електронними пристроями. Поява підсилювальних ламп дала змогу розвиватись електронній промисловості. Однак електронні лампи мали низку недоліків: термін роботи ламп був порівняно короткий; для підігріву катодів потрібні були додаткові витрати енергії; крихкі скляні балони займали великий об'єм. В. Шоклі з колегами сподівались усунути ці недоліки, створивши напівпровідний підсилювач.

Хоча застосування квантової теорії до фізики твердого тіла давало якісне розуміння властивостей напівпровідників, теорія не була адекватно підтверджена експериментами. В. Шоклі намагався відтворити основний принцип роботи електронної лампи, прикладаючи електричне поле впоперек напівпровідника, щоб керувати електричним струмом, який проходить крізь нього. Хоча розрахунки науковця показували, що таке поле має керувати струмом, отримати практичні результати йому не вдавалось. Дж. Бардін висунув передбачення, що електрони, напевно, захоплюються у поверхневому шарі, це перешкоджає проникненню поля всередину напівпровідника. Науковці провели низку експериментів з вивчення поверхневих ефектів і краще зрозуміли фізичні процеси в напівпровідниках.

Було відомо, що провідність у напівпровідниках здійснюють носії зарядів двох типів: електронами та “дірками”. Електрони, що беруть участь у провідності, – це вільні електрони, які втратили зв'язок з атомами твердого тіла. Дірки – це елект-

ронні вакансії у валентних зв'язках. Ці вакансії можуть заповнювати електрони сусідніх атомів і вакансія може рухатись по кристалу. Оскільки електрон має від'ємний заряд, незаповнений електронний стан поводить як додатний заряд такої ж величини. Група В. Шоклі встановила, що внесок діркового струму в повний струм, зазвичай, недооцінюють. Уведені в чистий кристал деякі домішки створюють умови для переважання електронної або діркової провідності. Тобто шляхом відповідного легування у напівпровідниках формується *n* (електронний) або *p* (дірковий) тип провідності.

Дж. Бардін і В. Браттейн 1947 року досягли перших успіхів, побудувавши напівпровідниковий транзистор. Прилад містив кристал германію *n*-типу з двома точковими індієвими контактами. У ділянці біля контакту завдяки дифузії індію тип провідності германію змінився на *p*-тип. Так сформувалась напівпровідникова структура *p-n-p* типу. До одного контакту (емітеру) прикладено невелику додатну напругу відносно ділянки *n*-типу (базис) і великої від'ємної напруги відносно другого контакту (колектора). Сигнальна напруга, яку подають на емітер разом з постійним зміщенням, передається зі значним підсиленням у коло колектора. Транзистор працює на принципі інжекції дірок у базу через контакт-емітер і їх руху крізь базу (де вони не встигають рекомбінувати з електронами, через її малі розміри) до колектора, де дірки без перешкод потрапляють у колектор і підсилюють колекторний струм.

Далі В. Шоклі запропонував замінити точкові контакти на випрямлювальні переходи між ділянками *p*- і *n*-типу в тому ж кристалі. Такий пристрій, який назвали площинним транзистором, виготовили 1950 року. Він містив тонку *p*-ділянку, що була розміщена між двома *n*-ділянками (всі ділянки мали окремі зовнішні контакти). Оскільки виготовляти площинний транзистор виявилось значно легше, а працював він надійніше, площинний транзистор зовсім витіснив транзистор із точковими контактами. Удосконалення методів вирощування, очищення та оброблення кристалів кремнію дало змогу втілити давню ідею В. Шоклі – створити транзистор на основі польових ефектів. Нині цей тип транзисторів найчастіше використовують в електронних пристроях. У промис-



ловості випускають кремнієві кристали, на кожному з яких вміщуються сотні тисяч транзисторів, що з'єднані в складні електронні схеми (інтегральні схеми). Поява таких мікросхем стимулювала швидкий розвиток комп'ютерної техніки, портативних засобів зв'язку, приладів керування тощо.

В. Шоклі, Дж. Бардіна і В. Браттейна нагородили Нобелівською премією з фізики 1956 року "за дослідження напівпровідників і відкриття транзисторного ефекту". На врученні премії член Шведської королівської академії наук, назвав їхнє досягнення "зразком передбачення, дотепності й наполегливості в досягненні мети". В. Шоклі працював у лабораторії "Белл" до 1955 року, останній рік керував дослідженнями з фізики транзисторів. Він також займав й інші посади – був викладачем Принстонського університету (1946), радником з науки Політичного комітету Об'єднаної комісії з досліджень і розвитку (1947–1949), членом науково-консультативного комітету армії США (1951–1963). В. Шоклі 1954–1955 рр. був запрошеним професором Каліфорнійського технологічного інституту, керівником наукових досліджень міністерства оборони США. У 1958–1962 рр. він був членом науково-консультативного комітету військово-повітряних сил США.

Залишивши лабораторію, В. Шоклі створив напівпровідникову лабораторію Шоклі (згодом транзисторну корпорацію Шоклі, яка входила до складу компанії "Бекман і інструменти") у Пало-Альто, яка розробляла транзистори й інші напівпровідникові прилади.

В. Шоклі 1962 року став членом консультативного наукового комітету при президентові США. Він входив до науково-консультативного комітету НАСА. Його 1963 року призначили першим професором інженерних і прикладних наук Стенфордського університету, де він викладав до 1975 року.

Викладаючи в Стенфордському університеті, В. Шоклі зацікавився проблемами наукового мислення. Його ідеї щодо поліпшення суспільства врешті-решт викликали суперечки серед учених-генетиків. Науковець був переконаний, що людству загрожує "погіршення роду", оскільки

в людей з нижчим коефіцієнтом розумового розвитку народжується більше дітей, ніж у людей з вищим коефіцієнтом. Його висловлювання, мали спочатку загальний характер, але згодом набули дещо расистського відтінку. Виступаючи в Американській національній академії наук 1970 року, він заявив, що дослідження, які він провів, "неминуче приводять до висновку про расово-генетичну основу проблеми негритянського населення Америки". За подібні погляди його різко критикували багато громадських діячів і учених, зазначаючи водночас, що наукова значущість досягнень Шоклі ніяк не може бути применшена його поглядами на генетику.

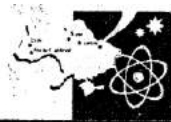
Крім праць з фізики напівпровідників і транзисторів, В. Шоклі зробив великий внесок у використання властивостей магнетних матеріалів для створення пам'яті комп'ютерів і розвиток електромагнетної теорії. Науковець цікавився пластичними властивостями металів, теорією меж кристалів (поверхонь, які розділяють маленькі кристалики, що утворюють полікристалічне тіло), порядком і безладом у сплавах. В. Шоклі отримав понад 90 патентів на винаходи.

Замолоду науковець захоплювався альпінізмом, до якого ставився не як до відпочинку, а як до проблеми, яку треба розв'язати, і наполегливо тренувався, готуючи себе до такого розв'язання. У зрілому віці В. Шоклі надавав перевагу вітрильному спорту і плаванню.

Крім Нобелівської премії, В. Шоклі нагородили медаллю уряду США "За заслуги" (1946), премією Морріса Лібмана Інституту радіоінженерів (1952), премією Олівера Баклі з фізики твердого тіла Американського фізичного товариства (1953), премією Комстока Американської національної академії наук (1954), медаллю Голлі Американського товариства інженерів-механіків (1963), почесною медаллю Інституту інженерів з електротехніки і електроніки (1980).

Науковець був членом Американської національної академії наук, Американського фізичного товариства, Американської академії наук і мистецтв, Інституту інженерів з електротехніки і електроніки.

Вільям Браттфорд Шоклі помер 12 серпня 1989 року.



До 75-річчя  
від дня народження  
Юрія Ранюка

## ФІЗИК, КРАЄЗНАВЕЦЬ, ІСТОРИК НАУКИ

**Олександр Бакай,**

*академік НАН України (ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут"),*

**Ярослав Довгий,**

*професор (Львівський національний університет імені Івана Франка),*

**Роман Пляцко,**

*доктор фіз.-мат. наук (Інститут прикладних проблем механіки і математики НАН України),*

**Галина Шопя,**

*Львівський національний університет імені Івана Франка*



**Н**аукова громадськість України 2010 року відзначила 75-річний ювілей видатного вченого, професора, фізика, популяризатора науки та пересічну особистість, автора унікальних книжок, дійсний член Наукового товариства імені Шевченка Юрія Миколайовича Ранюка.

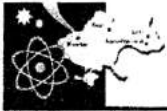
Юрій Миколайович Ранюк народився 2 червня 1935 року на Воронежчині, усе життя живе, навчався і працює на Слобожанщині. У нього завжди є високе почуття патріотиз-

му, витоком якого є його козацький родовід. *"Я ще з дитинства мріяв скласти свій родовід і років 20 тому став заглядати в Київський державний архів, бажаючи ознайомитись із козацькими реєстрами та Рум'янцевським переписом. Мене цікавили переписи Гадяцького полку, козаками якого, як розповідав мені дід, були наші предки"*<sup>1</sup>.

Ю. Ранюк 1958 року закінчив відділення ядерної фізики фізико-математичного факультету Харківського державного університету і почав працювати у Фізико-технічному інституті в Харкові (ХФТІ), де пройшов шлях від молодшого наукового працівника до керівника лабораторії відділу Фізики високих енергій. Його наукова діяльність присвячена експериментальним дослідженням фізики атомного ядра, які він здійснював майже на всіх чинних у ХФТІ пришвидшувачах протонів, важких йонів, електронів, на нейтронному генераторі, а також на пришвидшувачах інших інститутів. Уже перші його результати з дослідження взаємодії важких пришвидшених йонів з атомни-

<sup>1</sup>Фізичний збірник НТШ, 2008. – Т. 7. – С. 478.





ми ядрами, зокрема щодо повного розпаду ядер на  $\alpha$ -частинки, викликали значний науковий резонанс.

Згодом Ю. М. Ранюк досліджував електромагнетні взаємодії ядер на лінійних пришвидшувачах електронів на 360 МеВ та 2 ГеВ. До найвагоміших його наукових досягнень слід віднести результати вивчення поділу атомних ядер. Йому вперше вдалося здійснити поділ ядер і електронами, і позитронами та виконати систематичні дослідження фотоподілу ядер за гігантським резонансом, що дало змогу з'ясувати механізм цього цікавого процесу. На ці фундаментальні праці посилаються у світовій літературі й досі.

Ю. Ранюк 1967 року захистив кандидатську дисертацію на тему: "Поділ ядер фотонами і електронами високих енергій", 1976 року – докторську: "Фотоподіл і повні адронні перерізи фотопоглинання за порогом народження піонів". На тему поділу ядер Ю. Ранюк опублікував кілька оглядів. У видавництві "Наукова думка" 1989 року вийшла друком його монографія "Фотоподіл ядер за гігантським резонансом" (співавтор В. Г. Недорезов).

Від 1980 року Ю. Ранюк керує лабораторією, основним напрямом досліджень якої є вивчення атомного ядра за допомогою розсіяння електронів. Вагомі результати було отримано під час дослідження розсіяння електронів найлегшими ядрами – ізотопами водню та гелію.

Варто зазначити значний внесок Ю. Ранюка у розроблення оригінальних експериментальних методик. Під його керуванням та за його безпосередньої участі було створено систему реєстрації енергетичних втрат електронів на лінійному пришвидшувачі на 2 ГеВ, багатоканальну систему реєстрації швидких нейтронів та ін.<sup>2</sup>

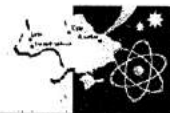
<sup>2</sup>Фізичний збірник НТШ, 1998. – Т. 3. – С. 521.

Високий авторитет та міжнародне визнання дають змогу Ю. Ранюку підтримувати широкі наукові зв'язки і в нашій країні, і за кордоном. Низку наукових досліджень виконав він разом із ученими Росії, Вірменії, а також США, Швеції, Японії, Нідерландів. Він автор понад 200 публікацій.

Нині, коли, з одного боку, можливості для проведення фундаментальних ядерно-фізичних досліджень в Україні суттєво зменшилися, а з іншого – з'явилися можливості для плідної праці на іноземних пришвидшувачах, проф. Ю. Ранюка можна зустріти у провідних лабораторіях світу. Останніми роками він часто буває у велетенському міжнародному ядерному інституті (ЦЕРНі), розташованому в передмісті Женеви на кордоні з Францією. Він один з найактивніших українських учасників проекту "Великий адронний колайдер".

Ю. Ранюк здійснює значну науково-організаційну роботу. Він, по-суті, заснував і незмінно очолює Харківський осередок НТШ, до складу якого входять два академіки, багато докторів і кандидатів наук. Був незмінним членом оргкомітету з проведення в Харкові міжнародних семінарів "Електромагнетні взаємодії ядер при проміжних енергіях" і редактором праць цих семінарів, був членом оргкомітету міжнародної конференції з ядерних треків (Дубна), членом Ювілейного комітету зі святкування 150-річчя від дня народження Івана Пулюя та членом оргкомітету міжнародної конференції, присвяченої цій даті. Активно працює в Українському та Американському фізичних товариствах, є членом декількох вчених рад та редакційних колегій журналів "Світ фізики", "Фізичний збірник НТШ", "Світогляд" та ін.

Оповідь про проф. Ю. Ранюка як про знаного фахівця у царині експериментальної ядерної фізики була б неповною, якщо не відзначити його пристрасні захоплення історією науки (насамперед історією ядерної фізики),



краєзнавством тощо. Недарма 1995 року йому присвоєно почесне звання “Заслужений працівник культури України”, а 2002 року він удостоєний “Відзнаки за популяризацію науки в Україні” відомого науково-популярного журналу “Світ фізики”. За словами Юрія Миколайовича, історією він цікавився з дитинства і навіть дещо вагався щодо вибору факультету, вступаючи до Харківського університету.

У 2001 році побачила світ його книжка “Лабораторія № 1. Ядерна фізика в Україні”. У передмові автор пише:

*“Ця книга про ядерну фізику та про людей, що її творили. Що спонукало до цієї теми? На те є низка причин. Україна переживає час свого становлення як європейська держава. Її історія потребує об’єктивного висвітлення, бо все написане досі було або тенденційним, або забороненим. Зараз для цього з’явилися нові можливості, можна зазирнути в архіви, які раніше дуже ретельно оберігалися.”*<sup>3</sup>

Продовженням є підготована до друку книжка “Участь Лабораторії № 1 в реалізації атомного проекту СРСР”. Це, власне, є збірник секретних архівних матеріалів, що торкаються участі Харківського фізико-технічного інституту в створенні атомної бомби.

Пригодилися також матеріали “усної історії науки”. Автор зізнається і картає себе за те, що не почав раніше занотовувати спогади ветеранів Інституту, пізно почав вести цілеспрямовану роботу. Втім, пише він, це той самий випадок, коли краще пізніше, ніж ніколи.

У процесі роботи над архівами автора приголомшила і полонила тема репресій серед фізиків УФТІ в 1937–1938 роках, унаслідок чого було підготовлено монографію “Дело УФТИ”, яку надруковано 1998 року в київському видавництві “Фенікс”.

*“Усе свідоме життя мені не давали спокою дві страшні тасмниці. Це тасмниця голодомору 1933 року і тасмниця репресій 1937. Під тасмницею я розумію не стільки перебіг і наслідки цих подій, скільки їх причини. Неможливо збагнути, що спонукало керівництво держави взятися до організації такого безпрецедентного у світовій історії широко-масштабного й безглузлого винищення власного народу”.*<sup>4</sup>

Важливим доповненням до зібраних та опублікованих Ю. Ранюком матеріалів про Інститут і репресії 1937-го та наступних років є свідчення знаного австрійського вченого Олександра Вайсберга про його працю в Харківському фізико-технічному інституті та поневіряння в радянських в’язницях, що красномовно і докладно викладено в його великій за обсягом книжці спогадів. Ю. Ранюк переклав та підготував до друку цю книжку. Її незабаром буде видано під назвою “Холодна гора”. Неабияке зацікавлення становить і готова до друку книжка інтерв’ю з видатними іноземними вченими, що працювали до війни в Харкові. Серед них Віктор Вайскопф, один з майбутніх керівників Мангеттенського проекту та Генеральний директор ЦЕРНу в період 1960–1965 років Ласло Тісса, видатний угорський та американський теоретик. Назва книжки – “Чотири інтерв’ю”. Її також буде видано цього року.

Книжки Ю. Ранюка з історії науки стали бестселерами. Що б не писав автор у царині історії науки чи краєзнавства, стиль і мова його текстів настільки інтригуючі, документовані, ілюстровані й барвисті, що Юрія Миколайовича можна назвати справжнім письменни-

<sup>3</sup>Юрій Ранюк. Лабораторія № 1. Ядерна фізика в Україні. – Харків: “АКТА”, 2001.

<sup>4</sup>Штепа К., Гоутерманс Ф. Чистка в Росії. Переклад з англ. Ю. Ранюка. – Харків: “Фоліо”, 2000.



ком. Та й людина він вельми колоритна і багатогранна.

Судіть самі: Юрій Ранюк як перший голова Харківського обласного товариства краєзнавців виконав такі краєзнавчі дослідження, як "Слідами Сковороди", "Шукаймо свого роду". Краєзнавчі та спортивні захоплення він вдало поєднав у занятті підводною археологією, про що яскраво свідчить книжка "Загадки підводного Херсонесу", яку він видав 1996 року. Співав у хорі. Як ентузіаст байдарочного туризму, він двічі проплив Дністер від верхів'я до гирла. Немає річки на Лівобережжі, яку б Ю. Ранюк не пройшов кілька разів байдаркою. Дуже полюбляє плавати з друзями ранньою весною під час повені на Сіверському Дінці. Недарма ж він, окрім всього іншого, є почесним членом американського Географічного товариства.

Звідки в шановного ювіляра стільки ентузіазму й енергії?

Відповідь сформулюємо так:

Юрій Ранюк, безумовно, людина талановита – і під час розшифрування слідів ядерних перетворень, і під час осмислення архівних матеріалів;

Науковець по-життєвому розумний, щоб підтримувати високу працездатність та щоб вирізняти головне від другорядного.

І найголовніше – він має міцне опертя, надійну "точку опори". Це любов до рідного Слобожанського краю – землі Г. Сковороди, Д. Багалія, Ю. Шереха, Г. Хоткевича, М. Хви-

льового, до давніх слобожанських кобзарських традицій. Та й сам він нагадує "мандрівного філософа" – вдома його годі й застати... Тому професора Ранюка всі люблять і щиро поважають.

У часи репресивного тоталітарного режиму він був одним з небагатьох, кому не боялися довіряти щось на ті часи цілком сокровенне. Ось один приклад.

Академік Олексій Ситенко, посідаючи високу посаду директора Інституту теоретичної фізики НАН України, знав, що до нього "привидляються". Він мав поетичну натуру (по смертно вийшла збірка його поезій "Поетичні крушини" з передмовою Івана Драча), цікавився літературою, що була на той час забороною – книжки Грушевського, Винниченка, видання Харківського видавництва 1920-х років "РУХ", видання Наукового товариства імені Шевченка. У Харкові, який у період українізації був столицею, збереглося багато таких видань. Знаючи букіністичні уподобання Юрія Ранюка, О. Ситенко довірився йому щодо своїх зацікавлень. Так Юрій Миколайович став букіністичним агентом Олексія Григоровича у Харкові.

Те, що Ю. Ранюк є почесним головою Свято-Софіївської Православної Релігійної громади селища П'ятихатки та членом редакційної колегії часопису цієї Громади "З Богом у серці", якоюсь мірою відображає глибинні засади його внутрішнього єства та громадської позиції.

---

## Від грецької мови до фізики

*Роберт Міллікен під час навчання у гуманітарному коледжі виділявся глибокими знаннями грецької мови. Коли він закінчував коледж, професор грецької мови, директор коледжу, несподівано запропонував йому в одній із шкіл місце викладача... фізики.*

*На відповідь здивованого Міллікена, що він зовсім не знає фізики, професор заперечив: "Кожен, хто добре знає грецьку мову, знає і фізику. Адже Греція – це колыска всіх наук."*





До 50-річчя  
від дня народження  
Ігоря Мриглода

## УСПІШНИЙ ФІЗИК-ТЕОРЕТИК

Галина Шопя,  
Львівський національний університет  
імені Івана Франка

Наукова громадськість України 26 травня 2010 року відзначила 50-річний ювілей директора Інституту фізики конденсованих систем НАН України, завідувача відділу квантово-статистичної теорії процесів каталізу ІФКС НАН України, заступника голови Західного наукового центру НАН України та Міністерства освіти і науки України, доктора фізико-математичних наук, члена-кореспондента НАН України, члена Наукового товариства імені Шевченка Ігоря Мироновича Мриглода.

Народився Ігор Мриглод 26 травня 1960 року у смт Козлів Козівського району Тернопільської області. Закінчивши з відзнакою фізичний факультет Львівського державного університету імені Івана Франка, 1982 року його скерували на роботу до Львівського відділення статистичної фізики Інституту теоретичної фізики АН УРСР.

І. Мриглод розпочав наукові дослідження у галузі теорії фазових переходів під керівництвом академіка І. Р. Юхновського. Він 1988 року захистив кандидатську дисертацію, докторську – з статистичної теорії колективної динаміки рідин – 2000.

Коли на базі Львівського відділення статистичної фізики ІТФ УРСР у вересні 1990 року створено перший у Західній Україні академічний інститут фізичного профілю – Інститут фізики конденсованих систем (ІФКС) АН УРСР, – І. Мриглод став його вченим секретарем, а з 1995 року – заступником директора з наукової роботи. Від 2001 року він – завідувач новоствореного відділу квантово-статистичної теорії процесів каталізу в ІФКС, а від 2006 – директор ІФКС НАН України.

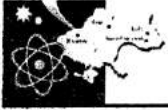


Ступінь доктора фізико-математичних наук Ігор Мриглод одержав 2000 року, а членом-кореспондентом НАН України став 2006 року.

Основні наукові праці стосуються дослідження з теорії фазових переходів, нерівноважної статистичної фізики, вивчення динамічних властивостей рідин та сумішей, застосування методів статистичної фізики до опису фазової поведінки та розрахунку фазових діаграм складних рідин, розвитку методів комп'ютерного моделювання і теорії каталітичних реакцій.

Починаючи з 1990-х років, науковець працює над вивченням проблем, пов'язаних з дослідженням та прогнозуванням властивостей і поведінки паливовмісних матеріалів в об'єкті "Укриття" Чорнобильської АЕС.

Ігореві Мироновичу належить низка важливих праць фундаментального характеру, серед яких: метод узагальнених колективних збуджень у теорії рідин і сумішей, що відкриває нові можливості для розрахунку часових кореляційних функцій, спектрів колективних збуджень та узагальнених коефіцієнтів переносу, а також дає змогу зрозуміти фізичні механізми формування колективної динаміки в густих рідинах та їхніх сумішах; разом зі співавторами він запропонував низку нових числових алгоритмів (понад 40) для комп'ютерного моделювання динамічних властивостей класичних і квантових систем у межах методу молекулярної дина-



міки, визначено найефективніші з них і показано, що за умови використання однакового ресурсу, виділені алгоритми є ефективнішими від стандартних на чинник, що змінюється від 10 до сотень тисяч разів залежно від порядку алгоритму; вперше теоретично доведено факт появи нових поправок до скейлінгу під час фазового переходу другого роду в системах із термодинамічними зв'язками та вказано на потребу їхнього врахування в експерименті, запропоновано загальний формалізм опису фазових переходів у системах із термодинамічними в'язями.

Учений був головою і членом оргкомітетів багатьох наукових конференцій. Він 2001 року ініціював серію щорічних всеукраїнських конференцій-конкурсів в ІФКС НАН України для молодих науковців, що працюють у галузі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини, а 2005 року – Міжнародних конференцій зі статистичної фізики в Україні. Як відповідальний редактор та автор, І. Мриггод працював над підготовкою до друку шести тематичних номерів журналу “Condensed Matter Physics”, матеріалів і тез кількох конференцій, шести бібліографічних збірок і показчиків, науково-популярних видань “Формули життя і творчості академіка Юхновського” (2000) та “Микола Боголюбов і Україна” (2009) і книжки “Ігор Юхновський, Вибрані праці: фізика” (2005). Автор багатьох науково-популярних публікацій, понад 300 наукових праць, які опубліковано в українських та іноземних виданнях.

Ігор Мриггод від 2005 року – професор (за сумісництвом) і керівник філії кафедри інженерного матеріалознавства та прикладної фізики Національного університету “Львівська політехніка” при ІФКС НАН України.

І. Мриггод – один із організаторів журналу “Condensed Matter Physics”. Нині журнал належить до п'яти наукових періодичних видань в Україні, що мають визначений імпаکت-фактор. Член редколегій журналів “Condensed Matter Physics”, “Central European Journal of Physics” та “Фізичний збірник НТШ”. Голова спеціалізованої вченої ради із захисту докторських дисертацій при ІФКС НАН України та член ради при Національному університеті імені Івана Франка.

З початку 1990-х років, коли в Інституті фізики конденсованих систем було розпочато роботи із розвитку та поширення мережевих технологій із виходом в Інтернет, активно до них долучився. Кілька років курував цю сферу діяльності аж до часу створення окремого державного підприємства НТЦ “Українська академічна і дослідницька мережа” ІФКС НАН України (1998). Слід зауважити, що саме в Інституті було здійснено перше в Україні під'єднання до глобальної мережі.

Науковець 2001 року ініціював створення в Інституті першого в Національній академії наук України розрахункового кластера, який було введено в дію в січні 2002 року. Це відкрило нові можливості для виконання складних комп'ютерних обчислень. Проект продовжує розвиватись, кластер Інституту входить до українського гріду, удосконалюється і залишається одним із найпотужніших в Україні.

І. Мриггод є членом Українського фізичного товариства та Наукового товариства імені Шевченка. Він – лауреат премії НАН України імені С. І. Пекаря (2003), нагороджений Почесною грамотою Верховної Ради України (2004) та відзнакою НАН України “За наукові досягнення” (2008).

---

*Редакційна колегія журналу “Світ фізики” щиро вітає  
члена-кореспондента Національної академії наук України*

**ІГОРЯ МИРОНОВИЧА МРИГЛОДА**

*з 50-річчям від дня народження.*

*Бажаємо йому доброго здоров'я, творчого натхнення,  
нових наукових здобутків на благо України.*



## ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ОСТАННЬОГО ЗАСТОСУВАННЯ ЗБРОЇ В КРИМІНАЛІСТИЦІ

Марта Зьобро, Світлана Семак

### Вступ

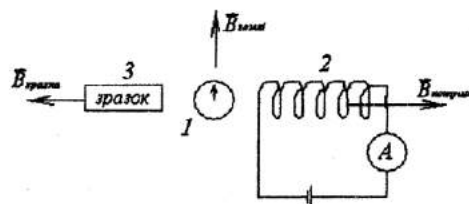
Існує ідея про визначення часу останнього застосування зброї в криміналістиці за ступінню її розмагніченості порівняно з початковою намагніченістю. За авторським свідоцтвом СССР N284303:

“Способ установления давности выстрела при судебно-баллистической экспертизе путем определения изменяющихся во времени физических свойств ствола после стрельбы, отличающийся тем, что, с целью определения времени выстрела из обнаруженного на месте происшествия оружия, измеряют магнитным прибором степень намагнитченности ствола и производят контрольный отстрел из этого же оружия, а затем осуществляют контрольные замеры степени намагнитченности ствола каждые 24 часа до момента показания прибора, равного степени намагнитченности во время изъятия оружия” [1].

Завданням цієї роботи було реалізувати описаний вище метод та пояснити його фізичну суть.

### Методика експерименту

Для вимірювання ступеня намагніченості об'єкта було зібрано установку за схемою, зображеною на рис. 1.



У ролі чутливого елемента приладу було використано компас 1. Котушка з мідної обмотки 2 (250 витків, діаметр дроту 0,02 мм, діаметр котушки 50 мм, довжина котушки 34 мм) застосовувалась для компенсації магнетного поля зразка 3.

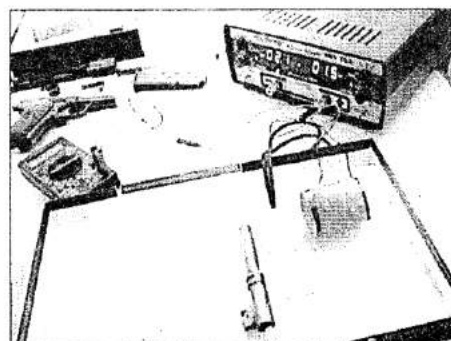


Рис. 1. а – схема установки;  
б – фото установки

Відомо, що стрілка компаса встановлюється вздовж напрямку зовнішнього магнетного поля, що зумовлене магнетними полями Землі та оточуючих предметів [2]. Котушку встановлювали перпендикулярно до стрілки компаса, зразок розміщували з іншого боку компаса на такій же відстані, що й котушку. Магнетне поле зразка спричиняє відхилення стрілки компаса на деякий кут. З іншого боку,





катушка, крізь яку протікає електричний струм, створює навколо себе магнетне поле. Отже, пропускаючи крізь катушку певний струм у такому напрямку, щоб стрілка компаса повернулася в початкове положення, магнетне поле катушки зрівноважить магнетне поле зразка. За величиною сили струму, що протікає крізь катушку, розраховувалось значення індукції магнетного поля зразка:

$$B = \frac{\mu NI}{2L}, \quad (1)$$

де  $B$  – індукція магнетного поля;  $\mu$  – магнетна стала;  $N$  – кількість витків у катушці;  $L$  – довжина катушки;  $I$  – сила струму в катушці.

Запропонована схема дає змогу вимірювати магнетні поля з точністю до 0,01 мкТл. Об'єктами дослідження були дві моделі вогнепальної зброї: пістолети Макарова (ПМ) та ТТ (рис. 2).

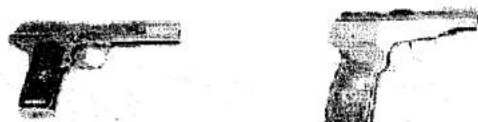


Рис. 2. ТТ – (а), ПМ – (б)

### Результати та їхнє обговорення

На підставі проведеного експерименту було отримано такі залежності індукції магнетного поля від часу (рис. 3).

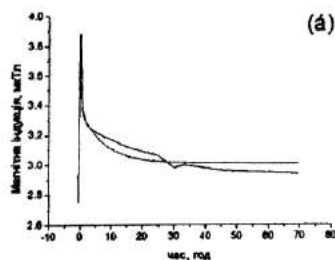
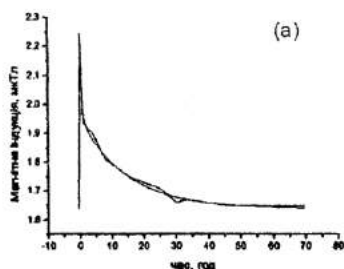


Рис. 3. Графік залежності індукції магнетного поля від часу для ТТ – (а) та ПМ – (б)

На графіку чітко видно стрибок напруженості магнетного поля відразу після пострілу. Під час вибуху порохових газів у дулі виникає дуже великий тиск, під дією якого дуло розширюється і намагнетчується внаслідок зворотної магнетострикції<sup>1</sup> [3].

Як видно з графіків, з часом відбувається релаксація магнетного поля сталі внаслідок поступової розорієнтації доменів феромагнетика (сталі). Отримані залежності можна описати емпіричною формулою:

$$B = B_0 + A \cdot e^{R_0 t}, \quad (2)$$

де  $B_0$  – стала, що відображає намагнетченість пістолета при  $t \rightarrow \infty$ ;  $A$  – зміна намагнетченості пістолета відразу після пострілу;  $R_0$  – параметр, що визначає швидкість розмагнетчення пістолета.

Параметри зміни індукції магнетного поля з часом та розрахований час між останнім і контрольним пострілами  $\Delta t$  для досліджуваних об'єктів, отримані на підставі формули (2), подані в таблиці:

Модель пістолета	$B_0$ , мкТл	$A$ , мкТл	$R_0$ , год <sup>-1</sup>	$t$ , год
ТТ	1,68	0,46	-0,23	16,65
ПМ	3,06	0,75	-0,99	5,06

### Висновки

– Запропоновано оригінальний метод для вимірювання магнетної індукції зразка з точністю до 0,01 мкТл.

<sup>1</sup>Магнетострикція – зміна форми або розмірів тіл при намагнетчуванні й розмагнетчуванні їх.



- Експериментально підтверджено зміну намагненості дула вогнепальної зброї при пострілі.
- Виміряно часову релаксацію магнетного поля пістолетів ПТ і ПМ.
- Виявлено експоненціальну залежність намагненості дула пістолета від часу.
- Отримано емпіричні залежності, що дають змогу визначити час останнього застосування зброї.
- Запропоновано фізичне пояснення різкої зміни намагненості дула пістолета під час пострілу, що ґрунтується на явищі магнетострикції.

Автори висловлюють подяку Львівському державному університету внутрішніх справ та особисто майору Є. В. Пряніну і підполковнику І. С. Винярчуку за сприяння у проведенні експериментів з вогнепальною зброєю, а також В. П. Рудику, С. Б. Серкезу та Ю. С. Криницькому.

#### Література

1. Авторське свідоцтво СРСР N 284303.
2. Детлаф А. А., Яворский Б. М., Милковская Л. Б. Курс фізики. Т. 2. Электричество и магнетизм (4-е издание). – М.: Высшая школа, 1977.
3. Белов К. П. Магнитострикционные явления и их тех. приложения. – М.: Наука, 1987.

## Чи знаєте Ви, що...

### 50 років тому було створено перший у світі лазер

Одним з найвизначніших досягнень фізики ХХ сторіччя було створення лазера. Це був лазер на рубіні, який 1960 року створив американський дослідник Т. Мейман.

Назва “лазер” складається з початкових літер англійських слів – *light amplification by stimulated emission of radiation* – підсилення світла за допомогою вимушеного випромінювання. Лазери відносять до приладів, які називають “генераторами”. Тобто, це пристрої для перетворення різних видів енергії в когерентне, монохроматичне випромінювання у видимій або близьких до неї ділянках спектру. Лазери ще називають оптичними квантовими генераторами.

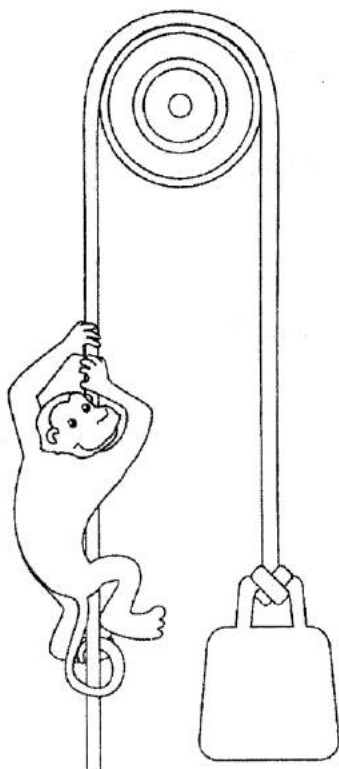
Сьогодні створено велику кількість різних типів лазерів, зокрема твердотільні, рідинні, напівпровідникові, газові тощо.

Лазери широко використовують у наукових дослідженнях та виробництві, у різноманітних приладах від звичайних лазерних вказівників до найтонших хірургічних інструментів, у вивченні земної кори, океану, космічного простору, комунікаціях, обробці матеріалів, біологічних дослідженнях. Нині немає жодної галузі науки, де б не використовували лазер.

Основоположні праці в галузі квантової радіофізики і квантової електроніки виконали у 50-х роках минулого сторіччя радянські фізики М. Г. Басов і О. М. Прохоров та американський Ч. Тавнс. Завдяки цим працям 1954 року створено молекулярні генератори (мазери) – прилади, що за принципом дії близькі до лазерів, але випромінюють у сантиметровому діапазоні електромагнетних хвиль.

За “фундаментальні дослідження в галузі квантової електроніки, що привели до створення генераторів і підсилувачів нового типу – лазерів і мазерів”, Чарльза Тавнса, Миколу Басова та Олександра Прохорова 1964 року нагородили Нобелівською премією з фізики.

## ЗАДАЧА З КАЗКИ “АЛІСА В КРАЇНІ ДИВ”



### Мавпа і вантаж

*Через блок, який закріплено до даху будинку, перекинута канат. На одному кінці канату висить мавпа, до іншого – закріплено вантаж, вага якого дорівнює вазі мавпи. Припустимо, що мавпа почала рухатися по канату догори. Що при цьому станеться з вантажем?*

**Люїс Керрол (Чарльз Лютвідж Доджсон)**

*“У школі, яку відвідувала Аліса щодня, фізика до основних предметів вивчення не входила. Фізики (як і прання) не навчали навіть за додаткову плату.”*

**З**адача “Мавпа і вантаж” увійшла до числа 400 найкращих задач, які авторитетне журі відібрало для спеціального випуску журналу “The American Mathematical Monthly” The Otto Dunkel Memorial Problem Book, ed. by H. Evans and E. P. Stark. – “The American Mathematical Monthly”. 64.7, Part II. – 1957.

Цю задачу Люїс Керрол запропонував ще в грудні 1893 року. Умови задачі недостатньо для однозначного розв’язку, і відповідь залежить від додаткових припущень, які вводять під час розв’язування. Саме у тому є причина

розбіжностей, які неодноразово на сторінках науково-популярних видань з фізики викликають суперечки щодо того, яку відповідь вважати правильною.

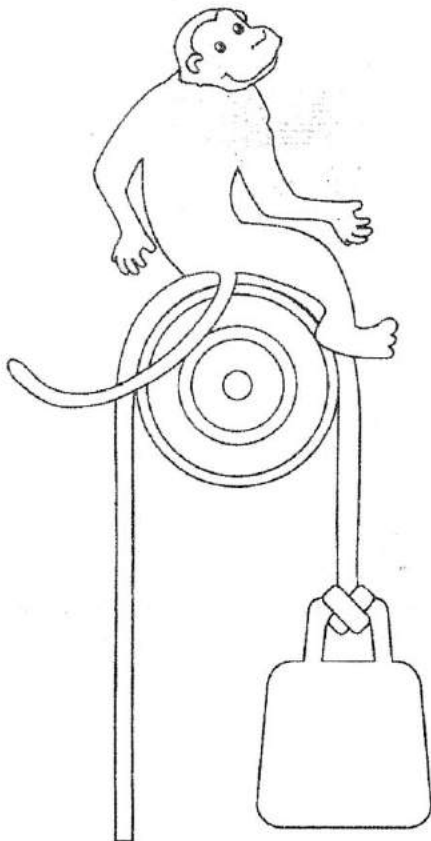
Почали цю полеміку ще колеги Л. Керрола з Оксфордського університету професори фізики Кліфтон і Прайс, професор хемії Вернон-Харкорт і викладач Семпсон. Кожний з них вважав лише свій розв’язок правильним.

Іронізуючи над своїми вченими колегами, Л. Керрол 21 грудня 1893 року у щоденнику написав:



“Одержав розв’язок професора Кліфтона на задачу “Мавпа і вантаж”. Дуже цікаво, наскільки різних думок дотримуються гарні математики. Прайс стверджує, що вантаж із зростаючою швидкістю рухатиметься догори, Кліфтон і Харкорт стверджують, що вантаж рухатиметься догори з тією ж швидкістю, що й мавпа, тоді як Семпсон каже, що вантаж опускатиметься донизу.”

Як свідчать елементарні фізичні міркування, якщо знехтувати тертям між канатом і блоком та їхніми масами, то мавпа і вантаж ру-



хатимуться догори з однаковою швидкістю. Їхні швидкості у будь-який відрізок часу будуть рівні, і за рівні проміжки часу вони проходять однакові відстані.

Інший результат одержимо, якщо врахувати масу блока.

Нехай  $M$  – маса мавпи (і вантажу),  $m$  – маса блока,  $r$  – його радіус,  $mk^2$  – момент інерції блока відносно осі обертання,  $a_1$  – пришвидшення мавпи,  $a$  – пришвидшення вантажу (обидві спрямовані догори).

Тоді

$$\frac{a_1}{a} = 1 + \frac{mk^2}{Mr^2}.$$

Відношення пришвидшень не залежить від часу, швидкостей мавпи і вантажу, а відстані, які вони проходять за рівні проміжки часу, співвідносяться між собою як пришвидшення.

Врахування сил тертя і маси канату також вносять значні зміни у розв’язок задачі. Наприклад, із фізичних міркувань очевидно, що якщо тертя каната об блок і блока об вісь достатньо велике, то мавпа може рухатися канатом, не змінюючи положення вантажу.

Аналіз різних випадків значно спрощується, якщо скористатись принципом д’Аламбера і застосувати його до системи, яка складається із мавпи, вантажу, каната і блока.

Якщо  $x$  – відстань, яку відлічують від початкового положення ( $x > 0$  зі зміщенням догори),  $F$  – сила тертя,  $m'$  – повна маса каната,  $\rho$  – маса одиниці його довжини (решта позначень ті ж самі, що й у попередньому випадку), то одержимо.

$$a = \frac{2\rho g x + Ma_1 - F}{M + m' + mk^2/r^2}.$$

# Умови задач XLVII Всеукраїнської олімпіади з фізики Чернігів, 2010 р.

## 8-й клас

### Задача 1.

До кінця підвішеної вертикально пружини, масою якої можна знехтувати, підвішують вантаж масою  $m$ . Тоді до середини вже розтягнутої пружини підвішують ще один вантаж тієї самої маси.

Визначіть довжину розтягнутої пружини, якщо її жорсткість дорівнює  $k$ , а довжина в нерозтягнутому стані –  $L_0$ .

### Задача 2.

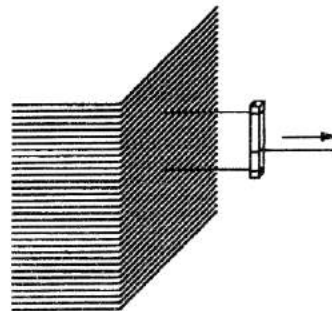
У герметично закритій посудині у воді плаває крижинка масою  $M = 0,1$  кг, в яку вмерзла свинцева дробинка масою  $m = 5$  г.

Яку кількість теплоти треба витратити, щоб дробинка почала тонути? Густина свинцю  $11300$  кг/м<sup>3</sup>, густина криги –  $900$  кг/м<sup>3</sup>, теплота плавлення криги –  $330$  кДж/кг. Температура води в посудині –  $0$  °С.

### Задача 3.

Дві однакові довгі нитки просунуті одна над іншою на відстані  $h = 4$  см поміж різних сторінок товстого тому енциклопедії. Учень 8-го класу визначив, що одну з ниток витягувати значно легше, ніж іншу. Тоді він прив'язав ці нитки до сірника, а ще однією ниткою перехопив сірник у такому місці, щоб, коли потягнути за неї, сірник рухався, не нахилиючись (див. рис.). З'ясувалось, що третя нитка знаходиться не по центру сірника, а ділить його у співвідношенні  $2 : 1$ . Тоді учень поклав на том енциклопедії ще два таких самих томи і був змушений змістити третю нитку з її положення на  $1/8$  довжини сірника.

Спробуйте визначити товщину  $H$  енциклопедії. Що треба для використання розглянутого “пристрою” для зважування різних тіл?

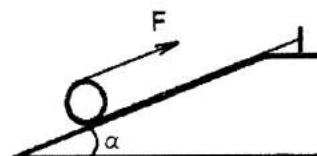


### Задача 4.

На дні озера знаходиться неповна закоркована скляна пляшка, у якій міститься  $1,3$  кг олії.

Знайдіть роботу, яку треба виконати, щоб підняти цю пляшку з дна водойми на борт катера, який знаходиться на висоті  $3$  м над поверхнею води. Порожня пляшка має масу  $200$  г, а її зовнішній об'єм  $1,5$  л.

### Задача 5.



Вантажник котить бочку на гірку (див. рис.). Для цього він повільно тягне за перекинуту

через бочку мотузку з силою  $F = 300$  Н. При цьому мотузка паралельна до схилу гірки, який утворює кут  $\alpha = 30^\circ$  з горизонтом, а інший кінець мотузки закріплений нагорі.

Визначіть масу  $m$  бочки. Коефіцієнт сили тяжіння  $g = 10$  Н/кг.

*Задачі запропонували:*

*С. У. Гончаренко (1, 2, 5),*

*О. Ю. Орлянський (3),*

*А. М. Шарий (4)*

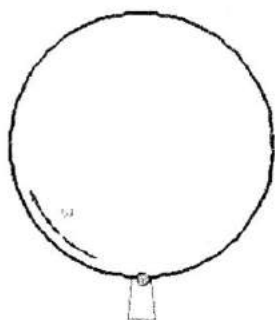
### 9-й клас

#### Задача 1.

Рибалка знаходиться на крижині прямокутної форми, горизонтальні розміри якої значно більші від її товщини. Крижина плаває на воді і може витримати розміщене в її центрі тіло масою  $M$ .

Якої маси  $m$  ( $m \ll M$ ) рибалка може, не замочивши ніг, стояти на краю крижини в середині її ребра? Вважайте, що густина льоду дорівнює  $0,9$  г/см<sup>3</sup>

#### Задача 2.



Атракціон зроблений у вигляді горизонтальної круглої платформи (див. рис.) радіусом  $R = 4$  м, яка обертається з періодом  $T = 8$  с на деякій висоті над басейном з водою. На платформу є тільки один вхід, яким, у разі потреби, можна користатися як виходом. Між дітьми виникло

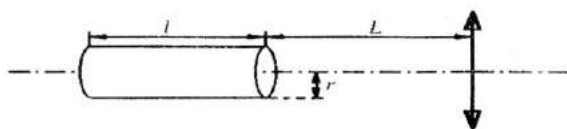
змагання – хто найменше часу проведе на платформі, стартувавши від входу і найшвидше туди ж повернувшись. Максимально допустима швидкість, з якою можна достатньо впевнено пересуватися відносно платформи, не дуже велика і, вважаємо, дорівнює  $v = 2$  м/с.

Знайдіть найменший час, за який можна повернутися до входу на платформу. Як при цьому слід рухатись? Схематично намалюйте траєкторію руху.

#### Задача 3.

У цілковитій темряві циліндрична трубка світиться ззовні блакитним світлом, а всередині – жовтим. На відстані  $L = 30$  см від трубки розташували збиральну лінзу, фокусна відстань якої  $F = 20$  см, так, що її головна оптична вісь збіглася з віссю симетрії трубки (див. рис.). Радіус трубки  $r = 4,5$  см, довжина  $l = 30$  см.

Визначте форму екрана для спостереження чіткого зображення всієї трубки і площу зображення на цьому екрані. Яким має бути радіус  $R$  лінзи, щоб зображення на екрані було і чітким, і максимально освітленим, а кольори не накладалися один на одного? Екран вважайте непрозорим.



#### Задача 4.

У глибокій циліндричній посудині з водою дном вниз плаває тонкостінна металева циліндрична пробірка масою  $m$  і висотою  $H$ . Завдяки направляючим, стінки пробірки та посудини залишаються паралельними.

Яку мінімальну роботу  $A$  треба виконати, щоб пробірка опустилася на дно?

Максимальна маса води, яку вміщує пробірка, дорівнює  $M$ .



## 10-й клас

**Задача 5.**

У шкільній майстерні вирішили виготовити термометр. Для цього взяли алюмінієву та мідну пластини однакової товщини і вирізали з них однакові смужки довжиною  $L = 20$  см і шириною  $h = 5$  мм. Тоді краї смужок частково з'єднали (спеціальним зварюванням) як зображено на рис. 1, підвісили на тонесенькій нитці та укоротили мідну смужку до такої довжини  $l$ , щоб рівноважне положення термометра за температури  $20^\circ\text{C}$  було горизонтальним (рис. 2).

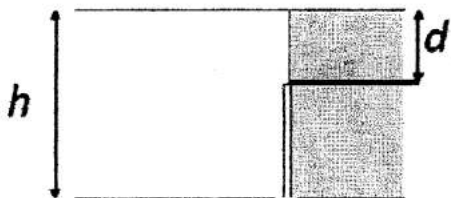


Рис. 1.

Знайдіть довжину  $l$  мідної смужки. На яких відстанях треба нанести риски на табло біля покажчика на вільному кінці алюмінієвої смужки (рис. 2), щоб ціна поділки була  $5^\circ\text{C}$ ? Як би Ви вдосконалили цей термометр для збільшення його точності?

Температурний коефіцієнт лінійного розширення алюмінію  $\alpha_{Al} = 2.3 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , міді  $\alpha_{Cu} = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , густина алюмінію  $\rho_{Al} = 2.7 \text{ г/см}^3$ , міді –  $\rho_{Cu} = 8.9 \text{ г/см}^3$ , ширина з'єднання смужок буде  $d = 2$  мм (рис. 1).

Задачі запропонували:

**В. П. Сохацький (1),  
О. Ю. Орлянський (2, 3, 5),  
С. У. Гончаренко (4)**

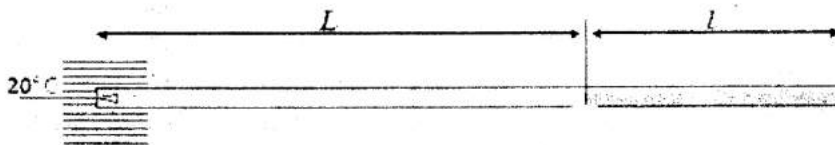
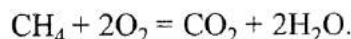


Рис. 2.

**Задача 1.**

У міцній закритій посудині об'ємом  $V$  міститься суміш метану з киснем, парціальні тиски яких однакові. Після підпалювання суміші відбувається хемічна реакція



Визначіть масу суміші, якщо після охолодження вмісту посудини до температури  $t = 100^\circ\text{C}$  на стінках посудини випадає роса.

**Задача 2.**

До гальванічного елемента паралельно під'єднують два резистори. Опір першого резистора в  $k$  разів перевищує внутрішній опір елемента, а опір другого такий, що при такому з'єднанні на ньому виділяється максимальна теплова потужність.

У скільки разів зміниться швидкість розчинення цинкового електрода елемента, якщо відімкнути від нього другий резистор?

**Задача 3.**

Дві гармати з двох віддалених точок одночасно здійснюють постріли. Перша стріляє на південь під кутом  $15^\circ$  до горизонту (швидкість снаряду  $v_1 = 800$  м/с). Друга стріляє на схід під кутом  $75^\circ$  до горизонту (швидкість снаряду  $v_2 = 400$  м/с).

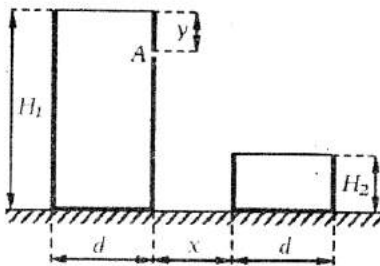
Визначте відносну швидкість снарядів.

Визначте відстань між гарматами  $r_0$  та мінімальну відстань  $r_{\min}$ , на яку наблизяться снаряди під час польоту, якщо за час  $t_1 = 1$  с після

пострілів, відстань між снарядами була  $r_1 = 400$  м, за  $t_2 = 2$  с після пострілів –  $r_2 = 800$  м. Опором повітря та обертанням Землі знехтувати.

#### Задача 4.

Дві відкриті згори циліндричні посудини різної висоти та однакового діаметра  $d$  стоять поруч на відстані  $x$  (див. рис.). Нижча посудина порожня, а вища наповнена водою до висоти  $H_1$ . Через невеликий отвір  $A$  з вищої посудини зливають воду в нижчу, поки та не стане повною. При заданих висотах посудин  $H_1$  та  $H_2$  значення координати  $y$  підібране так, що відстань  $x$  набуває максимального значення, а значення діаметра  $d$  при цьому обирається мінімальним.



Визначіть величини  $y$ ,  $x$ ,  $d$ .

#### Задача 5.

У нашій лабораторії в холодильнику за температури  $0^\circ\text{C}$  зберігається посудина з кригою. Коли ми витягаємо її з холодильника, вона покривається крапельками сконденсованої вологи (“запотіває”). Було помічено, що маса води, яка конденсується на стінках посудини, до моменту, коли вся крига розтане, залежить від температури повітря в кімнаті. Якщо температура повітря дорівнює  $20^\circ\text{C}$ , то конденсується 22 г води. Якщо ж температура повітря підвищується до  $30^\circ\text{C}$  – лише 16,5 г. Абсолютна вологість повітря (маса молекул води, що міститься в  $1\text{ м}^3$  повітря) у нашій лабораторії завжди однакова.

Якою буде маса криги у посудині? Питома теплота плавлення криги  $330$  кДж/кг, питома теплота пароутворення води  $2,3$  МДж/кг. Вважайте, що конвекції нема і потік тепла від повітря кімнати на стінки посудини прямо пропорційний різниці температур. Теплоємністю посудини знехтуйте.

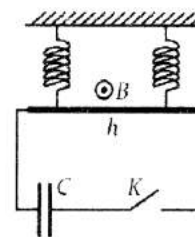
Задачі запропонували:  
С. У. Гончаренко (1, 2),  
О. Ю. Орлянський (3),  
А. П. Федоренко (4),  
Є. П. Соколов (5)

### II клас

#### Задача 1.

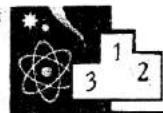
Прямолінійний провідник завдовжки  $h$  і масою  $m$  підвішений на двох пружинах жорсткістю  $k$  в горизонтальному однорідному магнетному полі з індукцією  $B$  (див. рис.). При замиканні ключа  $K$  конденсатор ємністю  $C$ , заряджений до різниці потенціалів  $U$ , замикається на провідник і розряджається.

Визначіть амплітуду коливань провідника, якщо час розрядження конденсатора набагато менший від періоду цих коливань.



#### Задача 2.

До ланцюжка пальників, розташованих на невеликих віддальх один від одного, надходить газ. Кількість теплоти, що виділяється під час його горіння на одиницю довжини ланцюжка за одиницю часу, визначається співвідношенням



$$Q_+(T) = Q_0 \Theta(T - T_c),$$

де  $T_c$  – температура запалювання;

$$\Theta(x) = 1 \text{ при } x > 0 \text{ і } \Theta(x) = 0 \text{ при } x < 0.$$

Коли всі пальники горять, кількість теплоти на одиницю довжини ланцюжка, що надходить за одиницю часу в довколишнє середовище, можна визначити за формулою:

$$Q_-(T) = \gamma(T - T_0),$$

де  $T_0$  – температура доколишнього середовища.

Теплоємність одиниці довжини ланцюжка дорівнює  $C$ .

Знайдіть температуру  $T_l$  ланцюжка в стаціонарному стані, коли всі пальники горять.

Приймемо, що у випадку, коли пальники горять лише в деякій частині ланцюжка, температура вздовж ланцюжка в перехідній ділянці завдовжки  $L$  на межі ділянки горіння змінюється за лінійним законом від  $T_l$  до  $T_0$ .

За яких температур довколишнього середовища вздовж ланцюжка побіжить хвиля запалювання, а за яких – хвиля гасіння?

Знайдіть швидкість цих хвиль.

### Задача 3.

Дві однакові заряджені намистинки нанизані на горизонтально розташоване тонке кільце, зроблене зі спеціального непровідного матеріалу. Спочатку намистинки знаходяться у діаметрально протилежних точках кільця.

Яку невелику швидкість  $v_0$  слід надати одній із намистинок, щоб, зробивши повний оберт, вона на мить зупинилась у точці, з якої почала рух?

Силами тертя, опором повітря і розмірами намистинок у порівнянні з розміром кільця знехуйте. Кільце вважайте нерухомим. Відомо, що якби перед початком дослідів кільце раптово зникло, частинки розлетілися б і (за умови невагомості) на великій віддалі набули швидкості  $v_\infty$ .

### Задача 4.

Квантова теорія передбачає притягання незаряджених провідників у вакуумі (ефект Казимира), які знаходяться на малих відстанях один від одного.

Оцініть, за якої відстані між двома паралельними металевими пластинами сила, що діє на одиницю площі пластини (своєрідній квантовий тиск), дорівнює атмосферному тиску  $10^5$  Па.

Оцінку проведіть двома способами і порівняйте їх результати.

#### Вказівки.

1. Проведіть розрахунки за такою моделлю.

Уявіть, що завдяки випадкових відхилень від рівноважного стану (флуктуацій) у поверхневому шарі пластини з'являється пара зарядів  $+e$  і  $-e$  (диполь), кожний з яких займає однаковий об'єм, один ближче до другої пластини, інший – далі. За рахунок електростатичної індукції на протилежній пластині виникає перерозподіл зарядів і, як наслідок, сила взаємодії.

Проведіть розрахунки для однієї пари зарядів і припустіть далі, що такі флуктуації відбуваються безперервно вздовж всієї поверхні.

2. Проведіть оцінку з міркувань розмірностей, вважаючи, що квантовий тиск не має залежати від елементарного заряду  $e$ .

#### Довідкові дані.

Швидкість світла  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с;

стала Планка  $\hbar = 10^{-34}$  Дж·с;

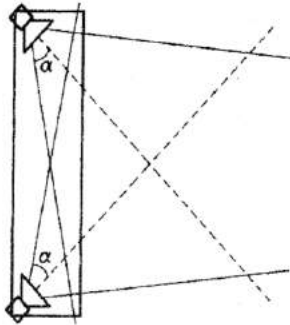
елементарний заряд  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл;

електрична стала  $\epsilon_0 = 8.9 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.



**Задача 5.**

У дальніх кутах сцени на віддалі  $d = 2$  м від її переднього краю на висоті  $H = 2$  м над сценою встановлені динаміки. Вісь симетрії кожного динаміка знаходиться під кутом  $45^\circ$  до сцени, а звук з нього йде в конус з кутом розходження  $\alpha = 30^\circ$  (див. рис.).



Кожен динамік відтворює підсилений звук від мікрофона в руках співака на сцені. Якщо мікрофон перебуватиме досить близько від динаміка, можливе явище, коли звук, вийшовши з динаміка, приймається мікрофоном, підсилюється і знову виходить з динаміка вже з бі-

льшою гучністю. У такій ситуації акустична система починає видавати звук сама по собі.

Де має перебувати співак з мікрофоном, щоб виникло це явище?

Визначте можливі частоти створюваного звуку.

Ширина сцени  $L = 5$  м. Співак тримає мікрофон на висоті  $h = 1,5$  м. Мікрофон перетворює звук (коливання тиску повітря) на коливання напруги з коефіцієнтом перетворення  $A = 100$  В/Па. Далі ця напруга підсилюється в  $k = 100$  разів підсилювачем і надходить на динамік, де перетворюється на коливання тиску з коефіцієнтом перетворення  $B = 0,01$  Па/В. Площа мембрани динаміка  $S_0 = 0,01$  м<sup>2</sup>.

*Задачі запропонували:*

**С. У. Гончаренко (1),  
І. О. Анісімов (2),  
О. Ю. Орлянський (3, 4),  
О. І. Кельник (5)**

## Чи знаєте Ви, що...

Багато видатних фізиків, які здобули світову славу та стали Нобелівськими лавреатами з фізики, навчалися і працювали у різних країнах, а народилися в Польщі.

• – **Альберт Майкельсон** – народився в Польщі, його батьки емігрували до США. Він закінчив Морську академію, поглиблював свої знання у лабораторії Гельмгольца в Берліні, у лабораторії Фізо в Парижі, був професором Чиказького університету, чотири роки очолював Національну академію наук США, Нобелівський лавреат з фізики 1907 року;

– **Марія Склодовська-Кюрі** – народилася у Варшаві, навчалася в Сорбонні у Франції, все життя мешкала і працювала у Парижі, стала лавреатом двох Нобелівських премій з фізики (1903) і хемії (1911);

– **Ізидор Рабі** – народився в м. Римануві (колишня Австро-Угорська імперія, нині Польща). Батьки емігрували до США. І. Рабі став Нобелівським лавреатом з фізики 1944 року;

– **Макс Борн** – народився у Бреслау (Вроцлав, Польща), навчався і працював в університетах Польщі та Німеччини, став Нобелівським лавреатом з фізики 1954 року;

– **Марія Гіюперт-Майєр** – народилася в м. Катовіце (Польща), навчалася і працювала в Німеччині, згодом переїхала до США, Нобелівським лавреатом з фізики стала 1963 року;

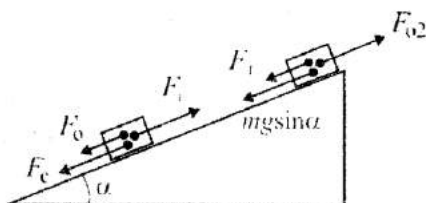
– **Мартін Перл** – його родина емігрувала з Польщі до США. Нобелівським лавреатом з фізики він став 1995 року;

# РОЗВ'ЯЗКИ ЗАДАЧ ІІІ (ОБЛАСНОГО) ЕТАПУ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ ОЛІМПІАДИ З ФІЗИКИ (ЛЬВІВ, 2010)

Умови задач ІІІ Обласного етапу Всеукраїнської олімпіади з фізики  
та розв'язки за 8–9 клас читайте в журналі "Світ фізики" (2010, № 1, с. 36–44)

10 клас

## Задача 1



З умов, що автомобіль догори, донизу і по горизонталі рухається без пршвидшення (стала швидкість), запишімо:

$$F_{m_1} = mg \sin \alpha + \alpha v_1,$$

$$F_{m_2} = -mg \sin \alpha + \alpha v_2,$$

$$F_{m_3} - \alpha v_3 = 0.$$

Силу тяги двигуна знайдімо з виразу для потужності двигуна  $N = F_m \cdot v$ , вважаючи, що потужність на різних ділянках дороги стала.

$$\frac{N}{v_1} = mg \sin \alpha + \alpha v_1, \quad (1)$$

$$\frac{N}{v_2} = -mg \sin \alpha + \alpha v_2, \quad (2)$$

$$\frac{N}{v_3} = \alpha v_3. \quad (3)$$

Помноживши ліву і праву частини рівнянь (1) і (2) на  $v_1 v_2$ , одержимо

$$N v_2 = (mg \sin \alpha) v_1 v_2 + \alpha v_1^2 v_2,$$

$$N v_1 = (-mg \sin \alpha) v_1 v_2 + \alpha v_2^2 v_1.$$

Додавши ці дві рівності, одержимо

$$N = \alpha v_1 v_2.$$

Звідси,

$$\begin{cases} N = \alpha v_1 v_2 \\ N = \alpha v_3^2 \end{cases}$$

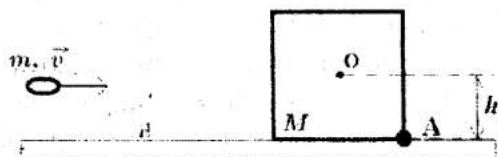
Отже,

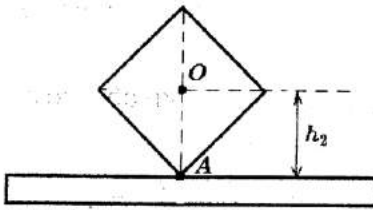
$$v_3^2 = v_1 v_2,$$

$$v_3 = \sqrt{v_1 v_2} = \sqrt{36 \cdot 18} = 6 \cdot 3 \cdot \sqrt{2} = 18 \cdot 1,4 = 25,2 \text{ км/год}$$

## Задача 2

За законом збереження енергії кінетична енергія кулі витратиться на зміну потенціальної енергії куба та зміну внутрішньої енергії. Куб перекинеться в тому випадку, коли діагональна площина стане вертикальною.





Щоб куб став вертикально, він у горизонтальному положенні мусить мати відповідну кінетичну енергію, щоб обертаючись відносно осі, збільшити свою потенціальну енергію.

Знайдімо кінетичну енергію куба після потрапляння кулі в куб (удар абсолютно непружний).

За законом збереження моменту імпульса:

$$m v h_1 = (I_k + m h_1^2) \omega, \quad (1)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання куба з кулею;  $I_k$  – момент інерції куба відносно осі;

$m h_1^2$  – момент інерції кулі.

Із (1) маємо:

$$\omega = \frac{m v h_1}{I_k + m h_2^2}.$$

Кінетична енергія куба з кулею буде:

$$E_k = \frac{I_k + m h_2^2}{2} \cdot \omega^2.$$

За законом збереження енергії, оскільки маса кулі набагато менша, маси куба буде:

$$E_k = \frac{(I_k + m h_2^2) \omega^2}{2} = M g (h_2 - h_1),$$

$$\frac{m^2 v^2 h_1^2}{(I_k + m h_2^2)^2} \cdot \frac{(I_k + m h_2^2)}{2} = M g (h_2 - h_1). \quad (2)$$

Із рівності (2) знайдемо швидкість кулі

$$\begin{aligned} v^2 &= \frac{M g (h_2 - h_1) \cdot (I_k + m h_2^2)}{m^2 h_1^2} \approx \\ &\approx \frac{2 M g (h_2 - h_1)}{m^2 h_1^2} I_k \end{aligned}$$

Момент інерції куба відносно осі, що проходить через ребро, дорівнює:

$$I_k = \frac{2}{3} m \cdot a^2,$$

$$v^2 = \frac{2 M g (h_2 - h_1) \cdot \frac{2 M a^2}{3}}{m^2 \left(\frac{a}{2}\right)^2} =$$

$$= \frac{16 M g \left(h_2 - \frac{a}{2}\right) \cdot M a^2}{3 m^2 a^2} =$$

$$= \frac{16 M^2 g}{3 m^2} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} a - \frac{a}{2}\right) =$$

$$= \frac{8 M^2}{3 m^2} g a (\sqrt{2} - 1)$$

$$\text{Отже, } v \geq \frac{M}{m} \sqrt{\frac{8}{3} g a (\sqrt{2} - 1)}$$

### Задача 3

Те, що температура води в банці не змінюється упродовж тривалого часу вказує на те, що теплота, отримана від нагрівника, виділяється в довколишнє середовище. Вважаючи, що наявний теплообмін між банкою та повітрям у кімнаті кількість теплоти, виділена в довколишнє середовище за час  $\tau$ :

$$Q_1 = a \cdot S_1 \cdot (T_1 - T_0) \cdot \tau,$$

$$T_1 = 80 \text{ }^\circ\text{C}; \quad T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C},$$

$a$  – коефіцієнт пропорційності;  $S_1$  – площа бічної поверхні банки об'ємом 3 л.

За законом збереження енергії:

$$Q_1 = P \cdot \tau,$$

де  $P$  – потужність нагрівника.

Отже,

$$T_1 = a \cdot S_1(T_1 - T_0).$$

Аналогічне співвідношення, можна записати для банки об'ємом 2 л:

$$P = \alpha \cdot S_2(T_2 - T_0).$$

Отже:

$$S_1(T_1 - T_0) = S_2(T_2 - T_0);$$

$$T_2 = T_0 + \frac{S_1}{S_2}(T_1 - T_0).$$

Площа бокових поверхонь банок:

$$S_1 = 2\pi R_1 H_1,$$

$$S_2 = 2\pi R_2 H_2,$$

$R$ ,  $H$  – радіус основи та висота банки.

До того ж об'єми банок:

$$V_1 = \pi R_1^2 H_1,$$

$$V_2 = \pi R_2^2 H_2,$$

$$T_2 = T_0 + \frac{R_1 H_1}{R_2 H_2}(T_1 - T_0).$$

Оскільки банки є геометрично подібними, то:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{H_1}{H_2},$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1^2 H_1}{R_2^2 H_2} = \frac{3}{2}.$$

Отже,

$$\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^3 = \frac{3}{2},$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \sqrt[3]{\frac{3}{2}},$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \sqrt[3]{\frac{3}{2}}.$$

Відтак,

$$T_2 = T_0 + \sqrt[3]{\frac{9}{4}}(T_1 - T_0).$$

Підставляючи числові дані, одержимо:

$$T_2 = 98,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

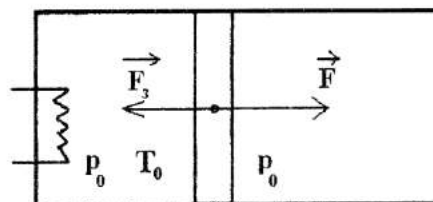
Аналогічно для банки об'ємом 1 л, температура води буде:

$$T_3 = T_0 + \frac{R_1 H_1}{R_3 H_3}(T_1 - T_0),$$

$$T_3 \approx 114 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отже, в однолітрової банці вода закипить.

#### Задача 4



1. Поршень почне рухатися в момент часу

$$t = t_{кр},$$

коли сила тиску газу буде

$$F = F_3 + F_{тер}.$$

$F_3 = p_0 S$  – сила зовнішнього тиску;

$F_{тер} = kN$  – максимальна сила тертя спокою.

Якщо поршень встановлено в циліндр без натягу (деформації), то

$$N = mg.$$

$F = p_{кр} S$ ;  $p_{кр}$  – певне критичне значення тиску.

Отже,

$$p_{кр} S = kmg + p_0 S;$$

$$p_{кр} = p_0 + \frac{kmg}{S}.$$

Отже, в часовому інтервалі від  $t = 0$  до  $t = t_{кр}$  поршень буде нерухомим, а газ нагріватиметься ізохорно ( $V = V_{const}$ ).



Для ізохорного процесу:

$$\frac{p_0}{T_0} = \frac{p_{кр}}{T_{кр}}$$

Критична температура газу:

$$T_{кр} = \frac{p_{кр} T_0}{p_0} = \frac{(p_0 S + kmg) T_0}{p_0 S}$$

За першим законом термодинаміки:

$$Q = \Delta U + A;$$

$$Q = q \cdot t;$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} R(T - T_0)$$

$A = 0$  (ізохорний процес)

$$q \cdot t = \frac{3}{2} R(T - T_0);$$

$$T = \frac{2qt}{3R} + T_0;$$

$$\frac{p_0}{T_0} = \frac{p}{T};$$

$$p = \frac{p_0 T}{T_0} = \frac{p_0}{T_0} \left( \frac{2qt}{3R} + T_0 \right).$$

2. При  $t > t_{кр}$  газ розширюється ізобарно:

$$p = p_{кр} = \text{const}.$$

На підставі першого закону термодинаміки:

$$Q = \Delta U + p_{кр} \Delta V = \frac{3}{2} R(T - T_{кр}) + p_{кр} \Delta V,$$

$$p_{кр} \Delta V = R(T - T_{кр}),$$

$$\begin{aligned} Q &= \frac{3}{2} R(T - T_{кр}) + R(T - T_{кр}) = \\ &= \frac{5}{2} R(T - T_{кр}) \end{aligned}$$

Кількість теплоти, отримана від нагрівника:

$$Q = q(t - t_{кр}).$$

Отже,

$$q(t - t_{кр}) = \frac{5}{2} R(T - T_{кр})$$

Відтак,

$$T = \frac{2q(t - t_{кр})}{5R} + T_{кр}.$$

Для визначення критичного моменту часу, використаємо рівняння першого закону термодинаміки для ізохорного процесу:

$$q \cdot t_{кр} = \frac{3}{2} R(T_{кр} - T_0);$$

$$t_{кр} = \frac{3}{2} \frac{R}{q} (T_{кр} - T_0);$$

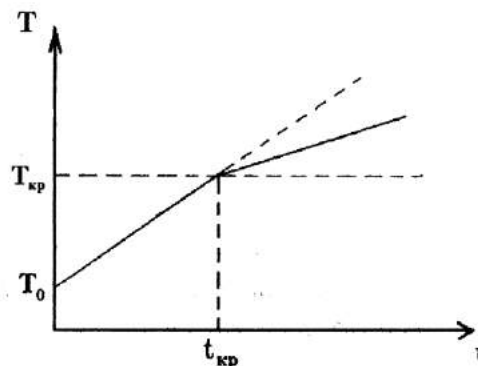
$$t_{кр} = \frac{3}{2} \frac{R}{q} \frac{kmg T_0}{p_0 S}.$$

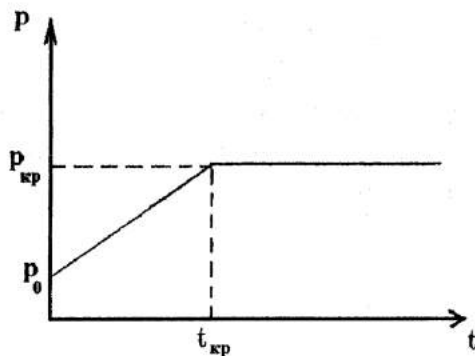
Отже, часові залежності  $T(t)$  та  $p(t)$  мають вигляд:

$$\begin{cases} T(t) = \frac{2}{3} \frac{qt}{R} + T_0 & \text{при } t \leq t_{кр} \\ T(t) = \frac{2}{5} \frac{q(t - t_{кр})}{R} + T_{кр} & \text{при } t > t_{кр} \end{cases}$$

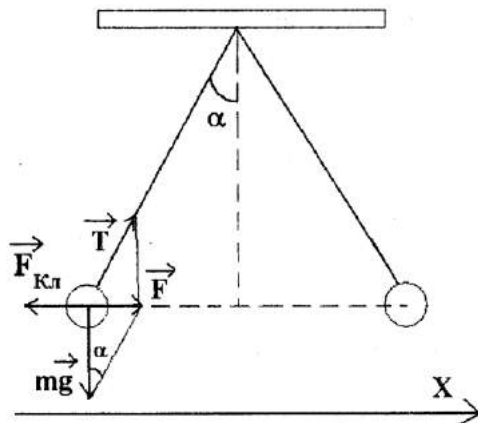
$$\begin{cases} p(t) = \frac{p_0}{T_0} \left( \frac{2}{3} \frac{qt}{R} + T_0 \right) & \text{при } t \leq t_{кр} \\ p(t) = p_{кр} = \text{const} & \text{при } t > t_{кр} \end{cases}$$

Графічні залежності  $T(t)$  і  $p(t)$  зображено нижче:





**Задача 5**



Оскільки кулька знаходиться в стані спокою, то

$$\vec{F}_{кл} + \vec{T} + m\vec{g} = 0.$$

У проекції на вісь  $Ox$ :

$$F_{кл} = F,$$

де  $\vec{F} = \vec{T} + m\vec{g}$ .

$$F_{кл} = k \frac{q^2}{d^2},$$

де  $q$  – заряд кульки;  $d$  – віддаль між кульками.

Силу  $F$  знаходимо з трикутника:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F}{mg}.$$

Звідси випливає, що

$$F = mg \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Кулька знаходиться в стані спокою, отже, ці сили рівні:

$$k \frac{q^2}{d^2} = mg \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Звідси випливає, що

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{k q^2}{d^2 mg} = \frac{k q^2}{d^2 \rho V g}. \quad (1)$$

Розглянемо кульку, занурену у рідкий діелектрик.

У цьому випадку сили, які діють на кульку, будуть:

$$\vec{F}_{кл} + \vec{T} + m\vec{g} + \vec{F}_A = 0,$$

де  $\vec{F}_A$  – сила Архімеда.

$$F_{кл} = k \frac{q^2}{\epsilon \cdot d^2},$$

$$F = (mg - F_A) \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

$$F_A = \rho_1 g V.$$

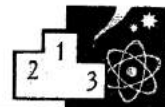
Аналогічно:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{k q^2}{\epsilon d^2 (mg - \rho_1 g V)} = \\ &= \frac{k q^2}{\epsilon d^2 (\rho g V - \rho_1 g V)} \end{aligned} \quad (2)$$

Кут розходження ниток у рідині та повітрі однаковий, отже, прирівняймо праві частини рівнянь (1) і (2)

$$\frac{k q^2}{d^2 \rho V g} = \frac{k q^2}{\epsilon d^2 (\rho g V - \rho_1 g V)} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\epsilon (\rho - \rho_1)},$$



$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\varepsilon(\rho - \rho_1)} \Rightarrow \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\varepsilon(\rho - \rho_1)},$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\varepsilon(\rho - \rho_1)} \Rightarrow \varepsilon = \frac{\rho}{\rho - \rho_1}$$

### II клас

#### Задача 1

Запишімо формулу для електричного опору мідного дроту:

$$R = \frac{\rho l}{S},$$

де  $\rho$  – питомий опір провідника.

Маса мідного дроту дорівнює

$$m = d l S,$$

тут  $d$  – густина міді.

Отже, в результаті розв'язку рівнянь одержимо:

$$l = \sqrt{\frac{mR}{d\rho}},$$

$$S = \sqrt{\frac{\rho m}{dR}}.$$

#### Задача 2

Після того, як трубку ставлять вертикально, повітря у верхній частині трубки зазнає ізотермічного розширення, а в нижній частині – ізотермічного стиснення. Кінцеві тиски  $p_1$  та  $p_2$  у верхній та нижній частинах трубки пов'язані співвідношенням:

$$p_2 - p_1 = cgh,$$

де  $c$  – густина ртуті.

За законом Бойля–Маріотта:

$$\begin{aligned} p_0 \frac{L-h}{2} &= p_1 \left( \frac{L-h}{2} + l \right) \\ &= p_2 \left( \frac{L-h}{2} - l \right) \end{aligned}$$

Розв'язавши систему трьох рівнянь із невідомими  $p_0, p_1, p_2$ , знайдемо тиск до якого відкачали трубку:

$$p_0 = \rho gh \frac{(L-h)^2 - 4l^2}{4l(L-h)}.$$

#### Задача 3

Мідне кільце падатиме з постійною швидкістю  $V$ . За сталої швидкості падіння потенціальна енергія переходить лише у внутрішню (кільце нагрівається індукційним струмом).

Запишімо закон збереження енергії:

$$mgV \Delta t = I^2 R \Delta t,$$

де  $I$  – сила струму індукovanого в кільці:

$$I = \frac{E_i}{R} = \frac{1}{R} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Враховуючи, що зміна магнетного потоку дорівнює  $\Delta \Phi = \Delta B_z S$ , отримаємо:

$$\begin{aligned} I &= \frac{\pi d^2 \Delta B_z}{4R \Delta t} = \frac{\pi d^2 \Delta B_z \Delta z}{4R \Delta z \Delta t} \\ &= \frac{\pi d^2 \Delta B_z V}{4R \Delta z} = \frac{\pi d^2 V B_0}{4R z_0} \end{aligned}$$

Тут ми врахували, що

$$\frac{\Delta z}{\Delta t} = V,$$

$$\frac{\Delta B_z}{\Delta z} = \frac{B_0}{z_0}.$$

Підставляючи силу струму у закон збереження енергії, знаходимо швидкість падіння кільця:

$$V = mgR \left( \frac{4z_0}{\pi d^2 B_0} \right)^2.$$

#### Задача 4

За умовою задачі куб під дією прикладеної до нитки сили має почати перекидатись без тертя. Оскільки нитка прикріплена до середини

одного із верхніх горизонтальних ребер і її тягнуть перпендикулярно до цього ребра, то куб має почати перекидатись через нижнє ребро, яке паралельне реброві, до якого прикріплена нитка. На рисунку зображено сили, які діють на куб, коли за нитку тягнуть донизу або догори під кутом  $\alpha$  до горизонту з силою  $F$  так, що за незначного збільшення сили  $F$  куб починає перекидатись (є чотири можливі випадки прикладання сили  $F$ ). Оскільки куб є однорідним, то сила тяжіння прикладена до його центру. Точки прикладання сил реакції опори і тертя в першому і другому випадках позначенні буквою  $O_1$ , а в третьому і четвертому –  $O_2$ .

Розгляньмо перший випадок прикладання сили. У цьому випадку кут  $\alpha_1$  змінюється в межах

$$0 \leq \alpha_1 \leq \frac{\pi}{2}.$$

Запишімо рівняння Ньютона і правило моментів сил (виберімо за вісь перекидування ребро куба, яке проходить через точку  $O_1$ ):

$$\begin{aligned} N_1 - mg - F_1 \sin \alpha_1 &= 0, \\ F_{mp1} - F_1 \cos \alpha_1 &= 0, \\ 0,5amg - aF_1 \cos \alpha_1 &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Величина сили тертя спокою не може перевищувати добутку коефіцієнта тертя на силу реакції опори, тобто має виконуватись нерівність:

$$F_{mp} \leq \mu N. \quad (2)$$

Із рівняння (1) сила натягу нитки дорівнює

$$F_1 = \frac{mg}{2 \cos \alpha_1}.$$

Із нерівності (2) і рівняння (1) отримаємо таку умову:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 \geq \frac{1}{\mu} - 2.$$

Отже,

$$\cos \alpha_1 \leq \frac{\mu}{\sqrt{5\mu^2 - 4\mu + 1}},$$

а мінімальне значення сили буде:

$$F_{1\min} = 0,5mg \sqrt{5 - \frac{4}{\mu} + \frac{1}{\mu^2}}.$$

У другому випадку кут  $\alpha_2$  змінюється в межах

$$0 < \alpha_2 \leq \frac{\pi}{4}.$$

Запишімо рівняння Ньютона і правило моментів сил:

$$\begin{aligned} N_2 - mg + F_2 \sin \alpha_2 &= 0, \\ F_{mp2} - F_2 \cos \alpha_2 &= 0, \\ 0,5amg - aF_2 \cos \alpha_2 &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Сила натягу нитки в цьому випадку дорівнює

$$F_2 = \frac{mg}{2 \cos \alpha_2},$$

а відповідна умова на кут:

$$\operatorname{tg} \alpha_2 \leq 2 - \frac{1}{\mu}.$$

Оскільки, за умовою задачі

$$\mu < 0,5, \text{ то } \operatorname{tg} \alpha_2 < 0.$$

Враховуючи, що кут  $\alpha_2$  змінюється в межах

$$0 < \alpha_2 \leq \frac{\pi}{4},$$

то другий випадок не реалізується.

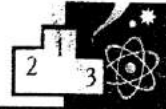
Розгляньмо такий випадок.

Кут  $\alpha_3$  змінюється в межах

$$\frac{\pi}{4} < \alpha_3 \leq \frac{\pi}{2}.$$

Вибираючи за вісь перекидування ребро куба, яке проходить через точку  $O_2$ , запишімо правило для моменту сил і рівняння Ньютона:





$$N_3 - mg + F_3 \sin \alpha_3 = 0,$$

$$F_{mp3} - F_3 \cos \alpha_3 = 0,$$

$$0,5mg - aF_3 \sin \alpha_3 + aF_3 \cos \alpha_3 = 0. \quad (4)$$

У цьому випадку

$$F_3 = \frac{0,5mg}{(\sin \alpha_3 - \cos \alpha_3)},$$

а з виразів (2) та (4) отримаємо таку нерівність

$$\cos \alpha_3 \leq (\sin \alpha_3 - 2\cos \alpha_3) \mu.$$

Мінімальне значення сили досягається при куті  $\alpha_3 = \frac{\pi}{2}$ :

$$F_{3\min} = \frac{mg}{2} < F_{l\min},$$

тобто нитку потрібно тягнути вертикально.

Аналогічно, для четвертого випадку отримаємо такі рівняння:

$$N_4 - mg + F_4 \sin \alpha_4 = 0,$$

$$F_{mp4} - F_4 \cos \alpha_4 = 0,$$

$$0,5mg - aF_4 \sin \alpha_4 - aF_4 \cos \alpha_4 = 0. \quad (5)$$

Із рівняння (2) та (5) отримаємо:

$$F_4 = \frac{0,5mg}{(\sin \alpha_4 + \cos \alpha_4)} = \frac{0,5mg}{\sqrt{2} \sin \left( \alpha_4 + \frac{\pi}{4} \right)},$$

$$\operatorname{ctg} \alpha_4 \leq \frac{\mu}{(1-2\mu)}.$$

Мінімальне значення сили  $F_4$  досягається за значення кута  $\alpha_4 = \frac{\pi}{4}$ :

$$F_{4\min} = \frac{mg}{2\sqrt{2}}.$$

Слід зауважити, що це значення сили справдливе, коли  $\mu \geq \frac{1}{3}$ .

Якщо

$$0 \leq \mu < \frac{1}{3},$$

то нитку потрібно тягнути під кутом

$$\alpha_4 = \arccos \left[ \frac{\mu}{\sqrt{(1-2\mu)^2 + \mu^2}} \right],$$

а відповідне мінімальне значення сили

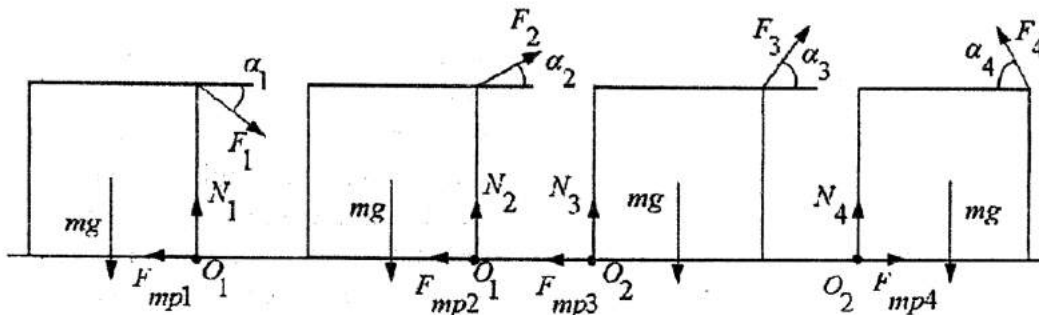
$$F_{4\min} = \frac{mg \sqrt{(1-2\mu)^2 + \mu^2}}{2(1-\mu)}.$$

Отже, коли  $0 \leq \mu < \frac{1}{3}$ , нитку потрібно тягнути під кутом

$$\alpha_4 = \arccos \left[ \frac{\mu}{\sqrt{(1-2\mu)^2 + \mu^2}} \right],$$

до горизонту з мінімальною силою

$$F_{4\min} = \frac{mg \sqrt{(1-2\mu)^2 + \mu^2}}{2(1-\mu)}.$$



Якщо  $\frac{1}{3} \leq \mu < \frac{1}{2}$ , то нитку потрібно тягнути під кутом  $\alpha_4 = \frac{\pi}{4}$  до горизонту з силою

$$F_{4\min} = \frac{mg}{2\sqrt{2}}.$$

### Задача 5

Оскільки точкове джерело світла перебуває в фокусі лінзи, то промені світла, які виходять з лінзи, є паралельні до її головної осі. Виходячи з лінзи, пучок світла розчеплюється на два паралельні пучки внаслідок їхнього заломлення (рис. 1).

За законом заломлення променів:

$$\sin \gamma_1 = n_1 \sin \alpha,$$

$$\sin \gamma_2 = n_2 \sin \alpha.$$

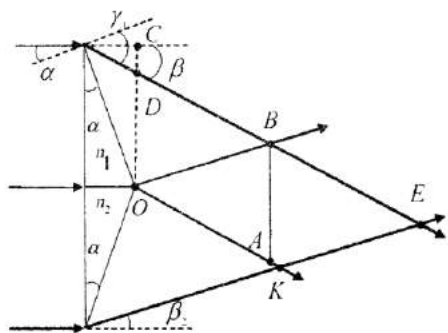


Рис. 1

Заломлені промені утворюють відповідно кути  $\beta_1$  та  $\beta_2$  із падаючими на лінзу променями. З рис. 1 видно, що

$$\beta_1 = \gamma_1 - \alpha,$$

$$\beta_2 = \gamma_2 - \alpha.$$

Оскільки за умовою задачі  $\alpha \ll 1$ , тоді синус малого аргумента дорівнює самому аргументу:

$$\beta_1 = (n_1 - 1)\alpha,$$

$$\beta_2 = (n_2 - 1)\alpha.$$

За умовою задачі

$$n_1 > n_2,$$

тоді  $\beta_1 > \beta_2$ .

Інтерференційна картина може спостерігатися тільки в ділянці перекривання, пучків світла, що вийшли з призми, тобто в середині паралелограма  $OBEC$ . Площина екрана перпендикулярна до головної осі, тоді максимальний розмір інтерференційної картини дорівнює довжині відрізка  $AB$ .

З рисунку одержимо:

$$\begin{aligned} AB &= OD = OC - DC = \\ &= b - b \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta_1 = \\ &= [1 - (n_1 - 1)a^2] b \end{aligned}$$

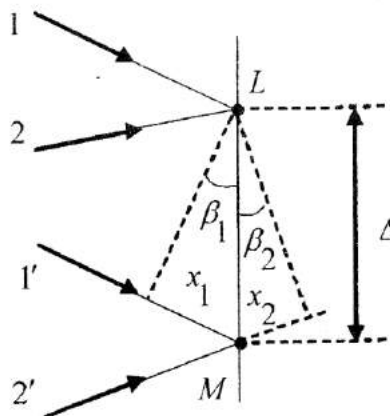
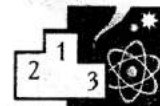


Рис. 2.

Для розрахунку ширини  $\Delta$  інтерференційної смуги розглянемо рис. 2, на якому зображено переріз площиною тої частини екрану, яка знаходиться в ділянці перекривання світлових пучків. Нехай різниця ходу світлових променів, які перетинаються в точці 1 і 2 дорівнюють нулеві. Тоді в цій точці спостерігатиметься максимум нульового порядку, а в



точці  $M$  максимум першого порядку, якщо різниця ходу  $x_1 + x_2$  падаючих в цю точку променів  $1'$  та  $2'$  дорівнює  $\lambda$ .

Оскільки

$$x_1 = \Delta \cdot \sin \beta_1 = \Delta \beta_1 \quad \text{і} \quad x_2 = \Delta \cdot \sin \beta_2 = \Delta \beta_2,$$

тоді ширина смуги може бути знайдена із співвідношення:

$$\lambda = (n_1 + n_2 - 2)\alpha \cdot \Delta.$$

Звідси бачимо, що ширина спостережуваної інтерференційної смуги не залежить від відстані екрану до призми. Максимальна кількість інтерференційних смуг дорівнює цілій частині відношення:

$$\frac{AB}{\Delta} = \frac{(n_1 + n_2 - 2)[1 - (n_1 - 1)\alpha^2]b\alpha}{\lambda}.$$

## ВСЕУКРАЇНСЬКИЙ ФЕСТИВАЛЬ НАУКИ

З метою популяризації науки в Україні 17–19 травня 2010 року відбулися заходи з нагоди Всеукраїнського фестивалю науки. У межах святкувань передбачено наукові доповіді, зустрічі школярів і студентів з науковцями, екскурсії, ознайомлення з науковими лабораторіями та досягненнями українських учених, презентації нових видань тощо.

У Великій залі Національної академії наук України в Києві 17 травня 2010 року відбулося урочисте відкриття Всеукраїнського фестивалю науки, під час якого виступили видатні українські учені.

Святкові заходи відбулися в багатьох наукових установах України. Зокрема в Інституті фізики НАН України урочисте засідання відкрив директор Інституту член-кореспондент НАН України Л. П. Яценко. Підведено підсумки першого в Інституті щорічного конкурсу молодих учених та аспірантів на здобуття премій імені видатних вчених ІФ НАН України. Заступник директора з наукової роботи, голова журі конкурсу доктор фізико-математичних наук А. М. Негрійко оголосив першого лавреата премії ім. О. Г. Гольдмана кандидата фізико-математичних наук А. О. Тимофієва. Цю премію вперше започатковано на пошану першого директора Інституту академіка О. Г. Гольдмана для молодих учених. Перший номінант виступив із лекцією “Магнетні наночастинки: властивості, застосування, перспективи”.

Із доповідями також виступили:

– “Потужні атмосферні вихори: торнадо, тайфуни, циклони” (головний науковий співробітник ІФ НАН України, член-кореспондент НАН України Е. А. Пашицький);

– “Тунельна мікроскопія окремих атомів і молекул” (провідний науковий спеціаліст, доктор фізико-математичних наук О. А. Марченко);

– “До 50-річчя створення лазерів. Внесок ІФ НАН України” (завідувач відділом ІФ НАН України, член-кореспондент НАН України М. С. Соскін);

– “Адсорбція кисню та її роль в електроніці, технологічних процесах і захисті довкілля” (науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, лавреат премії ім. П. Г. Борзяка ІФ НАН України 2009 року Д. Ю. Балакін).

Директор Державного фонду фундаментальних досліджень, доктор економічних наук Б. Р. Кияк і директор наукового видавництва “Євросвіт”, заступник головного редактора журналу “Світ фізики” Г. М. Шопа презентували книжку Олександра Проскури “Осяяні світлом науки. Збірник нарисів з історії фізики”, присвяченої до 80-річчя заснування ІФ НАН України та 125-річчя від дня народження О. Г. Гольдмана. Це видання вийшло у світ у серії “Бібліотека молодого науковця”.

Подібні заходи відбулися і в інших наукових установах України.



# СУХІ СМЕРЧІ ТА ОЗОН

Б. М. Стефанюк,

професор

Глянувши на фізичну карту Землі, зауважимо, що її охоплюють дві зони пустель: північна, що проходить через північну Африку, Азію і Північну Америку в коридорі  $\sim 30 \pm 15^\circ$  північної широти, і південну, що проходить через південну Африку, Австралію та Південну Америку в коридорі  $\sim 26 \pm 8^\circ$  південної широти.

Пустелі займають майже 20 % площі континентів.

Напрошуються запитання:

1. Що спільного між цими пустелями з погляду геоєкології?
2. Що послужило першопричиною виникнення пустель?
3. Чому на тих пустельних просторах не працює властивість екологічної сукцесії?

Відповідь на ці запитання слід шукати у фундаментальних процесах, що відбуваються в атмосфері Землі. Первинна основа – загальна сонячна електромагнетна радіація як причина глобальних вітрів.

Згадаймо, що 1735 року Дж. Гедлі, а 1856 року В. Форрела відкрили глобальні циркуляції повітря, які тепер називають осередками Гедлі та осередками Форрела, в яких у приземній частині вітри дують в одному напрямку, а на висотах над ними – в протилежному з деяким поворотом під впливом коріолісової сили (рис. 1) [1].

У верхніх шарах тропосфери, у тропопаузі та у нижніх шарах стратосфери висотні вітри осередків Гедлі і Форрела дують назустріч один одному зі швидкістю майже 100 м/с, при

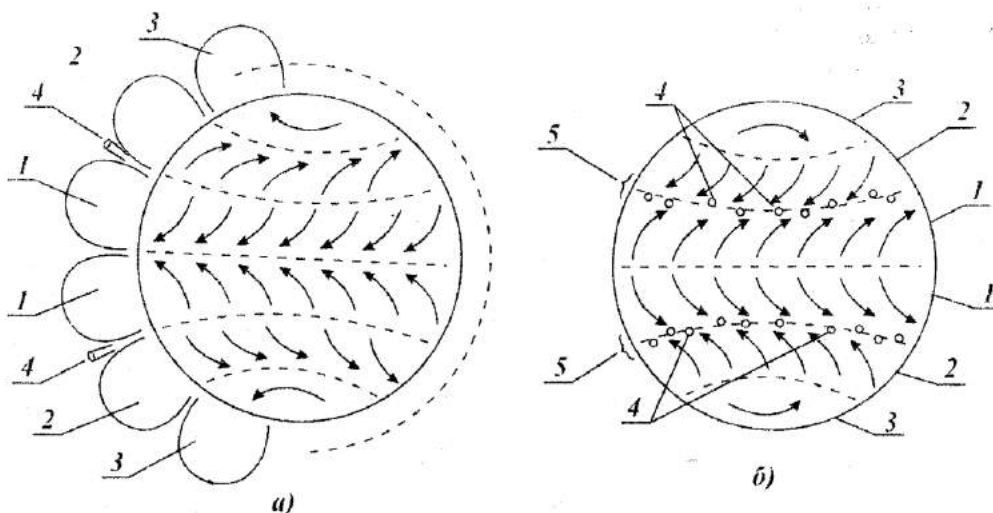


Рис. 1. Схема глобальних вітрів з осередками циркуляції:  
а) нижні вітри біля поверхні Землі; б) верхні вітри тропосфери, тропопаузи і нижньої стратосфери.

1 – осередок Гедлі; 2 – осередок Форрела; 3 – полярний антициклон;  
4 – сухі смерчі; 5 – північна зона пустель; 6 – південна зона пустель





цьому утворюються потужні вихори – сухі смерчі. Їх діаметри, за первинною оцінкою, становлять від 0,5 до 8 км. Слід мати на увазі, що на висоті 20 км над рівнем моря основний склад повітря: азот – 81,24 %, кисень – 18,10 %, аргон – 0,53 % і водень – 0,04 % [1].

У середніх географічних широтах на висоті 12–22 км знаходиться максимум озону, у тропіках – на 5 км вище, а в полярних зонах Землі – на 3 км нижче [2].

Добре відома молярна маса основних складових атмосфери:  $O_2 - 32$ ,  $N_2 - 28$ ,  $Ar - 40$ ,  $H_2 - 2$ ,  $O_3 - 48$ .

Враховуючи вищесказане, стає зрозумілим, що сухі смерчі працюють як потужні вертикальні центрифуги, що розділяють молекули газів за їх масою. Якщо ще врахувати надмолекулярну структуру газів при температурі  $-60\text{ }^\circ\text{C}$  [3], одержану за методикою [4] на підставі динамічної в'язкості газів за цієї ж температури, то гази розподіляться у сухому смерчі послідовно від центра до периферії, як показано в таблиці.

Отже, озон у “центрифугі” сухого смерчу сконцентрується вузьким кільцем між центральним кругом, в якому зберуться водень  $14H_2$ , кисень  $O_2$  і аргон  $Ar$ , та поясом, в якому зберуться дімери азоту  $2N_2$ , кисню  $2O_2$  і аргону  $2Ar$  (рис. 2).

Радіус озонowego кільця (“перстня”) обчислимо з рівняння:

$$\frac{\pi r^2}{\pi R^2 - \pi r^2} = \frac{0,0288}{0,9712}$$

де  $R$  – радіус сухого смерчу, км;  $r$  – радіус озонowego кільця, км,

$$r = 0,17R,$$

### Розподіл газів у сухому смерчі

Газ або дімер	$14H_2$	$O_2$	$Ar$	$O_3$	$2N_2$	$2O_2$	$2Ar$
Молярна маса	28	32	40	48	56	64	80
Кількість на висоті 20 км, %	0,04	2,7	0,14		81,24	15,4	0,39
Частка газів до і після озону	0,0288				0,9712		

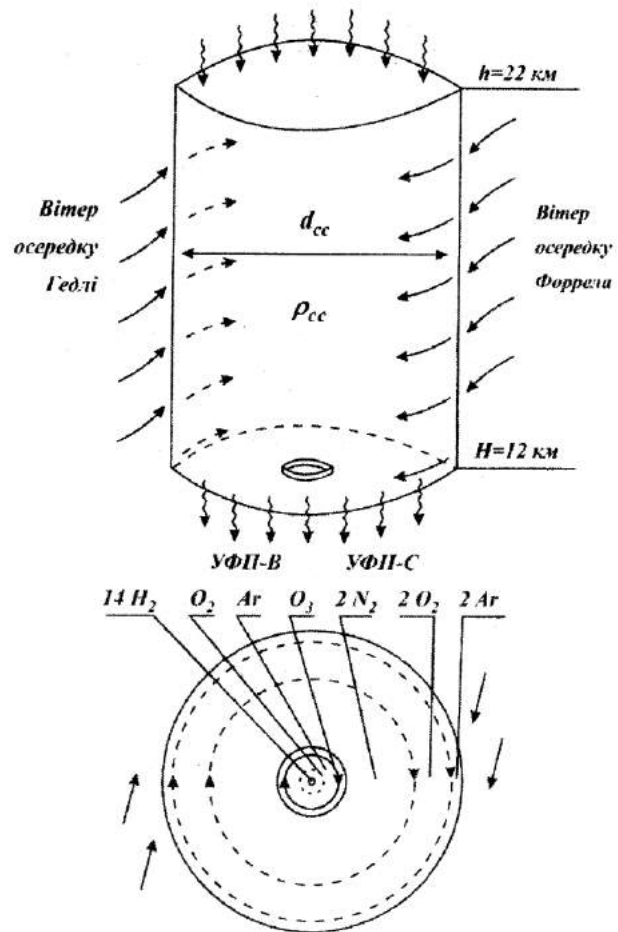


Рис. 2. Модель сухого смерчу  
 $d_{cc}$  – діаметр сухого смерчу;  $\rho_{cc}$  – густина повітря в центрі сухого смерчу

тобто при  $R = 4$  км маємо  $r = 680$  м, а при  $R = 0,25$  км –  $r = 42$  м.

До того ж, у центрі сухого смерчу тиск на порядок менший від тиску на периферії.

Отже, центр і пояс сухого смерчу майже без перешкод пропускають ультрафіолетове випромінювання і в діапазоні  $290\text{ нм} < \lambda < 320\text{ нм}$  УФ спектра (УФП-В), і в діапазоні

### Таблиця



200 нм <  $\lambda$  < 290 нм УФ спектра (УФП-С), що досягає поверхні Землі й вбиває на своєму шляху живі організми, спричиняє пожежі в степах і лісах.

За діаметра сухого смерчу 100 м, що теж ймовірно, радіус озонового “перстня” – біля 8,5 м. Сліди такого сухого смерчу на злакових полях сприймають деколи як сліди НЛО.

Отже, озонова захисна парасолька поверхні Землі має “дірки”, що пливають над територіями пустельних зон, систематично перешкоджаючи відновленню там повноцінного біологічного життя.

Запиленість атмосфери, зокрема в містах, на 10–15 % послаблює вплив “дірок”, але запиленість повітря не є тим чинником, який може забезпечити стійкість гомеостазу (самокерування) на протидію сухим смерчам, тому що одне лихо замінюється іншим.

“Дірки” в озоновій парасольці з’являються не лише через природні процеси під дією сонячного “подиху” у бік Землі. Вони можуть виникати як антропогенний вплив на атмосферу, наприклад, запуск потужних ракет [2]. Ще у 80–90 роках минулого сторіччя деякі вчені попереджали про “бомби сповільненої дії”, зокрема, Б. Кантонович [5] і Г. Хефлінг [6].

Враховуючи вищезазначене, людина, використовуючи потужну ракетну зброю, мимоволі натискає спусковий механізм проти ПРИРОДИ, тобто проти себе самої.

Задля ЖИТТЯ на Землі, торгівля потужною ракетною зброєю має бути заборонена. Для запуску космічних кораблів належить встановити регламент безпеки з урахуванням ймовірності провокування сухих смерчів.

Проблема сухих смерчів – одна із найважливіших проблем ЛЮДСТВА.

### Висновки

1. Екологічна захисна парасолька життя на Землі – озон – має “дірки”, що стали причиною появи пустель на континентах Землі.

2. На висотах 12–22 км між глобальними вітровими осередками Гедлі і Форрела зароджуються сухі смерчі, які утворюють рухомі безозонові “дірки” в атмосфері Землі.

3. Вивчення сухих смерчів потрібне для планомірного цілеспрямованого відновлення пустель, тобто їхнього повернення до процвітаючого біологічного життя, як вельми суттєвого резерву продуктів харчування людства.

4. Дослідження сухих смерчів і супутніх явищ з метою недопущення екологічної катастрофи – задача міжнародних угод та договорів під егідою ООН.

### Література

1. Николайкин Н. И., Николайкина Н. Е., Мелихова О. П. *Экология*. Учебник для вузов, 4-е изд. – М.: Дрофа, 2005. – 622 с.
2. Данилов А. А., Кароль И. П. *Атмосферный озон – сенсации и реальность*. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 120 с.
3. Стефанюк Б. М., Стефанюк Я. Б., Сенкус В. В. *Надмолекулярная структура газов тропосферы*// Природные условия, история и культура Западной Монголии и сопредельных регионов. Материалы VIII международной конференции г. Горно-Алтайск, 19–23 сентября 2007 г. Т. II. – Горно-Алтайск: РИО Горно-Алтайского университета, 2007. – С. 301–305.
4. Стефанюк Б. М., Стефанюк Я. Б. *Вязкость как интегральное свойство структуры газов*/ Природные условия, история и культура Западной Монголии и сопредельных регионов. Материалы VIII международной конференции г. Горно-Алтайск, 19–23 сентября 2007 г. Т. II. – Горно-Алтайск: РИО Горно-Алтайского университета, 2007. – С. 292–295.
5. Китанович Б. *Планета и цивилизация в опасности*// Перев. с сербс. – М.: Мысль, 1985. – 240 с.
6. Хефлинг Г. *Тревога в 2000 году: бомбы замедленного действия на нашей планете*// Перев. с немец. – М.: Мысль, 1990. – 270 с.

**Стасюк І. В., Левицький Р. Р., Моїна А. П., Сливка О. Г., Величко О. В. Польові та деформаційні ефекти у складних сегнетоактивних сполуках.** – Ужгород: Гражда, 2009. – 392 с.



Монографію присвячено ефектам, які пов'язано з дією зовнішніх полів (електричне поле, механічне напруження), у сегнетоелектричних кристалах з фазовими переходами типу лад-безлад. Подано результати експериментальних і теоретичних досліджень у цій галузі, що проводять упродовж останніх років в Інституті фізики конденсованих систем НАН України та Ужгородському національному університеті. Основну увагу звернено на розвиток та аналіз підходів, які ґрунтуються на мікроскопічних моделях типу моделі протонного впорядкування та на напівфеноменологічному описі деформаційних та п'єзоелектричних явищ, а також на експериментальні дослідження структурних фазових переходів та полікритичних явищ у зовнішніх полях у сполуках типу Sn,P,S, з неспівмірними фазами. Об'єктами, що вивчають, є також сегнетоактивні кристали

групи KDP (ADP), сегнетоелектрики DMAAlS і DMACaS з реорієнтаційними переходами, системи зі складною орієнтацією ефективних дипольних моментів (кристали GPI та сегнетової солі). Подано також огляд літературних даних, проаналізовано стан проблеми і розвитку теорії та експерименту у цій галузі.

Монографія може бути корисною для науковців, що працюють у галузі фізики сегнетоелектричних явищ. Викладені в ній методи та результати можна використати під час вивчення та описі польових ефектів у інших сегнетоактивних сполуках, зокрема в системах зі змішаним механізмом фазових переходів; вони можуть також стимулювати розроблення, спрямовані на практичне застосування згаданих ефектів.

**Вайданич В. І., Пенцак Г. М. Фізика (з лісоекологічними та біофізичними аспектами).** Підручник. – Львів: Національний лісотехнічний університет України, 2009. – 648 с.

В одностомному підручнику подано систематичний виклад основ курсу загальної фізики в тісному поєднанні з основними питаннями біофізики, насамперед біофізики рослин, без виділення останніх в окремі розділи. Широко представлені новітні відкриття та досягнення у фізиці кінця XX і початку XXI сторіч: відкриття Нобелівських лавреатів до 2008 року включно, неоднорідності реліктового випромінювання, гігантського магнетоопору тощо. Обговорюються питання темної маси та темної енергії – загадки XXI стовіччя, розглянуто сучасні погляди на об'єднанчі теорії взаємодії, питання загальної теорії відносності та еволюції Всесвіту. Не залишено без уваги проблеми екології, які мають пряме відношення до фізики явищ, які розглядають. Обговорюються питання нанофізики, нанотехнологій, їх прикладного значення, електричні й магнетні поля біологічних структур, їхнє використання для діагностики біологічних об'єктів. Запропонований підручник репрезентує короткий загальний курс фізики початку нового тисячоліття.



Для студентів технічних та технологічних спеціальностей, зокрема для лісівничих, агрономічних, біологічних та педагогічних спеціальностей, буде корисний для всіх, хто цікавиться видатними відкриттями фізичної науки нині, її проблемами та проектами деяких найбільших майбутніх експериментів.





**Святослав  
ГОРДИНСЬКИЙ  
(1906–1993)**

**Іконографія церкви  
Святого великомученика  
Юрія Переможця  
в Едмонтоні**



**Святослав Гординський народився 30 грудня 1906 р. у Коломиї. Батько, Ярослав Гординський, був відомим літературознавцем, сестра навчалася музиці у Відні, брати вивчали медицину у Відні та Мюнхені.**

**Закінчивши Академічну гімназію у Львові, він 1924 р. вступив до Мистецької школи Олекси Новаківського, що була відділом Політехніки Українського таємного університету у Львові. Гординський 1927 року виїхав до Берліна. Відвідував курси рисунка при Берлінській Академії мистецтв у професора Залозецького, а 1928 р. переїхав до Парижа, де студіював спершу в Академії Жуліян (клас Жана-Поля Лорана), згодом – навчався мистецтву композиції і плаката у “Модерній Академії” Фернана Леже. Брав участь у виставках Салону французьких художників, Салону художників-декораторів (обидві у Гран Пале), Міжнародного салону книжкового мистецтва в Пті Пале.**

**У літературній галузі за висловами критиків, С. Гординський разом з Б.-І. Антоничем створив нову модель української поезії 1930-х років.**

**Наукова робота Гординського тісно переплетена з редакторською та видавничою діяльністю. Він був дійсним членом Наукового Товариства Шевченка і Української Вільної Академії Наук. З 1944 р. С. Гординський мешкав у Мюнхені, а 1949 р. переїхав до США.**

**Талановито і плідно творив митець у різних жанрах – живопис, графіка, плакат, екслібрис, художнє оформлення книжок. Але основним у його роботі з образотворчого мистецтва було монументальне малярство. Його іконографія прикрасила понад 30 церков в Америці, Європі та Австралії, серед них п'ять кафедральних соборів (два у Вінніпезі, Римі, Мюнхені та Мельбурні).**

**20 травня 1993 р. у далекому Нью-Джерсі перестало битися серце Митця. Похований він на українському цвинтарі святого Андрія у Бавнд-Бруку поблизу Нью-Йорка.**



**Вітальні поштівки  
Святослава  
Гординського**