

## Віртуальний та реальний експеримент у дослідженні твіст-ефекту в рідкому кристалі

С. П. Величко\*, В. В. Неліпович

Центральноукраїнський державний педагогічний університет імені Володимира Винниченка, м. Кропивницький, Україна

\*Corresponding author. E-mail: spvelychko@gmail.com

Paper received 03.02.21; Accepted for publication 16.02.21.

<https://doi.org/10.31174/SEND-PP2021-246IX97-09>

**Анотація.** Описано поєднання віртуального та реального навчального фізичного експерименту з метою дослідження твіст-ефекту в нематичних рідких кристалах під час вивчення їх у шкільному курсі фізики. Це сприяє ефективному засвоєнню старшокласниками фізичних властивостей рідких кристалів, які лежать в основі роботи багатьох сучасних пристроїв відображення інформації. Віртуальний фізичний експеримент реалізується за допомогою педагогічного програмного засобу “Віртуальна фізична лабораторія з вивчення властивостей рідких кристалів”. Реальний експеримент розроблено з використанням саморобного обладнання.

**Ключові слова:** віртуальна фізична лабораторія, навчальний фізичний експеримент, рідкий кристал, саморобне обладнання, твіст-ефект.

**Вступ.** Одним із напрямків подальшого вдосконалення фізичної освіти у закладах загальної середньої освіти (ЗЗСО) є включення до змісту навчального матеріалу курсу фізики нових питань, а інколи і нових тем з метою поглиблення і посилення зв'язків освіти з наукою, що пов'язано з виникненням і цілеспрямованим розвитком нових технологій, широким запровадженням у різних галузях діяльності людини інформаційно-комунікаційних і хмарних технологій та використанням у навчанні сучасних освітніх і комп'ютерно-орієнтованих технологій.

Переконливим прикладом такого стану є бурхливий розвиток в останні десятиліття новітніх дисплейних технологій. Це, наприклад, яскраво ілюструється тим, що на зміну електронно-променевої трубки телевізора прийшли інші типи дисплеїв – рідкокристалічні, що доводить розвиток фізики рідких кристалів, як науки, та впровадження її досягнень у повсякденне життя людини та визначає перспективу подальшого застосування на найближче майбутнє.

Безперечно, унікальні властивості рідких кристалів (РК), а саме: пружність і в'язкість, поєднання текучості та анізотропії фізичних властивостей, велика чутливість до впливу зовнішнього електричного та магнітного поля та ін., пояснюються сучасними науковими досягненнями. Поряд з тим вивчення цих властивостей та відповідних ефектів рідкокристалічного стану речовини суттєво розширює сутність багатьох фізичних понять, що традиційно складають предмет вивчення окремих розділів курсу фізики, і дозволяє пояснити фізичні механізми, котрі є основою технічних застосувань рідких кристалів. Це актуалізує і загострює проблему ознайомлення учнів ЗЗСО з властивостями РК, а головне – вимагає вирішення питання розгляду конкретного змісту та методики оптимального навчання у шкільному курсі фізики з урахуванням єдиного підходу до цілісного вчення про РК. І хоча навчальні програми [10; 12; 13] передбачають вивчення РК в шкільному курсі фізики, проте навчальний матеріал про РК, що представлений у підручниках з фізики для 10 класу за ред. І.М.Гельфгата (2018 р.), за ред. М.В.Головка (2018 р.), для 10 кл. та 11 кл. за ред. В.Г.Бар'яхтара (2018 р., 2019 р.) й у підручниках з фізики і астрономії для 11 кл. за ред. В.Д.Сиротюка (2019 р.), а також за ред. Т.М.Засекої (2018 р., 2019 р.) носить оглядовий характер і не дозволяє на достатньому науковому рівні засвоїти учням ті фізичні ефекти і властивості РК, які вже сьогодні використовуються в промисловості,

у побуті та в різних сферах діяльності людини. Стосовно навчального експерименту з даної теми залишається необґрунтованою пропонована кількість дослідів, не визначеним є місце і роль навчального фізичного експерименту (НФЕ) про властивості РК, а головне – відсутнє матеріально-технічне забезпечення у ЗЗСО для реалізації цих дослідів. Тому проблема розробки і впровадження в шкільний освітній процес навчального експерименту, що стосується розкриття основних фізичних властивостей РК, є актуальною.

**Короткий огляд публікацій з теми.** Аналіз навчально-методичної літератури, яка стосується вивчення фізики РК, дає можливість окреслити напрямки, в яких вирішуються питання створення та впровадження як демонстраційних дослідів, так і робіт фізичного практикуму з даної тематики.

Система демонстрацій, що розкриває властивості рідких кристалів, вперше в методичній літературі була описана ще професором А.Б.Млодзівським, який розробив методику лекційного демонстрування властивостей РК у закладах вищої освіти (ЗВО): фазові переходи рідких кристалів; аномальне обертання площини поляризації РК; монотропність РК; мієлінові форми [6, с. 146-153]. Деяко пізніше оригінальні досліді з використанням рідкокристалічної плівки, що дозволяла візуалізувати інфрачервоне випромінювання, запропонував О.П.Капустін [5, с. 340-344].

Л.Шабишев та Л.Валькова, адаптувавши поляризаційно-мікроскопічний метод, розробили лекційні досліді з використанням нагрівального столика, що дозволяв спостерігати поведінку РК-речовини за різних температур [14, с. 92-95]. Це уможливило демонструвати фазові стани та спостерігати текстури різних РК.

Більш детально і комплексно до вирішення проблеми створення системи НФЕ з властивостей РК підійшли М.І.Гриценко та О.П.Ситников. Вони розробили лабораторний практикум для студентів фізичних спеціальностей педагогічних ЗВО, в результаті чого було запропоновано та описано сім лабораторних робіт [11]: вивчення фазових переходів в рідких кристалах за зміною текстур; перехід Фредерікса в електричному полі (S-ефект); кероване електричним полем подвійне променезаломлення у нематичному рідкому кристалі (B-ефект); електрооптичні ефекти в нематичних рідких кристалах під впливом електричного струму провідності; холестерико-нематичний перехід у нематичному рідкому кристалі з індукованою спіральною структурою; дослідження тем-

пературної залежності питомої електропровідності рідких кристалів; селективне відбивання світла холестеричними рідкими кристалами.

Пізніше М.І.Гриценко разом з авторським колективом доповнив створений лабораторний практикум для студентів ЗВО такими новими роботами: вивчення кроку холестеричної спіралі методом дослідження текстури холестериків; вимірювання коефіцієнтів в'язкості Мієсовича в нематиках методом Стокса [4].

Слід зазначити, що робота із створення демонстраційного експерименту та робіт фізичного практикуму проводилася не лише для забезпечення вивчення РК в ЗВО, а й робилися спроби розробки навчальних демонстрацій для ознайомлення школярів з рідкокристалічним станом речовини та їхніх властивостей. Так оригінальні досліди для демонстрації властивостей рідких кристалів з використанням саморобного обладнання були запропоновані вчителем фізики Г.Т.Горбуновим: демонстрація рідкокристалічного стану; демонстрація електрооптичного явища (динамічне розсіювання світла) в рідкому кристалі [3, с. 78-80].

Отже, як переконує наш аналіз, питання розробки НФЕ з метою відтворення основних фізичних властивостей РК для ефективного їх засвоєння і розуміння більшою мірою були спрямовані на забезпечення викладання загального курсу фізики в ЗВО. При цьому багато дослідників досягли з даної проблеми певних успіхів. Проте, можна констатувати відсутність необхідної розробленої системи оптимальних навчальних дослідів з конкретизацією їх місця в освітньому процесі та необхідного навчального обладнання для забезпечення експериментального вивчення фізики РК у ЗЗСО.

**Мета.** Проаналізувати розроблений і запропонований нами навчальний фізичний експеримент, що реалізується з використанням як віртуальних, так і реальних засобів навчання і вирішує проблему ефективного вивчення та розуміння явищ, які відбуваються в сучасних пристроях відображення інформації, що працюють з використанням твіст-ефекту в рідких кристалах.

**Матеріали та методи.** Формування фізичних уявлень про РК під час вивчення курсу фізики в ЗЗСО, вимагає створення відповідних умов, коли учням повідомляється посилюючий для засвоєння матеріал та запроваджуються адекватні методи, методичні прийоми та засоби навчання. Таким чином, з метою формування переконливих уявлень з основ фізичної теорії про РК, їх властивостей та розуміння які саме ефекти знайшли широке практичне використання, нами запропоновано і відпрацьовано відповідний комплекс методичного забезпечення [2], який розкриває основні теоретичні відомості про фізику РК та включає серію демонстрацій і низку робіт фізичного практикуму, що представлені у вигляді педагогічного програмного засобу (ППЗ) "Віртуальна фізична лабораторія з вивчення властивостей рідких кристалів" [7]. Фактично запропонована комп'ютерна програма є симулятором фізичної лабораторії з вивчення рідких кристалів.

ППЗ розроблено в середовищі Macromedia Flash MX, тривимірні моделі були створені на базі програмного середовища 3ds Max 2008, інтерпретація даних об'єктів відбувалася за допомогою програми Swift 3d 4.5. Програма 3ds Max 2008 дозволяє за допомогою своїх інструментів створювати різноманітні за формою та складністю тривимірні комп'ютерні моделі, а разом з Mac-

romedia Flash MX створювати активні візуальні ефекти, що реалізовано у програмному продукті з метою відтворення демонстраційного експерименту та проведення лабораторного практикуму і реалізації принципу наочності під час вивчення фізики рідких кристалів, а також для забезпечення можливостей здійснити самостійне виконання учнями лабораторних досліджень. Отже, в умовах відсутності у фізичному кабінеті необхідного навчального обладнання система НФЕ реалізується за допомогою запропонованих нами ППЗ та комп'ютерно орієнтованими засобами навчання.

Демонстраційний експеримент на базі віртуальної фізичної лабораторії дозволяє відтворити сім демонстраційних дослідів: демонстрація оптичної активності холестеричного рідкого кристалу; демонстрація переходу Фредерікса (S-ефект); демонстрація твіст-ефекту; демонстрація доменів Капустіна-Вільямса; динамічне розсіювання світла; ефект „гість – господар”; зміна кольору рідких кристалів від температури. При цьому користувач самостійно збирає установку та активно впливає на зміну параметрів досліджуваного об'єкта, що дозволяє максимально наблизити експеримент, який моделюється на моніторі комп'ютера, до реального. Запропонований фізичний практикум на основі розробленого ППЗ представлений п'ятьма лабораторними роботами: вивчення оптичної активності холестеричного рідкого кристалу; вивчення переходу Фредерікса (S-ефект); вивчення явища твіст-ефекту; вивчення явища динамічного розсіювання світла; вивчення фазових переходів в рідких кристалах. Під час виконання лабораторних робіт користувач активно змінює параметри досліджуваної установки та фіксує відповідні покази приладів для подальшої їх обробки.

Система запропонованих віртуальних дослідів імітує роботу фізичних приладів та установок і призначена для ознайомлення учнів з обладнанням, яке використовується під час виконання реального експерименту. Крім того ППЗ "Віртуальна фізична лабораторія з вивчення фізики рідких кристалів" під час виконання демонстрацій та лабораторних робіт дозволяє: активно змінювати положення досліджуваної системи об'єктів, тим самим впливаючи на результат вимірювання; повторювати відповідні дії необхідну кількість разів; повертатися до будь-якого етапу дослідження для повторного перегляду чи зміни параметрів досліджуваного процесу; змінювати числові значення відповідних параметрів і встановлювати функціональні їхні залежності і закономірності; знімати покази приладів для подальшого опрацювання отриманих результатів; одночасно спостерігати процеси, що відбуваються під час зміни параметрів експерименту й порівнювати їх зі зміною внутрішньої структури РК, що моделює будову рідкого кристалу.

Проаналізуємо роботу ППЗ на прикладі лабораторної роботи: **Вивчення твіст-ефекта.**

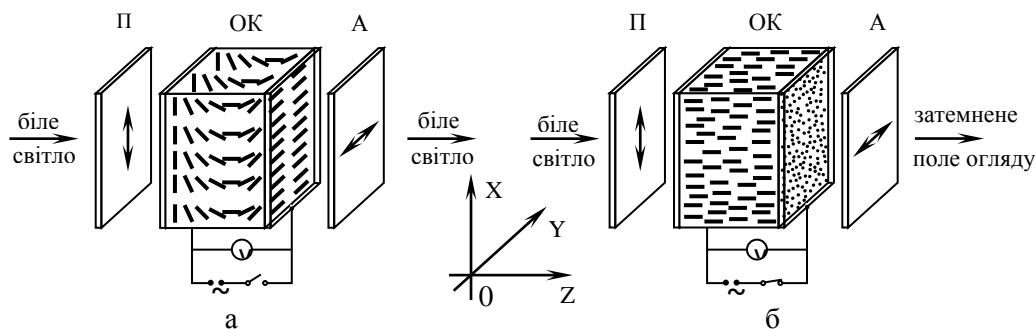
**Мета:** виявити особливості переорієнтації електричним полем молекул нематичного рідкого кристала (НРК), що має твіст-структуру; встановити залежність зміни інтенсивності пропускання світлового пучка твіст-структурою від керуючої напруги та побудувати графік залежності  $I = f(U)$ ; оцінити напругу, при якій відбувається повна переорієнтації молекул НРК при твіст-ефекті.

**Обладнання:** напівпровідниковий лазер, оптична комірка (ОК) з нематичним рідким кристалом твіст-

структури ( $\Delta\epsilon > 0$ ), поляроїд, джерело змінної напруги (звуковий генератор), вольтметр, реостат, фотоелемент, мікроамперметр, вимикач, провідники.

**Короткі теоретичні відомості.** Твіст-ефект виникає в нематичному рідкому кристалі з додатною анізотропією діелектричної проникності ( $\Delta\epsilon > 0$ ), що має твіст-орієнтацію. При твіст-орієнтації молекули РК в оптичній комірці вибудовуються у вигляді 1/4 витка спіралі (рис.1, а). Якщо уявно розбити таку структуру РК у комірці на шари, що є паралельними до обмежуючих поверхонь комірці, 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 монохроматичного пучка світла на кут  $\pi/2$  і володіє двопроренезаломлюючими властивостями. Причому поворот площини поляризації відбувається за умови:  $\lambda \ll (n_n - n_3) \cdot P_0$ , де  $\lambda$  – довжина падаючої хвилі на твіст-структуру,  $n_3$  і  $n_n$  – відповідно показники заломлення для звичайного і незвичайного світлових пучків,  $P_0$  – крок спіралі РК. У нашому випадку  $P_0 = 4 \cdot d$ ,  $d$  – товщина оптичної комірці. Тому попередню умову можна подати у вигляді:  $\lambda/4 \ll (n_n - n_3) \cdot d$ . Дана нерівність виконується для всіх довжин електромагнітних хвиль видимого діапазону, коли використовуються оптичні комірці товщиною 10 мкм і більше.



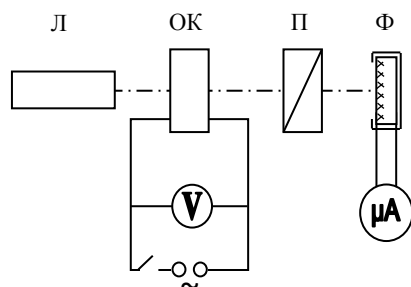
**Рис. 1.** Явище твіст-ефекта: а –  $U = 0$ ; б –  $U > U_n$ , де П – поляризатор, ОК – оптична комірці, А – аналізатор.

Якщо на таку комірці подати електричну напругу, що має значення більше чи рівне пороговій напрузі, то виникає орієнтаційний ефект, який має назву твіст-ефект. Він полягає в тому, що молекули НРК з твіст-структурою орієнтуються вздовж силових ліній електричного поля – довгі вісі молекул розташовуються перпендикулярно електродам (рис. 1, б).

Порогова напруга при твіст-ефекті визначається виразом:

$$U_{п} = \pi \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \Delta\epsilon} \left( K_{11} + \frac{1}{4} (K_{33} - 2K_{22}) \right)},$$

де  $K_{11}$ ,  $K_{33}$ ,  $K_{22}$  – модулі пружності НРК для деформації відповідно поперечного, поздовжнього вигину та деформації кручення,  $\epsilon_0$  – електрична стала,  $\Delta\epsilon$  – анізотропія діелектричної проникності.



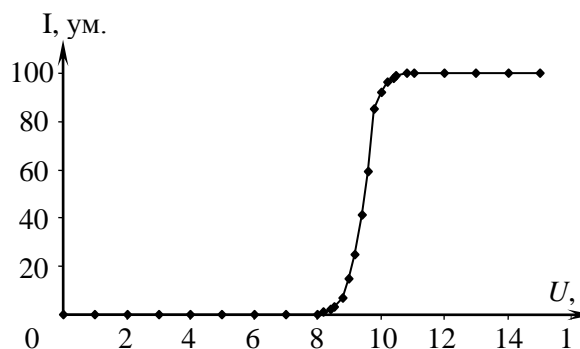
**Рис. 2.** Схема установки для вивчення твіст-ефекта: Л – лазер; П – поляроїд; ОК – оптична комірці; Ф – фотоелемент.

**Виконання роботи.** Для вивчення явища твіст-ефекта за допомогою ППЗ збираємо віртуальну установку, яка складається з лазера, поляроїда, мікроамперметра та фотоелемента за схемою на рис.2, не встановлюючи ОК. Вимірювання інтенсивності лазерного пучка відбувається за допомогою фотоелемента, який з'єднаний з мікроамперметром. Враховуючи закони фотоефекта, прийма-

ють до уваги, що вимірюваний фотострум пропорційний інтенсивності пучка випромінювання, що потрапляє на фотоелемент.



**Рис.3.** Фрагмент виконання віртуальної лабораторної роботи.



**Рис. 4.** Залежності інтенсивності лазерного пучка від напруги при твіст-ефекті.

Спершу слід визначити фотострум  $I_0$ , що відповідає

інтенсивності розсіяного в приміщенні світла. Далі вмикають лазер і регулюють поворот поляроїда так, щоб лазерний пучок на фотоелементі мав максимальну інтенсивність. Це спостерігається, коли напрями коливань вектора напруженості електричного поля лазерного пучка і головної площини поляроїда співпадають. При цьому покази мікроамперметра – максимальні. Потім між лазером та поляроїдом поміщаємо ОК та, повернувши її в оправі, досягаємо мінімальної інтенсивності лазерного пучка. Це відбудеться у тому випадку, коли площина світлових коливань лазерного пучка і орієнтація довгих осей молекул шару РК на ближньому до лазера прозорому електроді ОК співпадуть. У цьому випадку лазерний пучок, пройшовши шар РК, повертає площину своєї поляризації на  $90^\circ$  за рахунок оптично активної скрученої структури РК і, потрапивши на аналізатор, гаситься ним. Згодом слід приєднати до електродів ОК звуковий генератор ( $\nu=1000\text{Гц.}$ ) і поступово збільшувати напругу за допомогою реостата. При цьому фіксують значення фотоструму  $I^*$ , що відповідає сумарному випромінюванню, яке падає на фотоелемент. Таким чином, при зміні напруги (і досягненні її порогового значення) молекули РК починають орієнтуватися вздовж силових ліній електричного поля – спіраль почне руйнуватися. А при  $U \gg U_n$  молекули перейдуть із спіральної структури до орієнтації, коли довгі вісі молекул РК розташуються перпендикулярно електродам ОК. В результаті зникне оптична активність РК і світловий плоскополяризований пучок лазера вільно пройде через шар нематика та аналізатор і потрапить на фотоелемент – покази мікроамперметра, що фіксує фотострум, будуть максимальні. Інтенсивність випромінювання тільки лазерного пучка, який потрапляє на фотоелемент, знайдемо за формулою:  $I = I^* - I_0$ . Отримані результати слід записати в заздалегідь підготовлену таблицю.

Фрагмент віртуальної установки для дослідження твіст-ефекту з використанням ППЗ [7] показано на рис.3. Отримані результати вимірювань у вигляді графіка  $I = f(U)$  показані на рис. 4, за яким визначасмо напругу, при якій відбувається повна переорієнтація молекул рідкого кристала:  $U_n = 10,8\text{В.}$

Лабораторну роботу для дослідження твіст-ефекту в РК з використанням саморобного обладнання розглянемо у варіанті: **Дослідження оптичних характеристик твіст-ефекта.**

**Мета:** виявити особливості переорієнтації електричним полем молекул нематричного рідкого кристала, що має твіст-структуру; встановити залежність зміни інтенсивності пропускання світлового пучка твіст-структурою від керуючої напруги та побудувати графік залежності  $I = f(U)$ ; побудувати вольт-контрастну криву  $K = f(U)$  та оцінити напругу переорієнтації молекул НРК при твіст-ефекті.

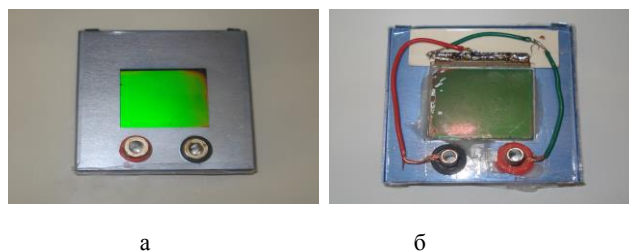
**Обладнання:** лазер ЛГН-109, рідкокристалічна ОК, звуковий генератор ГЗШ-63, вольтметр, мікроамперметр М194, фотоелемент ФД-К-155, вимикач, провідники.

**Опис установки та методика виконання роботи.** Для дослідження твіст-ефекту в експериментальній установці необхідна наявність одного із головних її елементів – оптичної комірки з РК. В якості експериментальної ОК ми пропонуємо використати чорно-білий дисплей мобільного телефону, в якому присутній РК твіст-структури. Зазвичай дисплей мобільного телефону складається з двох прозорих скляних пластинок, між якими розміщено

РК. На зовнішній стороні скляних пластинок приклеєні з одного боку поляризатор, а з іншого аналізатор та дзеркало.

Схематична будова і робота такого РК-дисплея фактично описана нами вище і представлена на рисунку 1. Отже, перетворивши таку ОК, можна використовувати її для експериментальних досліджень. Для цього з дисплея достатньо видалити дзеркало – ОК буде безперешкодно пропускати світловий потік через себе. Далі необхідно приєднати до її електродів провідники та змонтувати ОК у відповідну конструкцію, яка буде захищати її від механічних пошкоджень.

Для з'єднання провідників з електродами ОК потрібно з'ясувати, яким чином вони побудовані. Зазвичай, геометрія електродів ОК, що використовується в рідкокристалічних дисплеях, має форму системи паралельних тонких електродів, напилених на внутрішню поверхню обмежуючих скляних пластинок. Причому пластинки розміщені таким чином, що їх електроди взаємно перпендикулярні. Така конструкція дозволяє реалізувати формування зображення, що забезпечується складною електронною схемою: на один з горизонтальних електродів подається збуджувальний імпульс певної амплітуди, а на всі вертикальні – інформаційний імпульс. У результаті всі елементи даного рядка спалахують одночасно, але з різною яскравістю.



**Рис. 5.** Експериментальна оптична комірка: а – вигляд ззовні; б – елементи з'єднання провідників з ОК.

Переорієнтація всієї речовини РК забезпечує умови для вивчення твіст-ефекту. Для цього необхідно одночасно подати керуючу напругу на всі контакти електродів обох скляних пластинок. Це можливо тоді, коли з'єднати між собою вертикальні і горизонтальні контакти окремо шиною та вивести лише по одному провіднику від кожної із них. На практиці, як показали наші пошуки з різними РК-дисплеями деяких фірм виробників, це завдання є досить складним. Адже у всіх РК-дисплеях напругу, яка подається на окремі електроди, регулює мікропроцесор, який міститься безпосередньо на дисплеї, і обійти його, не пошкодивши окремі елементи, виявилось досить проблематичним завданням.

В результаті пошуків нам вдалося знайти модель дисплея – Motorola V50, у якому такий процесор з'єднувався з ОК шлейфом. Отже, обережно видаливши процесор, нам вдалося припаяти контакти до шлейфа (рис. 5, б) та помістити досліджувану ОК в захисну оболонку (рис. 5, а).

Подальше дослідження явища твіст-ефекту полягає в наступному. Збираємо реальну лабораторну установку за схемою, що показана на рис. 2. Загальний вигляд установки зображено на рис. 6. Методика виконання роботи не відрізняється від віртуального вивчення твіст-ефекту. Вмикаємо лазер і регулюємо ОК таким чином, щоб лазерний пучок, який потрапляє на фотоелемент,

мав максимальну інтенсивність. Потім вмикаємо звуковий генератор ( $\nu=1000\text{Гц}$ ), і змінюємо напругу від 0 до 2,5В через кожні 0,1В та фіксуємо значення фотоструму. Це дозволяє встановити відповідну залежність між інтенсивністю світлового пучка та керуючою напругою при твіст-ефекті. Таку залежність подаємо у вигляді графіка  $I = f(U)$ , але побудована крива не дає можливості точно визначити порогове значення напруги  $U_n$  твіст-ефекту. Тому для оцінки порогового значення напруги краще використати графік вольт-контрастної характеристики твіст-ефекта –  $K = f(U)$ . Під контрастним відношенням  $K$  розуміють відношення фотоструму  $I$ , що потрапляє на фотоелемент при  $U = 0\text{В}$  до  $I_i$  – струм при  $i$ -тому значенні керуючої напруги  $U_i$ :  $K = I/I_i$ . Далі за графіком  $K = f(U)$  визначаємо значення порогової напруги в точці різкого зростання лінії графіка.



Рис. 6. Загальний вигляд установки.

У ході виконання лабораторної роботи “Дослідження оптичних характеристик твіст-ефекта” з описаною ОК були одержані результати, представлені в таблиці 1. В результаті отриманих даних було побудовано графік залежності  $I = f(U)$  (рис. 7) та графік  $K = f(U)$  (рис. 8), а за графіком вольт-контрастного відношення була визначена порогова напруга твіст-ефекта:  $U_n = 1,4\text{В}$ .

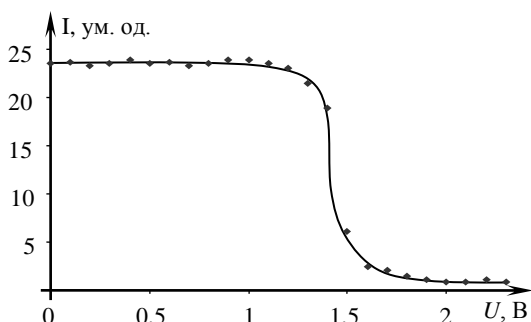


Рис. 7. Залежності інтенсивності лазерного пучка від напруги при твіст-ефекті.

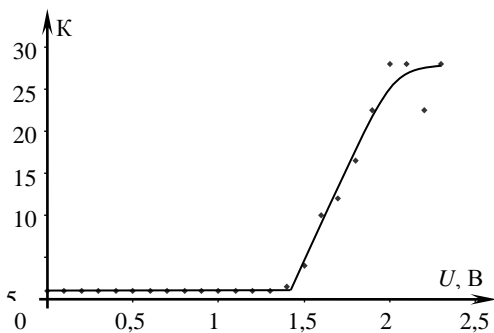


Рис. 8. Вольт-контрастна характеристика твіст-ефекта.

Таблиця 1. Результати виконання реального експерименту

№ п/п	U, В	I <sub>0</sub> , ум. од.	I*, ум. од.	I, ум. од.	K	U <sub>n</sub> , В
1	0	0,5	24	23,5	1,00	1,4
2	0,1	0,5	24,2	23,7	0,99	
3	0,2	0,5	23,8	23,3	1,01	
4	0,3	0,5	24	23,5	1,00	
5	0,4	0,5	24,4	23,9	0,98	
6	0,5	0,5	24	23,5	1,00	
7	0,6	0,5	24,2	23,7	0,99	
8	0,7	0,5	23,8	23,3	1,01	
9	0,8	0,5	24	23,5	1,00	
10	0,9	0,5	24,4	23,9	0,98	
11	1,0	0,5	24,4	23,9	0,98	
12	1,1	0,5	24	23,5	1,00	
13	1,2	0,5	23,6	23,1	1,02	
14	1,3	0,5	22	21,5	1,09	
15	1,4	0,5	19,4	18,9	1,24	
16	1,5	0,5	6,6	6,1	3,85	
17	1,6	0,5	3	2,5	9,40	
18	1,7	0,5	2,6	2,1	11,19	
19	1,8	0,5	2	1,5	15,67	
20	1,9	0,5	1,6	1,1	21,36	
21	2,0	0,5	1,4	0,9	26,11	
22	2,1	0,5	1,4	0,9	26,11	
23	2,2	0,5	1,6	1,1	21,36	
24	2,3	0,5	1,4	0,9	26,11	

**Результати та їх обговорення.** Результати описаних дослідів з вивчення твіст-ефекту рідкого кристалу в шкільному курсі фізики на основі реального та віртуального експериментів представлені в публікаціях [1; 2; 8; 9] та реалізуються за допомогою розробленого ППЗ [7]. Вони пройшли відповідну апробацію в ЗЗСО та обговорені і схвалені на чисельних наукових конференціях.

**Висновки.** Підсумовуючи зазначимо, що запропонований віртуальний демонстраційний експеримент і дослідницька робота на базі ППЗ “Віртуальна фізична лабораторія з вивчення властивостей рідких кристалів” суттєво підсилює експериментальний метод вивчення фізичних властивостей рідкокристалічної фази речовини та сприяє ознайомленню школярів з основами фізики РК. Перспективною бачиться подальша розробка запропонованої методики створення саморобного обладнання з доступних матеріалів, які у поєднанні з наявним обладнанням шкільного фізичного кабінету дозволяють старшокласникам реалізовувати досить цікаві і важливі навчальні дослідження під час вивчення РК в ЗЗСО. Зазначимо, що запропонований реальний експеримент є доступним для реалізації його вчителями фізики в умовах середніх загальноосвітніх шкіл.

Можна стверджувати, що розроблена лабораторна робота фізичного практикуму в поєднанні з віртуальною із використанням ППЗ дозволяє розширити уявлення учнів про можливості дослідження, вивчення та практичного застосування РК у практичній діяльності людини. При цьому реалізується принцип наочності під час вивчення фізики рідких кристалів у ЗЗСО, що сприяє розумінню учнями процесів, які відбуваються в пристроях, де використовуються сучасні методи відображення інформації за допомогою РК-дисплеїв.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Величко С.П., Неліпович В.В. Вивчення фізичних властивостей рідких кристалів у загальноосвітній та вищій педагогічній школі: посібник для вчителів. Кіровоград: ПП "Центр оперативної поліграфії "Авангард", 2008. 140 с.
2. Величко С.П., Неліпович В.В. Вивчення фізичних властивостей рідких кристалів у середній загальноосвітній школі: посібник для вчителів. Кіровоград: ПП "Ексклюзив-Систем", 2015. 232 с.
3. Горбунов Г.Т. К изучению жидкокристаллического вещества. Физика в школе. 1989. Вып 5. С.78-80.
4. Лабораторний практикум з фізики рідких кристалів: навч. посіб. / авт. кол.: М.І.Гиценко, О.В.Мельничук, М.В. Мошель, О.М. Пустовий, О.В. Рогоза. Ніжин: Видавництво НДУ ім. М.Гоголя, 2013. 141 с.
5. Капустин А.П. Экспериментальное исследование жидких кристаллов. Москва: "Наука", 1978. 368с.
6. Млодзиевский А.Б. Лекционные демонстрации по физике. Общие указания. Молекулярная физика и термодинамика. Выпуск 1. Москва - Ленинград: ОГИЗ, 1948.181с.
7. Неліпович В.В. Віртуальна фізична лабораторія з вивчення властивостей рідких кристалів [Е. ресурс]: педагогічний програмний засіб / авт. В.В.Неліпович; наук. консульт. С.П.Величко; програміст В.І.Резніченко. Кіровоград: [б. в.], 2008. 1 опт. диск (CD-R). – Назва з етикетки диска.
8. Неліпович В.В. Рідкі кристали та їх властивості. Факультативний курс / за ред. професора С.П.Величка. Харків: Основа, 2011. 110 с.
9. Неліпович В.В. Саморобне обладнання для дослідження твіст-ефекта рідкого кристала в загальноосвітній школі. Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології: наук. журнал / голов. ред. А.А.Сбруєва. Суми: Вид-во СумДПУ імені А.С.Макаренка, 2016. Вип. 1(55). С.263-275.
10. Програма для загальноосвітніх навчальних закладів. Фізика. 10-11 класи. Рівень стандарту. Академічний рівень. Профільний рівень. (зі змінами, затвердженими наказом МОН України № 826 від 14.07.2016) [Е. ресурс]. Режим доступу: Рівень стандарту: [http://kabfiz-roippo.at.ua/fizika.standart\\_10-11.pdf](http://kabfiz-roippo.at.ua/fizika.standart_10-11.pdf); Академічний рівень: [http://kabfiz-roippo.at.ua/fiz\\_ak.doc](http://kabfiz-roippo.at.ua/fiz_ak.doc); Профільний рівень: [http://kabfiz-roippo.at.ua/fiz\\_pr.doc](http://kabfiz-roippo.at.ua/fiz_pr.doc).
11. Ситников О.П. Фізика рідких кристалів. Лабораторний практикум: навч. посібник. Чернівці: Чернігівський державний педагогічний університет імені Т.Г.Шевченка, 2001. 68с.
12. Фізика. Навчальні програми для загальноосвітніх навчальних закладів. 10-11 клас. (рівень стандарту, профільний рівень) (Затверджено МОН України (наказ № 1539 від 24.11.2017 р.) [Е. ресурс]. Режим доступу: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-10-11-klas/2018-2019/fizika-10-11-avtorskij-kolektiv-pid-kerivnicztvom-lokteva-vm.pdf>
13. Фізика і астрономія. Навчальні програми для 10-11 класів закладів загальної середньої освіти (рівень стандарту, профільний рівень). (Затверджено МОН України (наказ № 1539 від 24.11.2017 р.) [Е. ресурс]. Режим доступу: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-10-11-klas/2018-2019/fizika-i-astronomiya-10-11-avtorskij-kolektiv-pid-kerivnicztvom-lyashenka-o-i.doc>
14. Шабышев Л., Валькова Л. Установка для лекционной демонстрации по теме "Жидкие кристаллы". Межвузовский сборник научных трудов: жидкие кристаллы и их применение. Иваново: ИВГУ, 1980. С.92-95.

## REFERENCES

1. Velychko, S.P., Nelipovich, V.V. The study of the physical properties of liquid crystals in general education and higher pedagogical schools: a guide for teachers. Kirovograd: P. E. "Center for Operative Printing" Avangard ", 2008. 140 p.
2. Velychko, S.P., Nelipovich, V.V. Study of the physical properties of liquid crystals in secondary schools: a guide for teachers. Kirovograd: Private Enterprise "Accent-System", 2015.232 p.
3. Gorbunov, G.T. To the study of liquid crystal substances. Physics at school. 1989. Issue 5. P.78-80.
4. Laboratory workshop on liquid crystal physics: textbook. way. / author Col.: M.I. Gitsenko, O.V.Melnichuk, M.V. Moshel, O.M. Pustovy, O.V. Mat. Nizhyn: NDU Publishing House. M. Gogol, 2013. 141 p.
5. Kapustin, A.P. Experimental study of liquid crystals. Moscow: "Science", 1978. 368p.
6. Mlodzievsky, A.B. Lecture demonstrations in physics. General instructions. Molecular Physics and Thermodynamics. Issue 1. Moscow - Leningrad: OGIЗ, 1948.181p.
7. Nelipovich, V.V. Virtual physical laboratory for studying the properties of liquid crystals [Electronic resource]: pedagogical software / ed. V.V. Nelipovich; Science. consultant.S.P. Velychko; programmer V.I.Reznichenko. Kirovograd: [b. v.], 2008. 1 wholesale. disc (CD-R). – Name from the disc label.
8. Nelipovich, V.V. Liquid crystals and their properties. Optional course/ed. Professor S.P. Velichka. Kharkiv: Osнова, 2011.110p.
9. Nelipovich, V.V. Homemade equipment for the study of the twist effect of liquid crystal in secondary school. Pedagogical sciences: theory, history, innovative technologies: sciences. magazine / editor in chief. A.A.Sbrueva. Sumy: Publishing house of Sumy State Pedagogical University named after A.S. Makarenko, 2016. Issue. 1 (55). P.263-275.
10. Program for secondary schools. Physics. Grades 10-11. Standard level. Academic level. Profile level. (with changes approved by the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 826 of 14.07.2016) [Electronic resource]. Access mode: Standard level: [http://kabfiz-roippo.at.ua/fizika.standart\\_10-11.pdf](http://kabfiz-roippo.at.ua/fizika.standart_10-11.pdf); Academic level [http://kabfiz-roippo.at.ua/fiz\\_ak.doc](http://kabfiz-roippo.at.ua/fiz_ak.doc); Profile level: [http://kabfiz-roippo.at.ua/fiz\\_pr.doc](http://kabfiz-roippo.at.ua/fiz_pr.doc).
11. Sitnikov, O.P. Physics of liquid crystals. Laboratory workshop: textbook. manual. Chernihiv: Taras Shevchenko Chernihiv State Pedagogical University, 2001. 68p
12. Physics. Curricula for secondary schools. Grades 10-11. (standard level, profile level) (Approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine (order № 1539 dated 24.11.2017) [Electronic resource]. Access mode: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-10-11-klas/2018-2019/fizika-10-11-avtorskij-kolektiv-pid-kerivnicztvom-lokteva-vm.pdf>
13. Physics and astronomy. Curricula for 10-11 grades of general secondary education institutions (standard level, profile level). (Approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine (order № 1539 dated 24.11.2017) [Electronic resource]. Access mode: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-10-11-klas/2018-2019/fizika-i-astronomiya-10-11-avtorskij-kolektiv-pid-kerivnicztvom-lyashenka-o-i.doc>
14. Shabyshv, L., Valkova, L. Installation for a lecture demonstration on the topic "Liquid crystals". Interuniversity collection of scientific papers: liquid crystals and their application. Ivanovo: IvGU, 1980.P.92-95.

**Virtual and real experiment in the study of the twist effect in a liquid crystal****S. P. Velychko, V. V. Nelipovich**

**Abstract.** A combination of virtual and real educational physical experiment is described in order to study the twist effect in nematic liquid crystals during their study in the school course of physics. This contributes to the effective assimilation by high school students of the physical properties of liquid crystals, which underlie the work of many modern information display devices. The virtual physical experiment is implemented with the help of pedagogical software "Virtual Physical Laboratory for studying the properties of liquid crystals". The real experiment was developed using homemade equipment.

**Keywords:** *virtual physical laboratory, educational physics experiment, liquid crystals, homemade equipment, twist effect.*