

## SEZIONE XIX. FISICA E MATEMATICA

DOI 10.36074/logos-12.11.2021.v2.18

### ОРИГІНАЛЬНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ З ОПТИКИ

**Козіненко Олександр Вікторович**

здобувач повної середньої освіти

*Харківська спеціалізована школа I - III ступенів № 75*

*Харківської міської ради Харківської області*

**Малишева Лілія Іванівна**

учитель фізики, спеціаліст вищої категорії, «учитель-методист»

*Харківська спеціалізована школа I-III ступенів № 75*

*Харківської міської ради Харківської області*

УКРАЇНА

Оволодіння учнями навичками експериментальної діяльності спрямоване на використання набутих знань у практичній діяльності, формування пізнавальних інтересів, розвиток творчих здібностей, зацікавленості майбутньою професією, пов'язаною з фізикою. У роботі представлені навчальні фізичні експерименти, за допомогою яких досліджені оптичні явища в неоднорідних середовищах. Надано опис навчальних досліджень з поширення світла в оптично неоднорідному середовищі. Наведено відомості про методи створення оптично неоднорідних середовищ. Детально розглянуто оптичні властивості нерівномірно нагрітого оргскла. Запропоновано конструкції простих приладів для моделювання гравітаційної лінзи. Усі досліді можуть бути поставлені в шкільному фізичному кабінеті або в домашніх умовах. Деякі експерименти, представлені в роботі, ще недостатньо описані в науковій методичній літературі. Мета роботи – дослідити оптичні явища в неоднорідних середовищах на основі навчального фізичного експерименту, пояснити їх фізичний зміст, надати методіку проведення навчального експерименту. У роботі описано хід експериментів, навчальна теорія, методика проведення дослідів, що дає змогу використовувати цю науково-дослідницьку роботу для популяризації фізики як науки, презентувати ефектні та навчальні демонстрації, які формують пізнавальні мотиви до вивчення предмета.

Одним із завдань курсу фізики основної школи є формування й розвиток в учнів експериментальних умінь і дослідницьких навичок, здатність описувати й оцінювати результати спостережень, планувати й проводити досліді та експериментальні дослідження, здійснювати вимірювання фізичних величин, робити узагальнення й висновки, а також розкривати важливість фізичних знань у житті людини, суспільному виробництві й техніці, сутності наукового пізнання засобами фізики, сприяння розвитку інтересу школярів до фізики.

Навчальний фізичний експеримент у сучасних умовах виконує функцію методу навчального пізнання, завдяки якому учні оволодівають досвідом практичної діяльності людства в галузі здобуття фактів та попереднього їх узагальнення на рівні уявлень, понять і законів, у їх свідомості утворюються нові

зв'язки й відношення, формується особистісне знання. Навчальний фізичний експеримент забезпечує формування в учнів необхідних практичних умінь, дослідницьких навичок та особистісного досвіду експериментальної діяльності, завдяки яким вони стають спроможними у межах набутих знань розв'язувати пізнавальні завдання засобами фізичного експерименту, який, безумовно, має велике практичне значення [5]. Щоб сформувати стійкий інтерес учнів до вивчення фізики, необхідні серії індивідуальних і самостійних дослідів, для постановки яких достатньо використання наявних у кожного під рукою матеріалів та будь-якого обладнання. В ідеалі учні повинні мати можливість у самостійному експерименті спостерігати основні фізичні явища, зокрема, градієнтної оптики. Для цього необхідно провести групу простих і ефектних демонстраційних дослідів, які розкривають фізичну сутність основних її явищ.

Оптичні явища дуже цікаві та широко використовуються на практиці (техніка, енергетика, промисловість). Розділ градієнтної оптики є цілком сучасним, оскільки зараз інтенсивно розвивається і має важливе значення для практичної оптики. Останнім часом в оптоелектроніці, фокусуючій оптиці, лазерній техніці, системах зв'язку, відеозапису широко використовуються градієнтні світловоди (сельфокі) і градієнтні лінзи. Градієнти показника заломлення виникають при поширенні в середовищі потужного лазерного випромінювання, тому що градієнтна оптика в певній галузі змикається з нелінійною. Поширення світла в атмосфері Землі, інших планет, зірок, міжгалактичному просторі вивчається методами градієнтної оптики. Дослідження поширення електромагнітного випромінювання інфрачервоного та радіо-діапазонів не може бути здійснено без урахування градієнта показника заломлення середовища. У техніці надвисоких частот використовуються градієнтні лінзи, теорія першої з яких (так званого «риб'ячого ока») дана Максвеллом ще в 1860 році. Виготовлення градієнтних лінз для радіохвиль значно простіше, ніж оптичних, тому такі лінзи давно застосовуються в пристроях радіолокації. Методами градієнтної оптики досліджуються явища поширення звуку і ультразвуку в акустично неоднорідних середовищах, сейсмічних хвиль в земній корі, електромагнітних хвиль в лабораторній, іоносферній і космічній плазмі, електронних і іонних пучків в електричних і магнітних полях. Історично одне з перших фізичних завдань, для вирішення якого застосовувалися методи градієнтної оптики, пов'язане з перебуванням брахістохрони - траєкторії якнайшвидшого спуску в поле тяжіння Землі. Проблеми градієнтної оптики стимулювали виникнення варіаційного обчислення. Створюючи квантову механіку, Шредінгер використовував оптико-механічну аналогію, яка повністю зберегла значення в сучасній теоретичній фізиці [4]. Видатний експериментатор П.Л. Капіца казав: «Школяр розуміє фізичний досвід тільки тоді добре, коли він його виконує сам. Але ще краще він розуміє його, якщо сам робить прилад для експерименту» [4]. Досліди, представлені в роботі, можна використовувати на всіх рівнях навчання фізики. Важливим є те, що в даній роботі викладені не тільки умови дослідів, а й представлена навчальна теорія, обґрунтована навчальним експериментом, і методика їх вивчення.

Оптика неоднорідних середовищ – розділ фізичної оптики, який охоплює явища, що відбуваються в середовищах, показник заломлення яких від точки до точки змінюється. До таких явищ належать відбивання, заломлення, криволінійне поширення, розсіювання в мутних середовищах та інші. Якщо обмежуватися розглядом явищ поширення світла в оптично неоднорідному

середовищі з показником заломлення, який безперервно змінюється, то відповідний розділ оптики називають геометричною оптикою неоднорідних середовищ. Зазначені середовища характеризуються градієнтом показника заломлення.

У вітчизняній науковій літературі склалися терміни: градієнтна лінза, градієнтний світловод, градан та інші. Разом з тим існують загальноприйняті терміни: нелінійна оптика, фізична оптика, атмосферна оптика, волоконна оптика. У зарубіжній літературі широко використовується термін, який в дослівному перекладі означає «градієнтна оптика». Саме цей термін чітко визначає коло явищ геометричної оптики неоднорідних середовищ, яку ми і розглянемо на прикладах оптично неоднорідної рідини та оптично неоднорідного твердого тіла.

У нашій роботі ми використовували лазер газовий ЛГ-209 потужністю 2 мВт для отримання двох паралельних пучків та лазерну указку потужністю менш за 5 мВт.

Лазерний промінь, проходячи крізь плоскопаралельну кювету, яка заповнена повітрям або частково наповнена, наприклад, чистою водою, поширюється паралельно дну кювети або, у другому випадку, паралельно поверхні рідини. Положення вихідного променя на торці кювети позначимо чорною точкою.

Для отримання оптично неоднорідної рідини скористуємося явищем дифузії [2]. У скляну кювету, наповнену водою, насипемо поварену сіль  $\text{NaCl}$ , унаслідок чого на невеликій ділянці змінюється густина води, що змінює швидкість проходження світла в цьому середовищі, бо показник заломлення середовища на цій ділянці кювети також змінюється. Ширина «сольової межі» окреслена. Результатом дифузії стає поява градієнта концентрації (градієнт - вектор, який своїм напрямком вказує напрямком найбільшого зростання деякої величини, значення якої змінюється від однієї точки простору до іншої, а за величиною рівний швидкості росту цієї величини в заданому напрямку – у даному випадку концентрації сольового розчину). Цей вектор направлений зверху вниз: від поверхні води і далі до дна кювети. У даному випадку показник заломлення рідини безперервно змінюється вздовж вертикальної осі  $OY$ , плавно зменшуючись з ростом значень  $Y$  [6].

У кювету з водою поставимо стрижень так, щоб він розташувався похило. Бачимо незмінні зображення стрижня в повітрі, воді і розчині солі.

На межі повітря-вода показник заломлення змінюється стрибком, і зображення стрижня виявляється зламаним, отже, при переході з одного оптично однорідного середовища в інше відбувається заломлення світла. У перехідному шарі між водою і розчином солі спостерігаємо плавно вигнуте зображення прямого стрижня. У цьому шарі показник заломлення змінюється, вочевидь, не стрибком, а безперервно.

Через деякий час промінь опуститься нижче позначки - точки. Згодом вигін променя практично зупиниться, зафіксується в певному місці. І якщо дивитися по ходу поширення променя, викривлення його спрямовано таким чином: проходячи над «сольовою гіркою», промінь відхиляється в її бік, тому лазерна пляма на торці кювети буде перебувати нижче точки, якою ми визначили початкове положення променя, тобто коли промінь проходив крізь чисту воду. Зміна напрямку входу лазерного променя в кювету не має ніякого значення. Тобто якщо промінь входить до кювети з правого боку і викривляється, то він так само буде вести себе, якщо буде входить до кювети з іншого, тобто з лівого боку.

Щоб наочно показати, якою мірою градієнт густини впливає на кривизну світлового променя, запусимо в кювету з одного боку два вертикальних паралельних променя, відстань між якими 0,05 м. Видно, що промінь, який розташований ближче до «сольової гірки», тобто до місця, де оптична густина середовища більша, ніж біля іншого променя, який знаходиться вище, викривився сильніше. Тобто, де густина середовища більша, промінь також викривляється більше. В оптично неоднорідному середовищі світловий промінь вигинається таким чином, що його траєкторія завжди звернена вигином в бік зменшення показника заломлення [6].

У плоскопаралельну кювету зі скла налили воду. Поблизу поверхні води паралельно їй пустили лазерний промінь так, щоб він потрапив на білий екран, віддалений від кювети на відстань не менше метра. На екрані позначили місце падіння лазерного пучка точкою. Над водою на відстані 10-20 мм розташували настільну лампу розжарювання потужністю 200 Вт (у якості нагрівача) так, щоб світло від лампи не потрапляло на екран [4]. Після вмикання лампи побачили, як світлова пляма починає переміщуватися вниз по екрану.

Цими дослідженнями ми підтвердили, що в однорідній оптично прозорій рідині (незалежно від її густини) промінь світла поширюється тільки прямолінійно; в оптично неоднорідній рідині цей же промінь завжди викривляється і тільки в бік більшої густини.

Одним із способів отримання оптично неоднорідного твердого тіла є нерівномірний нагрів. Найкращим матеріалом для цього є поліметилакрилат (полімер кислоти метакрилової). Ще одна його назва – плексиглас. Але більш відомий цей матеріал як органічне скло або оргскло. Основні фізико-хімічні характеристики: густина 1,18 г/см<sup>3</sup>, температура плавлення 160°C, максимальна температура, за якої можна експлуатувати оргстекло, знаходиться в межах 80-130°C. З прозорих твердих речовин, які нас оточують, воно найбільш доступно для придбання і обробки. Крім того, його показник заломлення сильно залежить від температури лінійно, зменшуючись з її збільшенням (таб.2.1)

Таблиця 2.1

### Залежність показника заломлення скла від температури

Температура, °C	21	45	60
Показник заломлення оргскла	1,492	1,488	1,486

Взято з [3,7]

Щоб підтвердити це, проведемо дослід. Проспостерігаємо та порівняємо вигляд прямої лінії, проведеної на папері, крізь брусок оргскла за комнатної температури та нерівномірно нагрітого оргскла. Бачимо, що у другому випадку лінія має викривлення.

Нагрівачем може слугувати електроплитка, поверхня праски, що нагрівається, посудина з гарячою водою або будівничий фен. Для охолодження можна використовувати зріджений азот або, простіше, охолоджуючу суміш, яка складається з льоду та солі у пропорції 3:1 відповідно.

### Поширення світла в оптично неоднорідному твердому тілі на прикладі плоскопаралельного бруска

Для дослідження використаємо плоскопаралельний брусок із оргскла. Грані бруска відполіровані. Позаду нього поставимо екран з намальованими паралельними лініями. Нагріваємо верхню поверхню бруска, спостерігаємо неоднакове викривлення ліній: у місці більшого нагріву лінії деформуються більше.

*Поширення світла в оптично неоднорідному твердому тілі на прикладі моделі гравітаційної лінзи*

Відомо, що космічна гравітаційна лінза являє собою масивне тіло, яке вигинає своїм гравітаційним полем напрямком поширення випромінювання, що проходить повз нього. Цей ефект тяжіння називають «лінзою» з тієї причини, що паралельний пучок випромінювання, пройшовши повз масивного тіла, концентрується позаду нього, подібно до того, як концентрується світловий промінь, проходячи крізь оптичну лінзу [1]. Гравітаційною лінзою може бути будь-яке тіло, але на практиці помітне викривлення променів здатне викликати лише дуже масивне тіло, наприклад, велика планета або зірка, а також велика система тіл, така, як галактика або скупчення галактик. Гравітаційна лінза однаково впливає на всі види електромагнітного випромінювання і потоки різних частинок. Для спостереження явища гравітаційної лінзи за В.В. Майером ми використовуємо кювету, яка зроблена нами з бруска оргскла з краплеподібною порожниною, найбільша ширина якої становить 20 мм, довжина – 70 мм, радіус кривизни бічних стінок порожнини – 200 мм [4].

Направимо лазерні промені в торець кювети паралельно «краплі» з боку її найбільшої ширини. На екрані, розташованому за нею, видно червоні точки, утворені цими променями.

В порожнину краплеподібної форми кювети наливаємо окріп. Через деякий час помічаємо, як точки на екрані стали розходитися в горизонтальній площині, оскільки внаслідок нерівномірного розігріву в оргсклі з'явився градієнт температури, а значить, і градієнт показника заломлення, який, природно, збільшується в напрямку, де температура оргскла нижча, що і призводить до відхилення променів, які проходять крізь лінзу.

Це можна пояснити наступним чином. При заповненні порожнини кювети окропом температура поблизу отвора більша, далі від заглиблення температура менша, а на периферії кювети вона ще менше, тобто градієнт температури направлений ззовні до заглиблення кювети. Внаслідок нерівномірного розігріву оргскла змінюється і показник заломлення. Він збільшується у напрямку продовження зниження температури, тобто в напрямку, перпендикулярному основній осі паралелепіпеда, що і призводить до відхилення променів, які проходять крізь паралелепіпед.

Якщо замість окропу цю порожнину наповнимо охолоджуючою сумішшю або наллємо, наприклад, зріджений азот, то спостерігаємо протилежний ефект, тобто світлові плями збігатимуться у зв'язку з тим, що виникла зміна напрямку градієнта температури на протилежний.

Робимо висновок, що при нагріванні або охолодженні порожнини кювети оптичний промінь завжди вигинається в бік більшої густини, тобто в область більшого показника заломлення.

З точки зору методики викладання фізики і в результаті численних експериментів, як нам здається, краще одночасно застосовувати два промені, які рознесені по вертикальній осі. Особливо це чітко простежується у разі заповнення кювети зрідженим азотом. У цьому випадку, якщо лазерні промені не розвести по висоті, то в певний момент створюється таке враження, ілюзія, що промені, оскільки вони направлені назустріч один одному в одній горизонтальній площині, начебто злившись, починають розходитися. Насправді ж, у результаті накладання плям одна на одну в одній точці вони продовжують рухатися в тому ж напрямку, у якому рухалися і до цього.

Треба звернути увагу на вагомий факт у цьому експерименті зі зрідженим азотом: експеримент проходить більш ефектно, але кювета завжди «виходить з ладу» у зв'язку з тим, що значний перепад температур створює великі механічні напруги в кюветі, вона тріскається в процесі виконання експерименту. Тому необхідно виконувати відеозйомки і надалі переглядати відео в необмеженій кількості, щоб уникнути великих матеріальних втрат. Ці демонстрації, застосовуючи яскравий потужний лазерний промінь, можна показувати і без затемнення.

**Висновки.** Основним результатом роботи стала низка цікавих дослідів зі складних тем і розуміння того, що на уроках фізики на простому обладнанні, створеному власноруч, навіть при вивченні складних тем курсу можна все представити максимально наочним і доступним для засвоєння. За допомогою установок, представлених у роботі, можна показати декілька різних демонстрацій і провести цілі серії дослідів із кількох тем курсу фізики в розділі «Оптика». Незважаючи на те, що установки прості, вони дають можливість підготувати в домашніх умовах, а потім продемонструвати в класі експерименти, що розкривають основні особливості досліджуваних фізичних явищ з незвичайних точок зору, цікаві і пізнавальні їх закономірності, показати можливість практичного застосування отриманих теоретичних знань. Досліди, представлені в роботі, можна використовувати на всіх рівнях навчання фізики.

Представлені дослідження є доповненням до знань, отриманих на уроках, і дозволяють глибше проникнути в сутність фізичних явищ. Експерименти, проведені нами, підтвердили, що у всіх неоднорідних середовищах світловий промінь завжди відхиляється у бік більшої густини (або масивного тіла) незалежно від того, яким чином вона (ця густина) була локально утворена.

Важливим є ще й те, що в нашій роботі описано не тільки умови дослідів, а і викладено наукову теорію, обґрунтовану навчальним експериментом, методику проведення дослідів та виготовлення саморобних приладів.

### Список використаних джерел:

- [1] Блиох П.В., Минаков А.А. (1997). *Гравитационные линзы*. Москва: Знание.
- [2] *Лекционные демонстрации по физике* / Под ред. В.И. Ивероновой (1979). Москва: Наука.
- [3] Майер В.В. (1984). *«Простые опыты по криволинейному распространению света»*. Москва: Наука.
- [4] Майер В. В. (2007). *Свет в оптически неоднородной среде: учебные исследования*. Москва: ФИЗМАТЛИТ.
- [5] Рябенко Ж. Ф. (2007). *Демонстраційний експеримент курсу фізики 8 класу на базі саморобних приладів та наочних посібників*. Харків: Основа.
- [6] Тарасов Л.В. (1988). *Физика в природе*. Москва: Просвещение.
- [7] Яворский Б.М. (1965). *Справочник по физике*. Москва: Наука.
- [8] *Навчальна програма для загальноосвітніх навчальних закладів, 7-9 класи*. (2017). Київ: Ранок.