

енергію поживних речовин. Споживаючи хімічну енергію, збережену рослинами (їжу), організм людини перетворює її в хімічну енергію клітин. Хімічна енергія, що її запасено, наприклад, у м'язах людини, перетворюється в механічну енергію (кінетичну енергію руху).

### V. Первинне осмислення нового матеріалу.

#### Бесіда за запитаннями

1. Наведіть приклади об'єктів кожного зі структурних рівнів Всесвіту.
2. Яка теорія переважно описує: мікросвіт; макросвіт; мегасвіт?
3. Чому кожна фізична теорія має межі застосування?
4. Які фундаментальні взаємодії ви знаєте? Наведіть приклади їх виявів.

5.3 якою властивістю простору або пов'язаний: закон збереження й перетворення енергії; закон збереження імпульсу?

6. Які існують види енергії?

### VI. Закріплення здобутих знань.

Одна із корисних господарських порад є такою: якщо ви взимку зберігаєте картоплю в лоджії, то щоб запобігти замерзанню картоплі в ящику, де вона зберігається, слід прилаштувати електричну лампу розжарювання й періодично її вмикати. Навіщо? Хіба в темряві холодніше, ніж на світлі? (Електрична енергія у лампі розжарювання перетворюється в теплову. 1 лише 5 % електричної енергії перетворюється в енергію світла, решта – у внутрішню енергію.)

На малюнку 3 (с. 2 обкладинки) подано декілька прикладів перетворення енергії. їжа дає енергію для руху; хімічна енергія перетворюється в механічну; б) Сонце дає енергію рослині: енергія випромінювання перетворюється в хімічну енергію; в) паливо дає енергію автомобілю: хімічна енергія перетворюється в механічну енергію; г) увімкнена електроплита нагрівається: електрична енергія перетворюється в теплову.

**VIII. Домашнє завдання.** § 39. Вправа № 39: завдання 3, 4 (усно); 6 (письмово). Експериментальне завдання після § 39 (за бажанням).

## Дещо про лупу

Олександр ЄФІМЕНКО, учитель-методист ЗОШ № 28 м. Житомира;

Дмитро СТЕПАНЧИКОВ, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики Житомирського державного університету ім. Івана Франка

Для того щоб бачити точки предмета відокремленими, тобто забезпечити роздільну здатність ока, треба спостерігати їх під достатньо великим кутом, який для нормального зору має бути не меншим за 1'. З наближенням ока до предмета кут зору зростає, однак через обмеженість можливості акомодатії ока його подальшого збільшення можна досягти лише застосовуючи оптичні прилади.

Лупа належить до найпростіших оптичних приладів, що їх вивчають за новою програмою у курсі фізики 9 класу загальноосвітніх навчаль-

них закладів [1]. Для пояснення сучасним учням дії лупи достатньо показати, що збиральна лінза при розміщенні предмета між нею і фокусом утворює уявне збільшене зображення, що видно крізь лупу [2]. Однак із допитливими учнями особливості лупи можна розглянути глибше, що сприятиме їхньому розвитку, формуванню предметних і ключових компетентностей.

За кутове збільшення оптичного приладу приймають відношення:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} u}{\operatorname{tg} u_0}, \quad (1)$$

де  $u$  та  $u_0$  – кути, під якими видно предмет за допомогою оптичного приладу і без нього. Для безпосереднього спостереження простим оком предмет розмішують на найменшій відстані спостереження, за якої око не втомлюється (мал. 1). Цю відстань називають *відстанню найкращого зору* і приймають рівною  $L_0=25$  см. Оптична система ока, що складається з рогівки, водянистої вологи, кристаліка, склистого тіла, проектує зображення на сітківку. В більшості випадків для спрощення можна замінити цю систему однією збиральною лінзою, з обох боків від якої міститься повітря й яку суміщають із кристаліком. Тоді, як це видно з мал. 1.

$\text{tg } u_0 = \frac{h}{L_0}$ , де  $h$  – розмір предмета.

Якщо предмет розмішується від лінзи на відстані  $d < F$ , то уявне зображення буде на відстані  $f = \frac{Fd}{F-d}$ , а його довжина становитиме

$$H = \frac{f}{d} h \text{ (мал.2).}$$

У разі розміщення ока на відстані  $l$  від лінзи стрілку буде видно під кутом, для якого  $\text{tg } u = \frac{H}{f+l}$ . Кутове збільшення при цьому становить:

$$\gamma = \frac{\text{tg } u}{\text{tg } u_0} = \frac{FL_0}{Fd + l(F-d)}. \quad (2)$$

У підручниках, виводячи формулу збільшення лупи, як правило, розглядають випадок, коли предмет розмішується у фокусі лупи  $d=F$ . Тоді промені, що виходять з довільної точки предмета, після заломлення в лупі будуть паралельними (мал. 3).

Око при цьому має бути акомодоване на нескінченність, і незалежно від відстані  $l$  між лінзою та оком збільшення лупи становитиме [3; 4]:

$$\gamma = \frac{\text{tg } u}{\text{tg } u_0} = \frac{L_0}{F}. \quad (3)$$

Аналогічний результат одержують за умови  $l=F$  (незалежно від  $d$ ).

Оскільки  $d < F$ , то максимального збільшення можна досягти, зменшуючи відстань  $l$  між лінзою та оком до нуля.

При цьому:

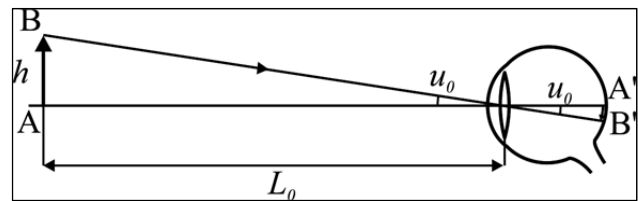
$$\gamma = \frac{\text{tg } u}{\text{tg } u_0} = \frac{L_0}{d}. \quad (4)$$

Зі зменшенням відстані між предметом і лінзою зменшуватиметься і відстань від лінзи до зображення. Але відстань до зображення не може бути меншою за відстань найкращого зору. Через те максимальне збільшення одержують за умови  $f = L_0$ , при цьому  $d = \frac{FL_0}{F+L_0}$ .

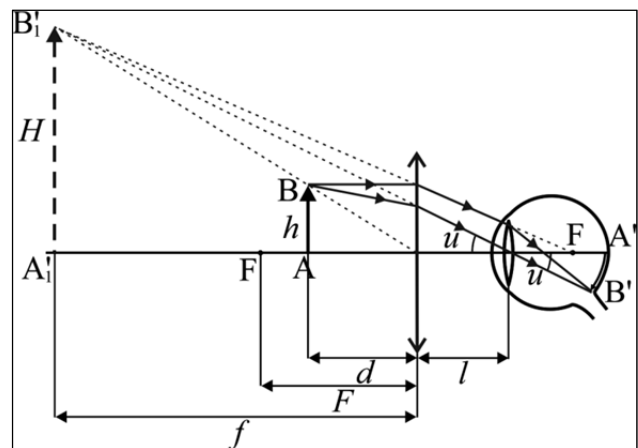
Тоді збільшення лупи становитиме:

$$\gamma = \frac{(L_0 + F)L_0}{L_0 F} = 1 + \frac{L_0}{F}. \quad (5)$$

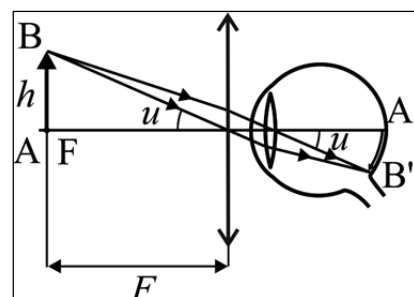
Отже, максимальне кутове збільшення лупи є на одиницю більшим від зазначеного в багатьох підручниках, і навіть довгофокусна лін-



Мал. 1. Одержання зображення предмета під час спостереження простим оком



Мал. 2. Одержання зображення предмета під час спостереження за допомогою лупи, якщо предмет розташований між лупою та її переднім фокусом



Мал. 3. Одержання зображення предмета під час спостереження за допомогою лупи, якщо предмет розміщений у її передньому фокусі (око акомодовано на нескінченність)

за може забезпечити збільшення, що перевищує одиницю. Наприклад, за допомогою у з фокусною відстанню 5 см можна одержати 6-кратне збільшення, розмістивши око впритул до лінзи, а предмет – на відстані  $4\frac{1}{6}$  см від неї. У разі більшої відстані між лупою та предметом збільшення стає меншим, а в разі меншої відстані зображення, що його сприймає око, стає нечітким.

Якщо віддаляти око від лупи, то може виникнути ілюзія зростання збільшення. Це пояснюється тим, що зображення стає видно проти все більшої частини лінзи, а коли його розміри перевищують діаметр лупи, то, починаючи з деякої відстані до ока, його частини взагалі зникають з поля зору. Насправді кутове збільшення стає меншим. Подібне явище спостерігалось би, якби зображення замінили реальним об'єктом, а лупу – отвором у ширмі.

Для забезпечення роздільної здатності ока треба збільшувати кут зору, а не значення його тангенса. Якщо за кутове збільшення прийняти відношення кутів, а не їх тангенсів, то збільшення може відрізнятись від визначеного за формулами. Розглянемо частинний випадок, коли предмет у вигляді стрілки розміщено у фокальній площині, початок стрілки – у фокусі. У разі розміщення ока на головній оптичній осі, незалежно від відстані його до лупи, зображення стрілки буде видно під кутом, для якого

$$\operatorname{tg} u = \frac{h}{F}. \quad \text{Тому} \quad u = \arctg \frac{h}{F} \quad \text{є функцією довжини стрілки. Приріст функції дорівнює добутку похідної на приріст аргументу, звідси}$$

$$\Delta u = \frac{F}{F^2 + h^2} \Delta h.$$

Дивлячись на маленьку частину предмета довжиною  $\Delta h$  на його краю без лупи з відстані найкращого зору, ми бачитимемо її під кутом

$$\Delta u_0 = \frac{L_0 \Delta h}{L_0^2 + h^2}.$$

Кутове збільшення становить:

$$\frac{\Delta u}{\Delta u_0} = \frac{L_0^2 + h^2}{F^2 + h^2} \cdot \frac{F}{L_0}. \quad (6)$$

Звідси випливає, що збільшення малих частин предмета, близько розташованих до головної оптичної осі, якщо  $h^2 \ll F^2, L_0^2$ , відповідає формулі (6), але збільшення частин предмета, віддалених від осі, отже, і предмета в цілому, буде меншим. Таким чином, збільшення предмета і збільшення його частин різняться між собою.

Однак слід зазначити, що збільшення для ділянок на периферії предмета в реальності буде

значно меншим, ніж обчислене за вище наведеними співвідношеннями.

По-перше, максимальна роздільна здатність ока досягається на невеличкій ділянці сітківки – жовтій плямі, для якої поле зору становить усього близько  $6^\circ$  уздовж горизонталі та  $4^\circ$  уздовж вертикалі [3]. Саме на жовтій плямі зосереджено переважно фоторецептори колбочки що відповідають за колірний зір. На периферійній частині сітківки розташовуються переважно палички, що забезпечують сутінковий зір, але їх концентрація є меншою.

По-друге, під час виведення формули тонкої лінзи розглядають параксіальні промені – промені, що поширюються під малими кутами до оптичної осі й перетинають площину лінзи на малій відстані від оптичного центру. Якщо предмет має великі кутові розміри, то промені, що утворюють зображення, вже не будуть параксіальними. Лінза перестає працювати як ідеальний прилад, і точка предмета на зображенні перетворюється на пляму. Такі спотворення зображення називають *абераціями*.

Однак це не применшує значення формул збільшення. Адже не переймаємось ми тим, що перебуваючи недалеко від високої тополі, 1 м біля її верхівки бачимо під меншим кутом, ніж 1 м біля основи. Переміщуючись, можна розглянути кожну її ділянку детальніше. Формула максимального збільшення справедлива для спостереження малих предметів, що розташовані біля оптичної осі системи. Змінюючи розташування предмета, лупи та ока, можна по чергово розглянути кожну частину предмета, збільшеною відповідно до формули (6).

Бажаючи розрізнити дрібні деталі, ми для збільшення кута зору наближаємо до них око. Досить чітко можна бачити предмет з відстані, дещо меншої за відстань найкращого зору, хоч для цього треба напружувати зір. Як бачимо, на практиці максимальне кутове збільшення виявляється меншим за обчислене за формулами. Крім того, в різних людей відстань найкращого зору є різною, отже, збільшення, одержане за допомогою однієї і тієї самої лупи, буде різним: для короткозорої людини меншим, а для далекозорої – більшим. Тож наскільки об'єктивними є результати обчислень з використанням стандартного значення  $L_0=25$  см? Все ж таки, загальноприйняте значення відстані найкращого зору взяте на основі досліджень, з об'єктивної статистики, а різне індивідуальне збільшення визначається за встановленими формулами.

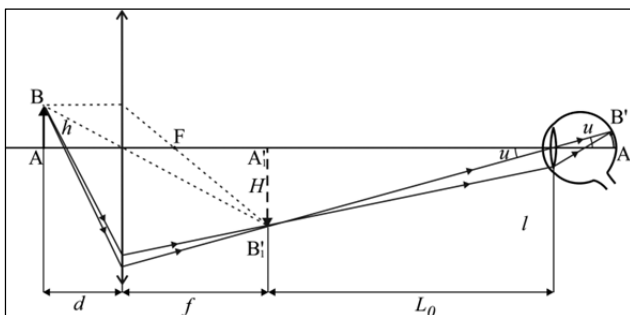
Люди з вадами зору користуються окулярами, завдяки яким відстань найкращого зору стає близькою до 25 см. Тому якщо вони в окулярах спостерігають предмет безпосередньо і крізь лупу, то збільшення для них буде таким самим, як обчислене за формулами. Головне, що формули збільшення як лупи, так і складніших оптичних систем дають змогу дослідити залежність збільшення від параметрів системи й порівняти збільшення різних систем.

Пояснюючи учням утворення дійсних зображень, учитель указує, що всі промені від точки предмета після проходження лінзи сходяться в одній точці. Якщо там розмістити екран, то на ньому буде видно зображення відповідної точки. Через те дуже часто учні вважають, що дійсне зображення можна побачити тільки на екрані. Насправді за відсутності екрана промені за зображенням стають розбіжними і, розмістивши там око, можна його бачити. В цьому легко переконатись, розглядаючи віддалені предмети крізь лупу з відстані витягнутої руки. Нетипово використовуючи лупу для спостереження дійсних зображень, можна одержати набагато більші збільшення, ніж у разі звичного використання (мал. 4).

Збільшення буде максимальним, якщо око розміщуватиметься на відстані найкращого зору від зображення й становитиме:

$$\gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} = \frac{F}{d-F}. \quad (7)$$

Наприклад, за допомогою лупи з фокусною відстанню 5 см у разі розміщення предмета на відстані 5,1 см від неї можна одержати в 50 разів збільшене зображення, якщо око розміщується на відстані  $f + L_0 = 280$  см. Поле зору в розглянутому випадку буде сильно обмеженим, оскільки бачити можна тільки ту частину зображення, що розташована проти лупи.



Мал. 4. Спостереження оком дійсного зображення предмета, одержаного за допомогою збиральної лінзи (лупи)

Якщо діаметр лупи  $D$ , розмір видимої частини зображення  $\Delta H$ , то

$$\frac{D}{f + L_0} = \frac{\Delta H}{L_0}. \quad (7)$$

Звідси

$$\Delta H = \frac{DL_0}{f + L_0}. \quad (8)$$

У наведеному прикладі, коли  $D=5$  см,  $h=1$  см, то  $\Delta H=0,446$  см,  $H=50$  см: тому можна бачити одночасно приблизно лише 0,009 довжини зображення.

Крім того, предмет має бути добре освітленим. Оскільки освітленість предмета обернено пропорційна квадрату відстані до нього, то в наведеному прикладі освітленість зображення буде у 2500 разів меншою, ніж предмета.

Подібне можна було б спостерігати, якби екран кінотеатра замінити дзеркалом, хоча учні й більшість учителів стверджують, що в цьому випадку взагалі нічого не було б видно. Насправді ми бачили б об'єктив і мізерну частину зображення проти нього, хоч окремі його деталі навряд можна було б розгледіти.

Таке використання лупи нагадує дію мікроскопа, в якому роль окуляра виконує око. Наближаючи предмет до фокуса, на першій погляд, можна одержати як завгодно великі збільшення. Проте реальне збільшення такої системи буде вкрай обмеженим. По-перше, через сильні аберації, що характерні для однолінзових систем. По-друге, як і для мікроскопа, дифракція світла «заважає» одержанню великих значень роздільної здатності.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Фізика, 7 – 9 кл. : навч. програма для загальноосвіт. навч. закладів. – [Електронний ресурс] // Міністерство освіти і науки України. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-5-9-klas/onovlennya-12-2017/7-fizika.doc>
2. Бар'яхтар В. Г. Фізика : підруч. для 9 кл. загальноосвіт. навч. закладів / В. Г. Бар'яхтар, С. О. Довгий, Ф. Я. Божинова, О. О. Кірюхіна ; за ред. В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого. – Харків : Ранок, 2017. – 272 с.
3. Кучерук І.М. Загальний курс фізики. Т. 3. – Оптика. Квантова фізика / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук. – Київ : Техніка, 1999. – 520 с.
4. Засекіна Т. М. Фізика : підруч. для 9 кл. загальноосвіт. навч. закладів / Т. М. Засекіна, Д. О. Засекін. – Київ : Оріон, 2017. – 272 с.