

**РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ НАВЧАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ
З ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ФАЗОВОГО
ПЕРЕХОДУ В РІДКИХ КРИСТАЛАХ**

Пономаренко Інна

Науковий керівник: док. пед. наук, професор Величко С.П.
*Центральноукраїнський державний педагогічний
університет імені Володимира Винниченка*

У статті актуальність теми науково-дослідницької роботи обумовлена відсутністю розробленого фізичного експерименту для вивчення фазового переходу рідкого кристалу. На основі аналізу науково-методичної літератури зроблено огляд навчального фізичного експерименту, який відтворює фазові переходи в рідких кристалах, розроблена методика проведення дослідження фазового переходу "рідкий кристал – ізотропна рідина" та запропоновано експериментальну установку з використанням обладнання шкільної фізичної STEM-лабораторії для реалізації експерименту, зроблено рекомендації з проведення експериментального вивчення температури просвітлення рідкого кристалу та зміни його структури під час фазового переходу, запропонована демонстрація застосування рідких кристалів в дефектоскопії.

Сформульовані висновки та отримані результати дали підстави за аналізом джерел стисло викласти фізичні основи рідких кристалів, зробити огляд фізичного навчального експерименту про дослідження фазових переходів у рідкому кристалі, описати методику проведення демонстрації температури фазового переходу в рідкому кристалі з використанням саморобного обладнання, визначити температуру просвітлення досліджуваного зразка рідкого кристалу та показати приклад використання рідких кристалів в дефектоскопії.

***Ключові слова:** рідкий кристал, оптична комірка, саморобне обладнання, фазовий перехід, температура просвітлення, дефектоскопія.*

**DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A TRAINING
EXPERIMENT ON THE RESEARCH AND DETERMINATION OF THE
PHASE TRANSITION TEMPERATURE IN LIQUID CRYSTALS**

Ponomarenko I.

Scientific supervisor: Doctor of Pedagogical Sciences, Professor Velychko S.P.
*Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State Pedagogical University,
Kropyvnytskyi, Ukraine*

The urgency of the research topic in the article is due to the lack of a developed physical experiment to study the phase transition of the liquid crystal. Based on the analysis of scientific and methodological literature, a review of the educational physical experiment, which reproduces phase transitions in liquid crystals, developed a method for studying the phase transition "liquid crystal - isotropic liquid" and proposed an experimental setup using school physical STEM-laboratory equipment for the experiment. recommendations for the experimental study of the illumination temperature of the liquid crystal and changes in its structure during the phase transition, the demonstration of the use of liquid crystals in flaw detection.

The formulated conclusions and obtained results gave grounds for analysis of sources to summarize the physical basis of liquid crystals, review the physical training experiment on the study of phase transitions in liquid crystal, describe the method of demonstrating the phase transition temperature in

liquid crystal using homemade equipment, determine the illumination temperature of the sample. liquid crystal and show an example of the use of liquid crystals in flaw detection.

Key words: *liquid crystal, optical cell, self-made equipment, phase transition, enlightenment temperature, defectoscopy*

Постановка проблеми. Упродовж останніх десятиліть досягнення фізичної галузі науки, яка вивчає фізику рідких кристалів (РК) та їхні властивості, досить широко впроваджуються в різних напрямках практичної діяльності та в повсякденний побут, знаходячи свою реалізацію в різноманітних технічних пристроях, які для відтворення інформації використовують рідкокристалічні індикатори та дисплеї. Основні властивості рідкого кристалу тісно пов'язані з тим, що проявляються вони лише у визначеному температурному інтервалі. Відтак, дослідження фазових станів рідкого кристалу та його фазових переходів є актуальною проблемою фізичної галузі науки, адже, з одного боку, розширює уявлення про фазовий стан речовини та фізику фазових переходів, а з іншого – виявлення робочого температурного діапазону РК дає можливість оцінювати приклади використання їх на практиці та функціонування рідкокристалічних пристроїв і визначення важливого технологічного параметру. Саме цим пояснюється актуальність дослідження, пов'язаного з виявленням температури фазового переходу рідкого кристалу в ізотропну рідину та наближення значення цієї температури до звичайних повсякденних.

Крім того, варто наголосити, що розуміння функціонування та роботи технічних пристроїв, які працюють на основі РК, є одним із питань, вивчення яких передбачено як у закладах загальної середньої освіти, так і в закладах вищої освіти, особливо в сучасних умовах технологізації усіх сфер діяльності людини. Однак, відсутність матеріально-технічного забезпечення кабінетів фізики унеможлиблює експериментальне вивчення властивостей РК. Тому проблема розробки і впровадження в освітній процес навчального експерименту з курсу фізики, що стосується фізичних властивостей РК, визначає **актуальність** нашого дослідження, а його метою є експериментальне дослідження рідкокристалічної фази речовини та

визначення температури просвітлення рідкого кристалу з демонстрацією зміни його структури під час фазового переходу.

Згідно з поставленою метою в цій науковій статті виконано:

1 – аналіз наукової та спеціальної літератури для вивчення особливостей рідкокристалічного стану речовини та огляду навчального експерименту, який відтворює фазові переходи в рідких кристалах;

2 – розробку методики проведення дослідження фазового переходу “рідкий кристал – ізотропна рідина” та створено експериментальну установку з використанням шкільної фізичної STEM-лабораторії;

3 – проведено експериментальне дослідження з визначення температури просвітлення рідкого кристалу та зміни його структури під час фазового переходу, запропонована демонстрація з дефектоскопії.

Об’єктом дослідження є рідкокристалічні матеріали, а **предметом** обрано фазовий перехід рідкого кристалу в ізотропну фазу.

Методи дослідження: опрацювання та аналіз різних першоджерел; конструювання експериментальної установки для проведення дослідження; вимірювання фізичних параметрів з метою експериментального визначення температури просвітлення рідкого кристалу; опрацювання отриманих результатів експерименту; аналіз отриманих результатів наукового дослідження.

Виклад основного матеріалу. Нагадаємо, що до рідких кристалів відносяться речовини, що проявляють властивості, які одночасно характерні, як для твердих кристалічних тіл (пружність, анізотропія фізичних властивостей та ін.), так і для рідин (текучість, в’язкість, поверхневий натяг та ін.). Цей стан речовини отримав назву мезоморфний (тобто стан із проміжною структурою речовини), а сама речовина – рідкі кристали або мезофаза (проміжна фаза речовини) [3, с. 193-195; 5, с. 216].

Рідкі кристали отримують або за допомогою плавлення органічних речовин і тоді вони називаються термотропними, або за допомогою розчину органічних речовин і тоді їх називають ліотропними [1, с.11].

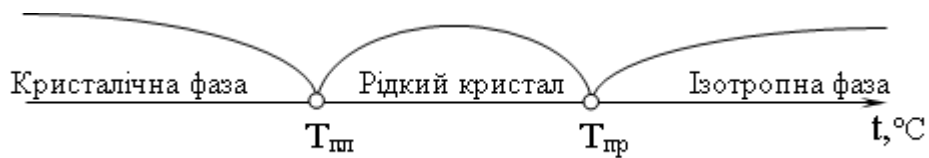


Рис. 1. Температурний інтервал існування рідкого кристалу

Термотропні РК існують у визначеному інтервалі температур від температури плавлення $T_{пл}$ до температури просвітлення $T_{пр}$ і більшій температурі $t^0\text{C}$ в ізотропній фазі (Рис.1). Якщо температура рідкого кристалу нижча за межі даного інтервалу, РК перетворюється у твердий кристал, а якщо температура перевищує інтервал існування мезофазы, то РК переходить в ізотропну рідину (ізотропна фаза рідкого кристалу).

Ліотропні РК існують у визначеному інтервалі як температур, так і концентрацій [5, с. 10], вони досить поширені в живих організмах. Дослідженнями ліотропних РК та вивченням їхніх властивостей займаються в біології, біофізиці та медицині [7].

Термотропні рідкі кристали знайшли широке застосування в пристроях відображення інформації – це: індикатори годинників, дисплеї мобільних телефонів і телевізорів, монітори ноутбуків та комп'ютерів і т.п.

Специфічність рідкокристалічного стану пояснюється впорядкуванням молекул, що зумовлено їх особливою будовою. Більшості молекул термотропного РК властива паличкоподібна видовжена форма. Такі молекули при обертанні навколо довгої вісі утворюють циліндр з великою висотою і малим діаметром [8, с. 16-21].

В залежності від розташування молекул термотропні РК утворюють структури із своєрідною будовою, які прийнято поділяти на такі основні типи: *нематичні*, *холестеричні* та *смектичні* рідкі кристали або відповідно: нематики, холестерики, смектики. [1, с. 11-14, с. 57-59; 2, с. 205].

Відмінність РК від твердих кристалів та від рідин зводиться до наступного. В упорядкованій структурі твердого кристалу (монокристал) спостерігається періодичне розміщення частинок у трьох взаємно

перпендикулярних напрямках, тобто центри мас твердого кристалу мають дальній трансляційний порядок у розташуванні його вузлів [3, с. 204]. В ізотропній рідині відсутній дальній трансляційний порядок у розташуванні їх молекул, бо ці молекули можуть вільно переміщуватися у просторі.

У *нематиках* центри мас молекул розташовані хаотично, як у звичайної рідини [4, с. 299]. Однак довгі вісі молекул нематика приблизно паралельні (Рис. 2а). При цьому вони вільно переміщуються в просторі, а також обертаються навколо довгих (а іноді й коротких) осей.

Холестеричні рідкі кристали утворюються в основному із з'єднань холестерину. Структура холестерика така ж, як і у нематика, але додатково закручена в напрямку, перпендикулярному довгим осям молекул. Якщо умовно розділити холестерик на шари вздовж напрямку, перпендикулярному довгим осям молекул і так, щоб в кожному шарі молекули розташовувалися майже паралельно одна одній, то спостерігатимемо утворення гвинтової структури, яка характеризується кроком спіралі (Рис. 2б).

Найбільш впорядкованими є *смектичні рідкі кристали*. Центри мас молекул розташовані в шарах, так, що утворюють деякий кут (Рис. 2в).

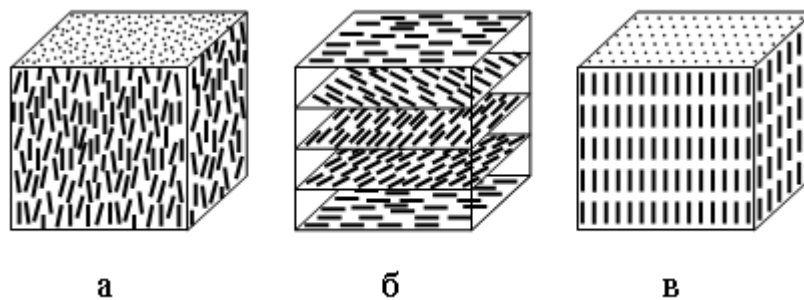


Рис. 2. Орієнтація молекул в рідких кристалах:
а – нематик; б – холестерик; в – смектик [5]

Для дослідження властивостей рідких кристалів та в технічних пристроях використовують спеціальну оптичну комірку (ОК), яка складається із двох плоскопаралельних пластинок скла, на одну із поверхонь кожної з них наносять прозорий струмопровідний шар, що виконує роль електроду [4; 6; 9].

Скельця складають електродами в середину, розділяючи діелектричними прокладками, які ізолюють і задають відповідну товщину зазору між скельцями. Таким чином утворюється плоский капіляр завтовшки від 5 до 100 мкм, який заповнюється рідким кристалом (Рис. 3).

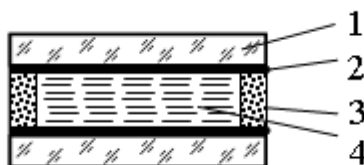


Рис. 3. Будова оптичної комірки: 1 – скляна пластинка; 2 – електрод; 3 – діелектрична прокладка; 4 – рідкий кристал [8]

Для утворення рідкокристалічного монокристалу, зазвичай, орієнтують молекули приповерхневого шару (ті, що знаходяться біля електродів). Тоді завдяки пружним силам однорідна орієнтація створює однакову орієнтацію молекул у всьому об'ємі ОК, і весь зразок являє собою монокристал.

Важливим етапом є обробка поверхні скла для отримання монокристалу. Методи орієнтації молекул прийнято ділити на дві групи [6, с. 177-184]: механічні та хімічні. Найпростішим механічним способом для отримання паралельної орієнтації є натирання в одному напрямку опорних поверхонь поліруючими пастами (дрібний абразивний чи алмазний порошок). Утворені продряпані канавки біля 0,25 мкм орієнтують молекули РК.

Хімічний метод орієнтації є складнішим, проте він дає досить якісні однорідні зразки. Полягає він в тому, що в ОК з РК додають поверхнево активні домішки, що містять кремній та вуглеводневі хвости. Кремній утворює стійкий хімічний зв'язок зі склом опорної поверхні, а вуглеводневі хвости орієнтуються або перпендикулярно, або паралельно до площини скляної пластинки і задають орієнтацію приповерхневого шару молекул рідкого кристалу – вздовж цих хвостів відповідно орієнтуються молекули РК.

Таким чином, в залежності від орієнтації молекул РК в ОК розрізняють: паралельну, перпендикулярну та закручену орієнтації (Рис.4).

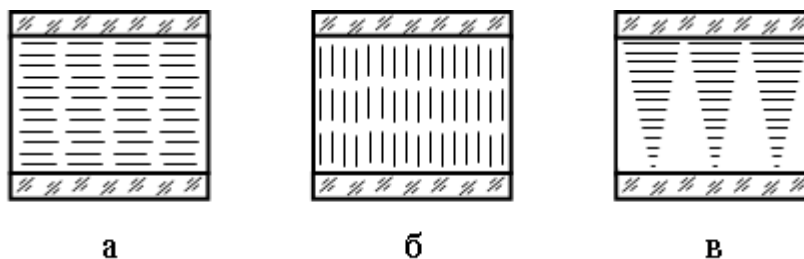


Рис. 4. Орієнтація молекул в оптичній комірці:
а – паралельна; б – перпендикулярна; в – закручена [1]

Як навчальний предмет, фізика активно використовує експериментальний метод на уроках з метою демонстрації фізичних явищ та перевірки законів чи властивостей, які виконуються школярами у вигляді лабораторних робіт і фізичного практикуму. Зазначене сприяє не лише наочності в освітньому процесі, а й формує стійкий інтерес та мотивує учнів до вивчення фізики у школі.

Незважаючи на те, що РК і вивчаються у школі, навчальний експеримент у вигляді дослідів, що демонструють основні їхні властивості та приклади практичного їх використання, відсутній.

Для виконання експерименту, що демонструє фазовий перехід в рідкому кристалі та дозволяє визначити температуру його просвітлення, було сконструйовано експериментальну установку (Рис. 5), яка складається із скляної посудини калориметра, датчика температури із мобільної природно-наукової лабораторії «Labdisc Physio», спиртового нагрівника, рідкокристалічної оптичної комірки, електричного термометра. Одночасне фіксування динаміки фазового переходу та зміни температури РК здійснюється за допомогою фотокамери Canon EOS 60D (об'єктив: Canon EF-S 17-55 mm f/2.8 IS USM).

Одним із головних елементів експериментальної установки є рідкокристалічна ОК. Але маємо констатувати її відсутність в шкільній фізичній лабораторії. Тому в якості досліджуваної ОК з РК ми пропонуємо використати РК індикатор відпрацьованого годинника, або малогабаритні дисплеї ігрових приставок, які можна демонтувати з таких відомих пристроїв, як “тетріс” чи “вовк-заєць”.



Рис. 5. Загальний вигляд експериментальної установки

Для використання досліджуваних зразків рідкокристалічних комірок слід зрозуміти їх будову та орієнтацію в них РК. Зазвичай, в РК індикаторах та дисплеях використовується нематичний РК, що має твіст-орієнтацію. При твіст-орієнтації молекули РК в оптичній комірці вибудовуються у вигляді 1/4 витка спіралі (Рис. 6). Якщо уявно розбити таку структуру РК на шари, що є паралельними до обмежуючих поверхонь комірки, то при переході від одного шару до іншого спостерігатимемо поворот довгих осей молекул на невеликий кут. Така комірка є оптично активною, тобто повертає площину поляризації падаючого плоскополяризованого пучка світла на кут $\pi/2$.

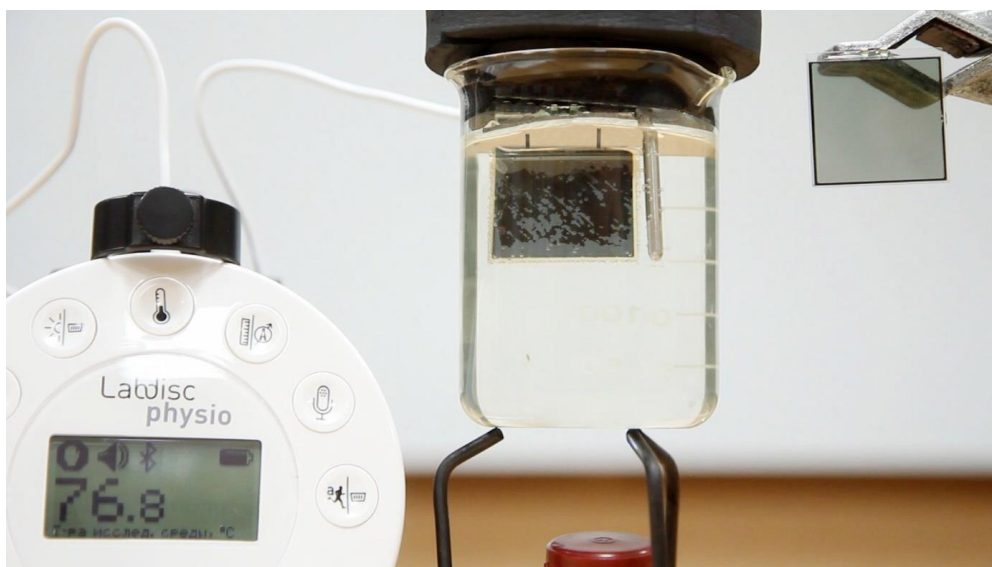


Рис. 6. Визначення температури просвітлення зразка РК.

РК індикатор чи дисплей складається з системи послідовно розташованих поляризатора – ОК з РК твіст-орієнтації – аналізатора (Рис. 7, а). Якщо на таку систему потрапляє пучок білого світла, то він після поляризатора стає плоскополязованим і завдяки оптичній активності РК, вільно проходить її.

Температурний інтервал існування РК в сучасних рідкокристалічних індикаторах знаходиться в межах кімнатної температури. Тому при підвищенні температури такої ОК до температури, яка дорівнює чи більша температури фазового переходу – $T_{пр}$ (температура просвітлення при переході “рідкий кристал – ізотропна рідина”), спостерігатимемо руйнування твіст-орієнтації молекул РК, тобто молекули всередині ОК почнуть хаотично переміщуватися і коливатися навколо своїх центрів мас – відбувається руйнування орієнтаційної впорядкованості молекул. Це призводить до зникнення оптичної активності РК і плоскополяризований світловий пучок, вільно пройшовши через шар РК, поглинається аналізатором (Рис. 7, б) – ОК має затемнене поле огляду.

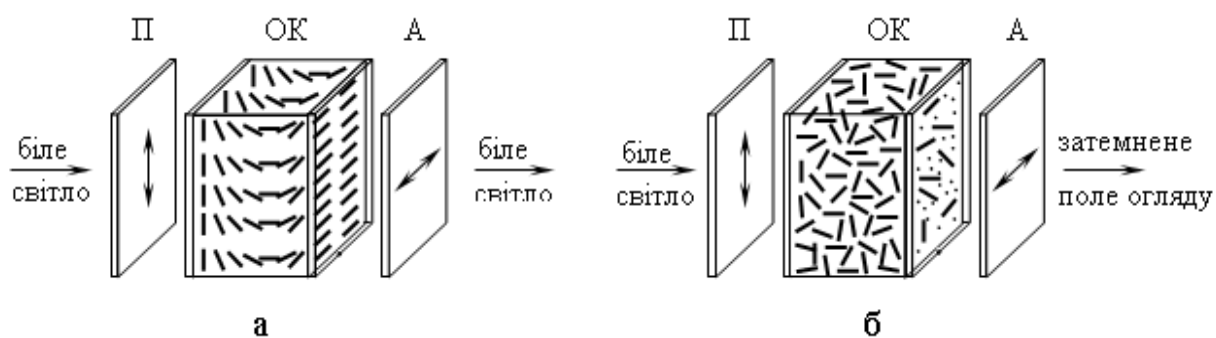


Рис. 7. Фазовий перехід “рідкий кристал – ізотропна рідина”: а – $T < T_{пр}$; б – $T > T_{пр}$, де П – поляризатор, ОК – оптична комірka, А – аналізатор.

Використавши дану властивість, маємо можливість провести досить якісний експеримент з визначення температури просвітлення РК (рис. 8).

Для цього достатньо помістити досліджувану ОК в калориметр, заповнений водою та поступово підвищувати температуру. Різке зменшення інтенсивності падаючого на РК світлового потоку дає можливість зафіксувати значення температури фазового переходу “рідкий кристал – ізотропна рідина”.

Під час експерименту нагрівання рідини в калориметрі, а отже і збільшення температури РК, слід проводити повільно.



Рис. 8. Загальний вигляд демонстраційної установки

Як показали наші експерименти, цього важко досягнути. Тому дослід краще проводити, коли температура в калориметрі, а отже і в ОК, спадає. Тобто зразок спочатку потрібно нагріти до переходу РК в ізотропну рідину і після цього проводити спостереження при поступовому його охолодженні. Це полегшить можливість встановлення фазового переходу з наступним фіксуванням температури, при якій цей перехід відбувається.

Запропонований фізичний експеримент з дослідження фазового переходу рідкого кристалу в ізотропну рідину дозволяє досить точно в умовах шкільної фізичної лабораторії визначити температуру просвітлення рідкокристалічних зразків. Проте спостереження та керування динамікою самого фазового переходу з фіксуванням наперед заданої необхідної для цього температури досліджуваних зразків РК пропонується методика не дає бажаного ефекту. Для подолання даної проблеми нами була розроблена демонстраційна робота, яка дозволяє фіксувати динаміку зміни структури РК під час фазового переходу та візуалізувати процес фазового переходу “рідкий кристал – ізотропна

рідина”, здійснивши при цьому відеозапис такого процесу з подальшим його відтворенням.

Для демонстраційної установки ми використали обладнання шкільної фізичної STEM-лабораторії: нагрівальний столик 3D принтера Prusa i3, цифровий мікроскоп SIGENTA Expert 10-300x 5.0Mpx, який під'єднано до комп'ютера (Рис. 8). Для спостереження фазового переходу достатньо на нагрівальний столик 3D принтера помістити досліджуваний зразок рідкокристалічної комірки та відрегулювати чіткість її зображення за допомогою фокусування камери цифрового мікроскопу. Встановивши температуру нагрівального столика вище за температуру просвітлення рідкого кристалу, можемо спостерігати за зміною структури рідкого кристалу. Спостереження можна здійснювати, як при підвищенні температури, так і при її зменшенні. Окрім того демонстраційна установка дозволяє дослідити конкретний момент фазового переходу, для цього необхідно встановити фіксоване значення температури нагрівального столика (а отже і досліджуваного зразка РК) – при цьому зображення структури РК залишається незмінним.

Досить яскраво за допомогою даної установки відбувається візуалізація теплових полів масивних металевих деталей. Для цього на нагрівальний столик 3D принтера поміщують, наприклад, металеву шайбу та накривають її білим папером (це необхідно як для підвищення якості візуалізації теплового поля, так і для приховування форми досліджуваних металевих предметів). Зверху на папір розміщуємо рідкокристалічну комірку та вмикаємо нагрівальний столик 3D принтера. В місцях де деталь торкається поверхні ОК, при досягненні температури просвітлення, спостерігається затемнене поле огляд, яке за своєю формою подібне до контуру металевої деталі (Рис. 9 (1, 2, 3)).

Даний спосіб візуалізації теплового поля досить широко використовується в дефектоскопії під час перевірки цілісності конструкцій – для виявлення дефектів та порожнин, чи в дефектоскопії мікрочіпів, де один із

її елементів більшою чи навпаки меншою мірою, віддає теплоту в порівнянні з еталонним мікрочіпом.



Рис. 9.1 Зразки металевих предметів:
а – металеві шайби; б – бронзова гайка; в – металевий циліндр

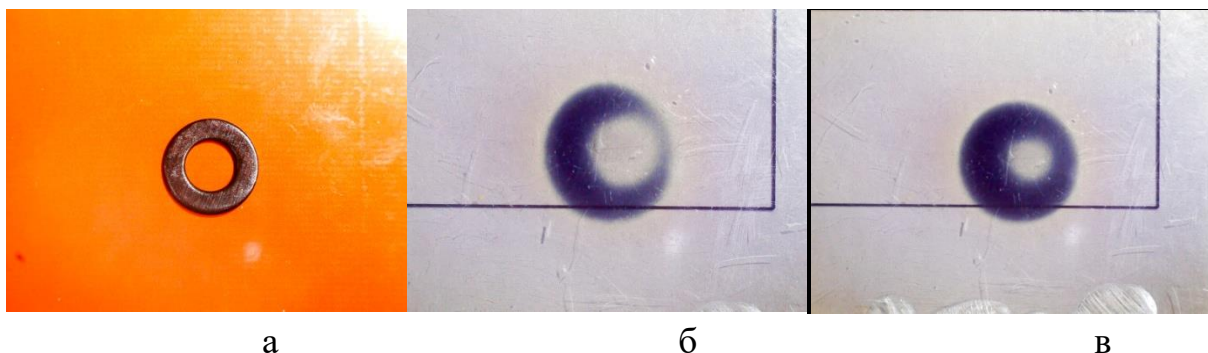


Рис. 9.2 Візуалізація теплового поля шайби:
а – металева шайба; б, в – фотографія візуалізації теплового поля шайби під час її нагрівання

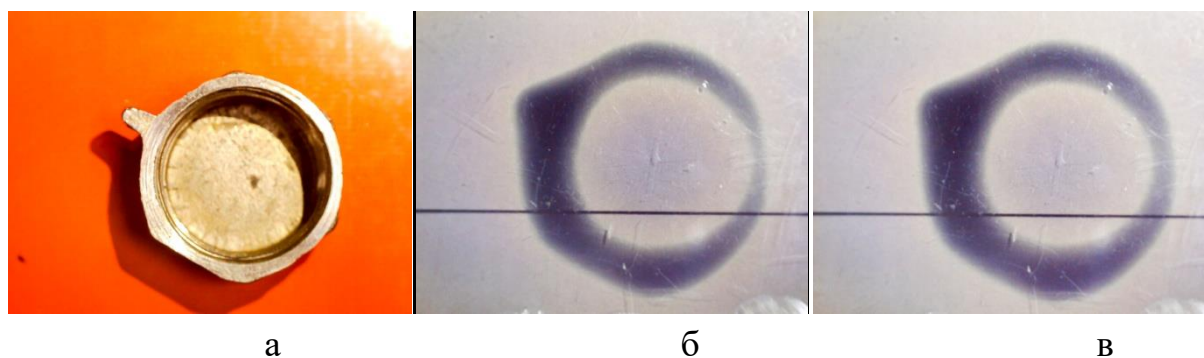


Рис. 9.3 Візуалізація теплового поля бронзової гайки:
а – бронзова гайка; б, в – фотографія візуалізації теплового поля бронзової гайки під час її нагрівання

Перевагою запропонованої демонстраційної установки є те, що всі її елементи доступні для кабінету фізики, а використання рідкокристалічних

комірок, які містять поляризатор та аналізатор, дозволяє використати шкільний мікроскоп замість поляризаційного, який використовується для дослідження рідких кристалів науковцями.

Вивчення фазових станів і фазових переходів в РК є одним із напрямків дослідження фізичної галузі науки про РК, адже це розширює уявлення про фазовий стан речовини та фізику фазових переходів і сприяє синтезу нових рідкокристалічних матеріалів з наперед заданими властивостями.

Висновки. Наукова новизна результатів дослідження полягає в розробці досліду та створенні саморобного обладнання з використанням наявних у кабінеті фізики матеріалів, що дозволяє провести експериментальне дослідження фазового переходу в рідкому кристалі та оцінити його температуру просвітлення.

Практичне значення роботи полягає в тому, що зроблено огляд рідкокристалічного стану речовини та навчального фізичного експерименту, який стосується фазових переходів в рідких кристалах, створено експериментальну установку та розроблено методичку виконання демонстрацій з дослідження рідкокристалічної фази речовини, проведено експериментальне дослідження фазового переходу “рідкий кристал – ізотропна рідина” та визначено його температуру, розроблено демонстрацію використання рідких кристалів в дефектоскопії.

Робота може бути корисною дослідникам-початківцям, які цікавляться питанням рідких кристалів, зокрема старшокласникам під час вивчення шкільного курсу фізики у закладах загальної середньої освіти і студентам у закладах вищої освіти під час вивчення властивостей рідких кристалів та учителям і викладачам під час викладання даної теми з використанням запропонованого саморобного навчального експерименту.

Список використаних джерел

1. Адамчик А., Стругальский З. Жидкие кристаллы. Москва: Сов.радио, 1979. 60 с.
2. Бар'яхтар В.Г., Довгий С.О., Божинова Ф.Я., Кірюхіна О.О. Фізика (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтева В.М.): підруч. для 10 кл. закл. загал. серед. освіти / за ред. В.Г.Бар'яхтара, С.О.Довгого.

Харків: Вид-во «Ранок», 2018. 272 с.

3. Гельфгат І.М. Фізика (профільний рівень, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтева В.М.): підруч. для 10 кл. закл. загал. серед. освіти. Харків: Вид-во «Ранок», 2018. 272 с.

4. Готра О.З. Мікроелектронні елементи та пристрої для термометрії. Львів: Ліга-Прес, 2001. 487с.

5. Засєкіна Т.М. Засєкін Д.О. Фізика (профільний рівень): підруч. для 10 кл. закладів загальної середньої освіти. Київ: УОВЦ «Оріон», 2018. 304 с.

6. Индикаторные устройства на жидких кристаллах / под ред. З.Ю.Готры, авт. кол.: З.Ю.Готра, Л.К.Вистинь, В.В.Пархоменко, Л.М.Смеркло и др. Москва: Сов. Радио, 1980. 240с.

7. Лобенко А.А. Жидкие кристаллы в морской медицине. Киев: Наук. думка, 1992. 96с.

8. Пикин С.А., Блинов Л.М, Жидкие кристаллы / под ред. Л.Г.Асламазова. Москва: Наука, 1982. 208с.

9. Сонин А.С. Введение в физику жидких кристаллов. Москва: Наука, 1983. 320с.