

УДК 378.147:004

Винник Олександр Федорович

старший викладач

Харківський національний педагогічний університет імені Г.С. Сковороди, Харків, Україна

vinnik7777777@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5130-5056

Комісова Тетяна Євгенівна

кандидат біологічних наук, доцент

Харківський національний педагогічний університет імені Г.С. Сковороди, Харків, Україна

tatyanakomisova@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3959-8575

Макєєв Сергій Юрійович

кандидат педагогічних наук, доцент

Харківський національний педагогічний університет імені Г.С. Сковороди, Харків, Україна

s.j.makeev@hnpu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1021-6003

STEM-ПРОЄКТ «КОМП'ЮТЕРНИЙ РЕФРАКТОМЕТР ІЗ РІДИННОЮ ПРИЗМОЮ» НА ОСНОВІ ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ COLORKIT

Анотація. Проєкт ColorKit виник близько 15 років тому, як безкоштовний засіб для обробки фото та відеоданих із науковою метою. Перш за все, він призначений для виконання навчально-дослідницьких проєктів в галузі хімії та біології. Використовується учнями-членами МАН та здобувачами Харківського національного педагогічного університету імені Г.С. Сковороди. Завдяки тому, що застосунок має простий інтуїтивний інтерфейс та гнучкі налаштування, на його основі було розроблено ряд оригінальних пристроїв: колориметрів, рефрактометрів, спектрофотометрів, нефелометрів тощо. Створення саморобних (DIY) пристроїв для фізико-хімічного аналізу потребує глибокого знання аналітичної хімії, основ оптики, геометрії, електротехніки, комп'ютерних технологій. Впровадження DIY проєктів у навчальний процес створюють умови для набуття нових стійких компетенцій та навичок колективної роботи. На кафедрі фізики і хімії ХНПУ імені Г.С. Сковороди із здобувачами та учнями членами МАН було розроблено та апробовано ряд саморобних рефрактометрів: простий демонстраційний, із V-призмою, рідинною призмою, оригінальний рефрактометр, принцип дії якого ґрунтується на зміні збільшення лінзи, що контактує з розчином. У таких проєктах глибоко інтегруються природничі та математичні науки: фізика, хімія, геометрія, математика, біологія. У статті розглянуто процес організації STEM-проєкту по створенню комп'ютерного рефрактометра з рідинною призмою. Виконано аналіз останніх досліджень і публікацій, описано конструктивні особливості сучасних рефрактометрів, проаналізовано перспективність упровадження оптичних схем у DIY рефрактометрах. Описано діючу модель саморобного комп'ютерного проточного рефрактометра з рідинною призмою. Відсутність лінз у пристрої між матрицею та кюветою запобігає спотворенню зображення об'єктивом вебкамери, що збільшує його точність. Надано математичне обґрунтування оптичної схеми пристрою. Викладено результати апробації DIY рефрактометра. Підтверджено, що результати вимірювання показників заломлення розчинів гліцеролу з використанням рефрактометра РПЛ-3 практично не відрізняються від отриманих на діючій моделі. Розроблений проточний рефрактометр дозволяє з достатньо високою точністю вимірювати показники заломлення у широкому інтервалі величин, що робить його перспективним для використання у DIY-проєктах здобувачів по розробці комп'ютерних систем перегонки, синтезу речовин, у біологічних дослідженнях, при аналізі продуктів харчування та рослинної сировини.

Ключові слова: навчальний експеримент; рефрактометр; рідинна призма; комп'ютерна обробка візуальних даних; CMOS; STEM; DIY

Постановка й обґрунтування актуальності проблеми. Концепція розвитку природничо-математичної освіти [1] передбачає оснащення шкіл STEM-кабінетами –

спеціальними навчальними просторами для експериментальної та проєктної діяльності. Перелік обладнання затверджений наказом № 574 Кабінету Міністрів України від 29.04.2020 р. [2], включає цифрові вимірювальні комплекси, датчики, мікроконтролери, інструменти для проєктної діяльності тощо. Проте, з огляду на фінансові обмеження або потребу в адаптації обладнання до конкретних освітніх завдань, дедалі більшого значення набуває створення здобувачами освіти саморобних приладів у рамках освітніх проєктів. Часто у DIY пристроях використовуються деталі застарілого обладнання, яке підлягає утилізації. Це робить привабливими такі STEM проєкти своєю екологічною складовою. Розробка саморобних пристроїв та їх апробація відкриває можливості для реалізації міжпредметних зв'язків у курсі хімії, формування дослідницьких і технологічних компетентностей [3].

Особливо цікавими, з точки зору інтеграції природничих наук, є проєкти по створенню комп'ютерних рефрактометрів. Адже для реалізації на практиці ідеї необхідно глибоке знання оптики, математики, комп'ютерних технологій, основ методів фізико-хімічного аналізу, а також уміння застосувати знання у практичній діяльності.

Аналіз наукових публікацій. Робота переважної більшості сучасних цифрових рефрактометрів ґрунтується на принципах повного внутрішнього відбивання. Оптична схема у більшості промислових портативних пристроїв подібна до наведеної на сайті Kyoto Electronics [4]. У роботі американських учених [5] описано створення високоточного комерційного пристрою, математично обґрунтовано його оптичну схему. На основі такої оптичної схеми ученими Шанхайського політехнічного університету розроблено пристрій на основі мікроконтролера STM32F030 та CMOS сенсора у [6]. У публікації описано прототип рефрактометра та результати його тестування.

Занурювальний рефрактометр на основі CCD матриці для контролю складу електроліту в свинцево-кислотному акумуляторі представлено китайськими науковцями (Huazhong University of Science and Technology, м. Ухань) [7]. У роботі розглянуто принцип дії даного рефрактометра, оптичну схему, наведено результати апробації пристрою. Показано, що зміщення позиції променя в залежності від густини електроліту з великою точністю описується лінійною функцією. Значення вимірюваних густин електроліту при розряді акумулятора денсиметром і розробленим приладом практично співпадають. Дослідниками цього ж університету розроблено прецизійний рефрактометр, принцип дії якого ґрунтується на ефекті повного внутрішнього відбивання [8]. У пристрої використовується обробка візуальних даних, які виникають при проходженні світла через масив мікролінз, призму, що контактує з розчином та проєктуванні зображення на CCD матрицю. Конструктивно подібні рефрактометри та результати їх апробації представлені у публікаціях [9,10], наведено методи їх калібрування.

Рефрактометри з рідинними призмами конструктивно прості, в той же час, мають достатню точність та широкий інтервал вимірювання показників заломлення, а тому на їх основі можуть бути розроблені доступні навчальні пристрої та виготовлені саморобні рефрактометри здобувачами. У роботі [11] представлено рефрактометр із рідинною призмою, який дозволяє вимірювати показники заломлення у межах 1.00-3.86 із достатньо високою точністю. Датчиком є лінійна матриця CCD TCD2551D виробника Toshiba. У якості джерела світла може бути використано як монохромне світло, так і «біле» світло. У роботі викладено математичне обґрунтування оптичної системи та результати апробації пристрою. Китайськими ученими [12] представлено розробку з подібною оптичною схемою, наведено результати його апробації.

У роботі [13] описано комп'ютерний лазерний рефрактометр на основі рідинної призми. Завдяки тому, що джерело світла (напівпровідниковий лазер, $\lambda = 635$ нм,

потужність 5 мВт) може переміщуватися навколо кювети, вимірювання показників заломлення можливе у дуже широких межах. Регулювання відстані від кювети до CCD дозволяє корегувати точність пристрою. Наведено математичне обґрунтування оптичної системи. Авторами розроблено програмне забезпечення на Borland C++ для обробки візуальних даних. Виготовлено діючу модель та проведено її апробацію шляхом порівняння вимірних індексів рефракції розчинів NaCl комп'ютерним рефрактометром та промисловим рефрактометром Аббе.

У публікації італійських науковців [14] наведено конструктивно простий рефрактометр, який може бути виготовлений у навчальному закладі. У цьому пристрої в якості рідинної призми використовується кювета у вигляді паралелепіпеда, що суттєво спрощує конструкцію. У статті описано оптичну схему, наведено математичні розрахунки та результати випробування діючої моделі при вимірюванні розчинів етанолу різної концентрації.

Нещодавно з'явилося кілька повідомлень про розробку детекторів рефрактометрів на основі поверхневого плазмового резонансу [15]. Такі пристрої цікаві тим, що не мають призми, а датчик на CMOS-матриці безлінзовий. Завдяки своїй простій конструкції та економічній ефективності даний прилад є перспективним для розробки цифрових рефрактометрів на основі комп'ютерної техніки, смартфонів, планшетів. У публікації [16] пропонується дизайн DIY приставки-рефрактометра на основі поверхневого плазмового резонансу, в якості дифракційної ґратки використано фрагмент DVD-диску.

У роботі [17] описано мікрорефрактометр, який дозволяє вимірювати показники заломлення на різних довжинах хвиль (406, 656, 910, 1320 нм) із точністю не менше ± 0.002 . Конструктивно він відрізняється від інших тим, що оптична частина пристрою, окрім призми, включає ще й дифракційну ґратку. Також у публікації наведено математичне обґрунтування оптичної системи.

Метою статті є популяризація досвіду використання комп'ютерної обробки візуальних даних у навчальних STEM-проєктах; ознайомлення із DIY проєктом «Комп'ютерний рефрактометр із рідинною призмою». Висвітлення принципів організації STEM проєкту на прикладі розробки проточного комп'ютерного рефрактометра з рідинною призмою для вимірювання показників заломлення рідких речовин та розчинів в широкому інтервалі.

Наукова новизна: наведена методика організації STEM проєкту, що ґрунтується на комп'ютерній обробці візуальних даних, результатом якого є створення комп'ютерного DIY рефрактометра.

Виклад основного матеріалу. Розробка саморобних (DIY) пристроїв для фізико-хімічного аналізу потребує глибокого знання аналітичної хімії, основ оптики, геометрії, електротехніки, комп'ютерних технологій. Такі проєкти створюють умови для набуття нових компетенцій та навичок як колективної, так і самостійної роботи.

На кафедрі фізики і хімії ХНПУ імені Г.С. Сковороди розробляється програмний засіб ColorKit [18], на основі якого викладачами, разом із здобувачами вищої освіти та учнями, членами МАН створено ряд комп'ютерних пристроїв: колориметрів, нефелометрів, рефрактометрів, поляриметрів тощо [3].

У більшості випадків навчальні лабораторії оснащені рефрактометрами, які дозволяють вимірювати показники заломлення в дуже невеликих інтервалах. Найбільш розповсюджений РПЛ-3 може вимірювати індекси рефракції у межах $n_D = 1,300\text{--}1,540$. Тому, такими пристроями неможливо, наприклад, визначити чистоту аніліну під час лабораторного заняття «Перегонка аніліну з водяною парою», оскільки показник заломлення аніліну приблизно 1,586. Крім того, при виконанні студентських навчально-дослідницьких робіт часто виникає необхідність вимірювати показники заломлення в режимі реального часу. Проточні рефрактометри з рідинними призмами також

використовуються для безперервного аналізу якості сировини та продуктів реакції, в хіміко-технологічних системах синтезу речовин, а також у хмарних лабораторіях.

Реактиви: гліцерол (техн.), $w(\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3) = 66,6\%$; вода дистильована.

Обладнання: рефрактометр Аббе РПЛ-3; бюретки 2-го класу на 25 мл, ноутбук Dell Latitude 5420, модуль вебкамери B12 FHD, світлодіод FYLF-1860 UYC.

Програмне забезпечення: Windows 7, Microsoft Visual Studio Express Edition, LibreOffice, ColorKit (кафедра фізики і хімії ХНПУ імені Г.С. Сковороди).

Спочатку здобувачі ознайомлюються із програмним засобом ColorKit, опрацьовують літературні джерела, готують проєкт рефрактометра. Обговорюють найбільш раціональні способи його реалізації. Потім будується діюча модель.

При розробці комп'ютерного навчального рефрактометра було взято за основу оптичну схему наведену в [12]. Зовнішній вигляд модуля діючої моделі рефрактометра і оптична схема представлена на рис. 1.

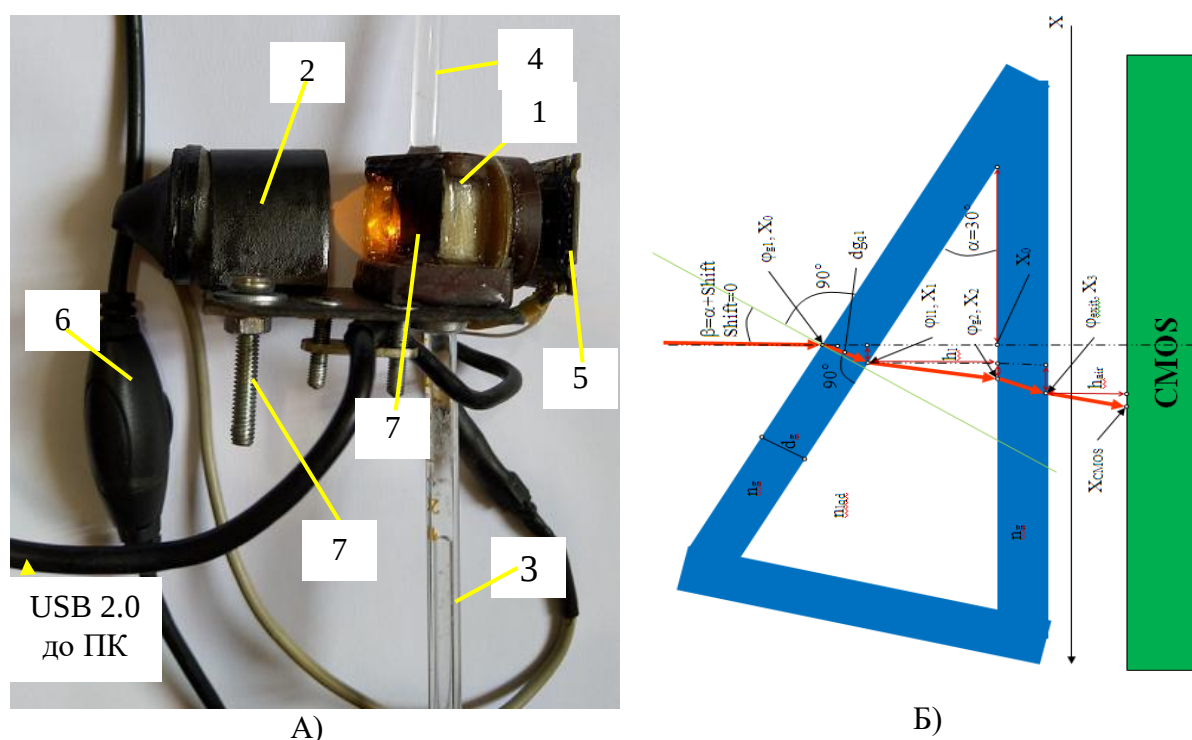


Рис. 1. Модуль рефрактометра: А) зовнішній вигляд; Б) оптична схема.

1-призма; 2-джерело світла (світлодіод $\lambda \approx 589$ нм); 3-трубка для введення проби;
4-трубка для відведення проби; 5-модуль вебкамери B12 FHD;
6 – регулятор яскравості світлодіоду, CMOS-матриця; 7 – шторка; 8 – гвинт для кріплення модуля у корпусі.

Перевага такої оптичної схеми у тому, що відсутність лінз між матрицею та кюветою запобігає спотворенню зображення об'єктивом вебкамери. Модуль розміщувався у корпусі, внутрішня поверхня якого була пофарбована матовою чорною фарбою.

Монохромне світло від світлодіоду з $\lambda \approx 589$ нм через систему лінз попадає на скло кювети під кутом $\alpha = 30^\circ$ (рис.1Б). Частина скла закрита чорною шторкою (рис.1А). Промінь світла проходить через шар розчину і потрапляє безпосередньо на CMOS-матрицю, внаслідок чого формується зображення, що має світле і темне поле (рис.2).

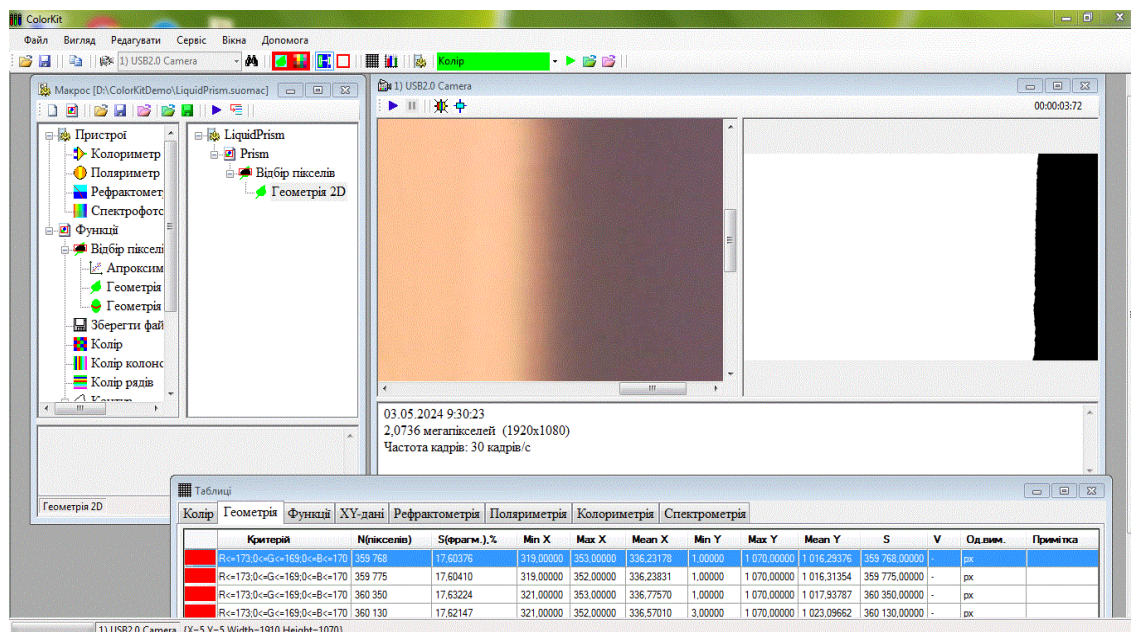


Рис. 2. Обробка візуальних даних у програмному засобі ColorKit.

При зміні показника заломлення розчину, який аналізується (n_D) змінюється ширина чорного поля – чим більший n_D , тим більша ширина чорного поля. Програмний засіб аналізує ширину чорного поля, а потім на основі отриманих даних визначається показник заломлення. Налаштування системи відбору пікселів здійснювали експериментальним шляхом через вікно на рис.3.

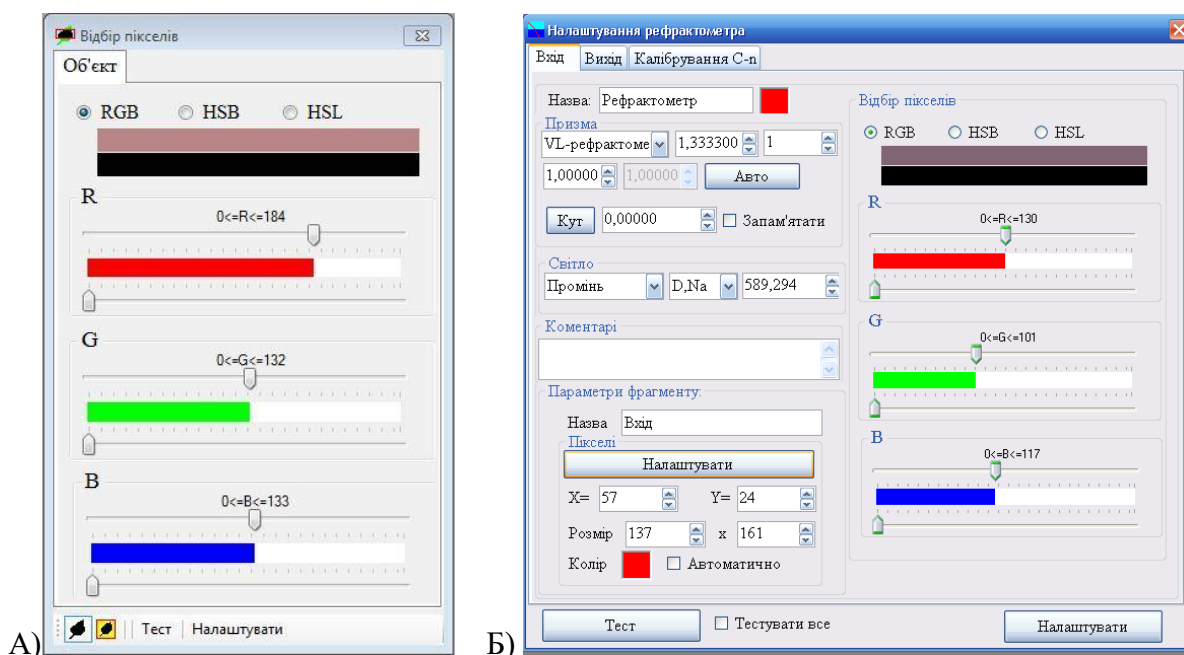


Рис.3. Вікна налаштування відбору пікселів та рефрактометра.

Перед розробкою діючої моделі, при достатній підготовці здобувачів, раціонально створити математичну модель пристрою з використанням комп'ютерних програм для математичних обчислень, таких як MathCad, MathLab, SMATH Studio тощо. Для багатьох типів рефрактометрів (Аббе, Пульфріха, V-рефрактометра) математичне обґрунтування принципів їх дії описано в підручниках та статтях [19-21]. Але при розробці пристрою майже завжди доводиться проводити модифікацію алгоритмів розрахунків.

При проходженні світла через вхідне скло рідинної призми відбувається заломлення променя на кут ϕ_{g1} , рис.1Б:

$$\varphi_{g1} = \text{asin} \left(\sin(\beta) \cdot \frac{n_{\text{air}}}{n_g} \right) \quad (1)$$

де кут $\beta = \alpha + \text{Shift}$ (рис.1Б); n_{air} – показник заломлення повітря; n_g – показник заломлення скла.

На межі скло-рідина промінь заломлюється – кут ϕ_{l1} , рис.1Б:

$$\varphi_{l1} = \text{asin} \left(\sin(\varphi_1) \cdot \frac{n_g}{n_{\text{liq}}d} \right) \quad (2)$$

де $n_{\text{liq}}d$ – показник заломлення розчину.

На межі рідина-скло промінь заломлюється – кут ϕ_{l2} , рис.1Б:

$$\varphi_{g2} = \text{asin} \left(\sin(\alpha - \varphi_{l1}) \cdot \frac{n_{\text{liq}}d}{n_g} \right) \quad (3)$$

При виході променя світла з призми відбувається ще раз заломлення на межі скло-повітря – кут ϕ_{exit} , рис.1Б:

$$\varphi_{\text{exit}} = \text{asin} \left(\sin(\varphi_{g2}) \cdot \frac{n_g}{n_{\text{air}}} \right) \quad (4)$$

Загалом:

$$\varphi_{\text{exit}} = \text{asin} \left(\sin \left(\text{asin} \left(\sin \left(\alpha - \text{asin} \left(\sin(\beta) \cdot \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{liq}}d} \right) \right) \cdot \frac{n_{\text{liq}}d}{n_g} \right) \right) \cdot \frac{n_g}{n_{\text{air}}} \right) \quad (5)$$

$$\varphi_{\text{exit}} = \text{asin} \left(\sin \left(\alpha - \text{asin} \left(\sin(\beta) \cdot \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{liq}}d} \right) \right) \cdot \frac{n_{\text{liq}}d}{n_{\text{air}}} \right) \quad (6)$$

Таким чином, заломлення у склі не впливає на кут променя світла, що виходить із призми, а залежить лише від показника заломлення рідини.

Якщо прийняти $n_D(\text{повітря}) = 1$, то:

$$\varphi_{\text{exit}} = \text{asin} \left(\sin \left(\alpha - \text{asin} \left(\frac{\sin(\beta)}{n_{\text{liq}}d} \right) \right) \cdot n_{\text{liq}}d \right) \quad (7)$$

Після розробки математичної моделі можна запропонувати здобувачам проаналізувати як параметри призми та положення джерела світла впливають на діапазон і точність вимірювання. Одним із факторів, що обмежують точність ДІУ пристрою, є роздільна здатність фотоматриці, тому раціонально також проаналізувати і цей фактор.

Корпус призми діючої моделі виготовлено з текстоліту: склотканини та епоксидної смоли. Передня та задня стінки знаходяться під кутом 30°. Вони мають отвори закриті високоякісним склом із відмитих від світлочутливого шару фотопластинок. Слід особливу увагу звертати на те, щоб у склі не було бульбашок повітря або інших дефектів, інакше усі неоднорідності скла будуть відображатися на матриці, що ускладнює комп'ютерну обробку візуальних даних. Велику увагу слід приділити чистоті матриці, адже цей проєкт передбачає зняття об'єктиву вебкамери. Як показує практика, не завжди вдається уникнути попадання пилу на матрицю. Тому слід, про всяк випадок, придбати комплекти для очищення такої оптики. При забрудненні матриці можна також скористатися саморобними інструментами для очистки.

З метою тестування діючої моделі на основі оптичної схеми (рис.1Б), уточнення параметрів оптичної системи та розробки алгоритму для віртуального пристрою «Рефрактометр» (рис.2, 3Б) проведено ряд випробувань. Усі експерименти проводилися при температурі 20±2°C. Готували розчини гліцеролу шляхом змішування 66,6% гліцеролу з дистильованою водою. Індеси рефракції розчинів розраховували за

формулою:

$$n_D = 0.0014 \cdot C(C_3H_5(OH)_3) \quad (8)$$

та визначали експериментально за допомогою рефрактометра РПЛ-3 (Табл.1). Високий індекс детермінації $R^2=0,999$ (рис.3) свідчить про достатньо високу точність приготування розчинів та вимірювань рефрактометром РПЛ-3. (Табл.1, n_D (РПЛ)). На основі отриманих значень n_D розраховували концентрацію гліцеролу за формулою $C(C_3H_5(OH)_3) = (n_D - 1,331)/0,0014$ [15]. Розроблено макрос для застосунку ColorKit із використанням двох функцій. Перша функція (*відбір пікселів*) призначена для відбору пікселів (рис.2) за критеріями, визначеними користувачем. Налаштування її параметрів відбувається через вікно (рис.3А) шляхом експериментального підбору параметрів RGB.

Друга функція (*геометрія 2D*) призначена для вимірювання ширини темного поля (рис.2). Послідовно заповнювали кювету водою та розчинами гліцеролу (Табл.1) і вимірювали ширину темного поля 20 разів через 1 с. Знаходили середнє значення ширини темного поля (l , px), дисперсію ($\sigma(l)$), та довірчий інтервал величин ($\pm l$, px) (Табл.1).

Табл.1.

Порівняння результатів визначення n_D розчинів гліцеролу на рефрактометрах Аббе РПЛ-3 та комп'ютерному (DIY)

№	$w(C_3H_5(OH)_3)$, %	n_D (РПЛ)	l , px	$\sigma(l)$	$\pm l$, px	n_D (DIY)	Δn_D	Δn_D , %
1	0.00	1.333	151.7	0.015	0.019	1.335	0.002	0.150
2	7.68	1.344	200.3	0.007	0.120	1.343	-0.001	-0.074
3	15.10	1.352	257.6	0.631	0.080	1.352	0.000	0.000
4	22.28	1.361	299.9	0.114	0.080	1.359	-0.002	-0.147
5	29.22	1.370	358.1	0.282	0.084	1.368	-0.002	-0.146
6	35.95	1.379	413.7	0.313	0.047	1.377	-0.002	-0.145
7	42.46	1.388	470.8	0.096	0.074	1.386	-0.002	-0.144
8	48.78	1.397	529.5	0.238	0.084	1.395	-0.002	-0.143
9	54.90	1.405	579.4	0.311	0.074	1.403	-0.002	-0.142
10	60.84	1.414	637.1	3.032	0.263	1.412	-0.002	-0.141
11	66.60	1.421	689.4	0.276	0.079	1.421	0.002	0.150

Перед кожним вимірюванням кювету тричі промивали розчином, показник заломлення якого вивчався. На основі апроксимації методом найменших квадратів n_D вимірюного на рефрактометрі Аббе та ширини темного поля, встановлено, що показник заломлення (n_D) зі шириною темного поля (l) пов'язані наступною залежністю:

$$n_D(DIY) = 1.587 \cdot l + 1.3111 \quad (9)$$

Отриману функцію застосовували для визначення показників заломлення (Табл.1, n_D (DIY)).

Залежність концентрація розчину – показник заломлення, вимірюний на комп'ютерному рефрактометрі з високою точністю ($R^2 = 0,9968$) описуються функцією $n_D(DIY) = 0.0014 \cdot C(C_3H_5(OH)_3) + 1.3315$ (рис.4).

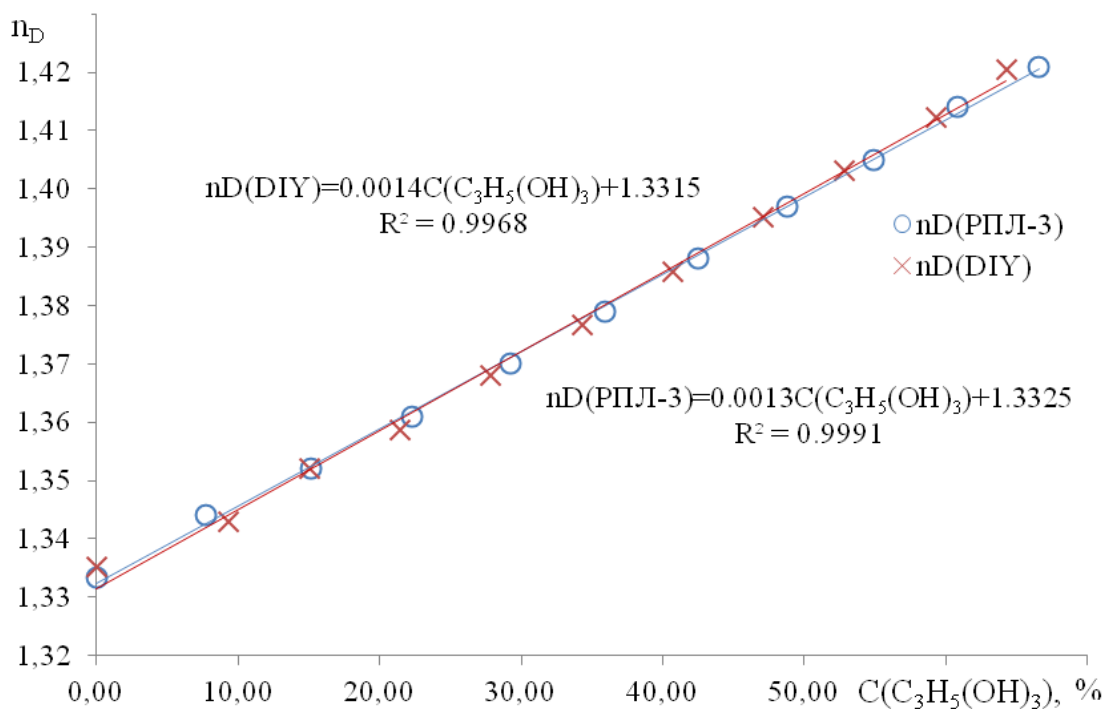


Рис. 4. Порівняння результатів визначення n_D гліцеролу на рефрактометрах Аббе РПЛ-3 та комп'ютерному (DIY).

Різниця між вимірними значеннями показників заломлення на рефрактометрів РПЛ-3 та комп'ютерному не перевищувала 0,15% (Табл.1).

При заміні розчину в кюветі на інший, у якого суттєво відрізняється показник заломлення від попереднього, можливе утворення неоднорідних сумішей, а відповідно призводити до отримання некоректних даних. На (рис.4) показано зміна візуальних ефектів протягом 100с при заміні води у призмі рефрактометра на 66,6% розчин гліцеролу.

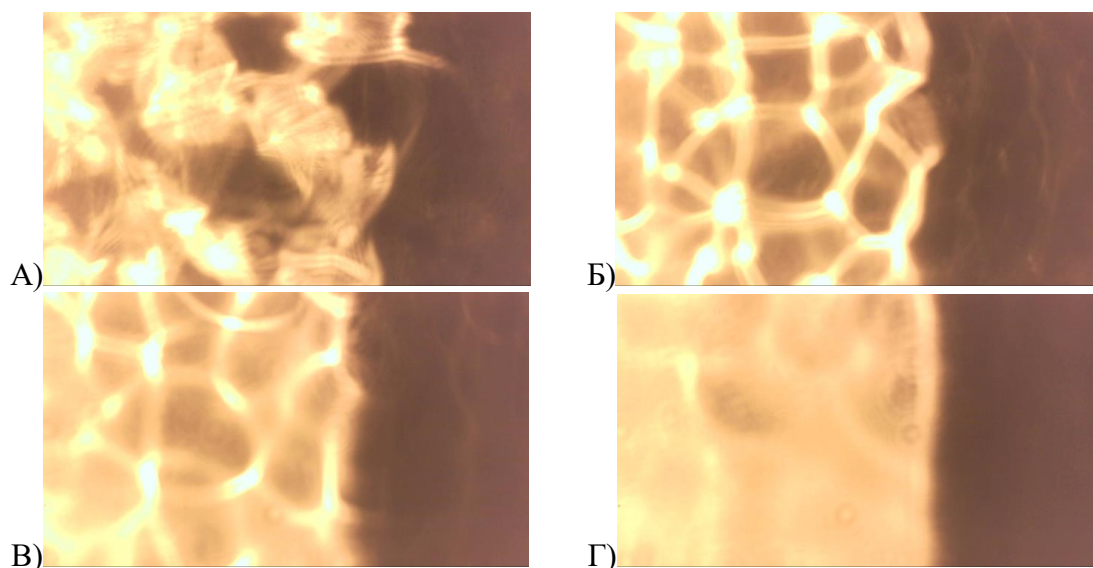


Рис. 4. Утворення неоднорідних сумішей при заміні у кюветі комп'ютерного рефрактометра води на 66,6% розчин гліцеролу: А) 20 с; Б) 40 с; В) 80 с; Г) 100 с.

Програмно утворення неоднорідних розчинів може бути оцінено за значною

змінюю значень показників заломлення отриманих через певний інтервал часу (10-100с), великим дисперсіями кольорів пікселів світлого поля, або ж відбором пікселів межі світле поле – темне поле, апроксимацією лінійною функції і послідуочим аналізом значення індексу детермінації. Малі значення R^2 вказують на те, що змішалися розчини різної концентрації, відповідно необхідно зробити повторну промивку кювети-призми робочим розчином. Слід зазначити, що при безперервному відборі проб під час синтезів утворення неоднорідних розчинів малоїмовірно, оскільки, як правило, не відбувається швидкої зміни показників заломлення реакційної суміші.

Програмний засіб ColorKit ґрунтується на принципах об'єктно-орієнтованого програмування: наслідування, інкапсуляція, поліморфізм, абстракція. Так, функції *колір*, *апроксимація* в подальшому використовуються у пристрої *колориметр*, функції *відбір пікселів*, *апроксимація* – у пристроях *«Рефрактометр»* і *«Поляриметр»* тощо. Після виконаних досліджень здобувачам пропонується розробити алгоритм роботи комп'ютерного рефрактометра з рідинною призмою. В подальшому алгоритми комп'ютерного рефрактометра, які базуються функціях *відбір пікселів*, *геометрія 2D*, *контур*, *апроксимація* можуть бути реалізовані у класі *«Рефрактометр»* (рис.2, 3Б) для створення автоматичного комп'ютерного пристрою. Реалізація результатів роботи у програмному забезпеченні, діючих моделях і прототипах пристроїв є гарним стимулом до подальшої наукової роботи.

На всіх етапах вдосконалення природничої освіти експеримент є основою навчально-виховного процесу і використовується як метод пізнання навколишнього світу, є засобом наочності. Технізація хімічного експерименту є важливим напрямком його модернізації. Використання комп'ютерних пристроїв (термометрів, колориметрів, поляриметрів, мультиметрів та іншого обладнання) дозволяє активізувати пізнавальну діяльність учнів, урахувати їх індивідуальні уподобання та можливості, підтримати діяльнісний підхід до організації навчального процесу, практично реалізувати різноманітні навчальні задачі, спростити обробку отриманої інформації, візуалізувати роботу складного наукового обладнання. Комплексне застосування нових інформаційних технологій, засобів наочності та фізико-хімічного експерименту має синергетичну дію – взаємно доповнюють один одного, підсилюючи загальний педагогічний ефект.

Висновки, рекомендації, перспективи подальших досліджень. Застосування промислових професійних електронних пристроїв для фізико-хімічного аналізу у навчальному процесі часто не дає можливості здобувачам глибоко зрозуміти як вони працюють. При вивченні наук природничого циклу більш раціонально використовувати спеціально розроблені пристрої цифрових навчальних лабораторій. На основі програмного засобу ColorKit можлива розробка різноманітних оптичних засобів із високим ступенем візуалізації. Досвід впровадження STEM - проєктів орієнтованих на створення DIY розробок сприяє розвитку у здобувачів зацікавленості до природничих наук, більш глибокому розумінню будови науко-дослідницьких пристроїв та розвитку творчого мислення. У процесі такого виду діяльності здобувачі набувають практичних навичок у виконанні експериментальних завдань в області хімії, фізики математики.

Перспективи розвитку проєкту:

- удосконалення оптичної системи проєктування світлового потоку на кювету;
- впровадження розроблених алгоритмів до класу *«Рефрактометр»*;
- розробка комп'ютерного рефрактометра високої точності для вимірювання показників заломлення у широкому інтервалі;
- розробка комп'ютерного прецизійного пристрою для переміщення джерела світла відносно призми;
- Розробка термостату для комп'ютерного рефрактометра;

- Створення діючої моделі рефрактометра з рухомим джерелом світла;
- Валідація комп'ютерних пристроїв програмного засобу ColorKit.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про схвалення Концепції розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти): розпорядження Кабінету Міністрів України від 05.08.2020 р. № 960-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/960-2020-%D1%80#Text>.
2. Про затвердження Типового переліку засобів навчання та обладнання для навчальних кабінетів і STEM-лабораторій : наказ Кабінету Міністрів України від 29.04.2020 р. № 574. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0410-20#Text>
3. Винник О.Ф., Бутиріна Є.О., Кратенко Р.І. Комп'ютерна обробка візуальних даних у навчальних DIU проєктах. Електронне наукове фахове видання «Відкрите освітнє Е-середовище сучасного університету». 2024. № 16. С. 1-21. DOI: <https://doi.org/10.28925/2414-0325.2024.161>
4. Kyoto Electronics. Refractometer. Brix meter. URL: <https://www.kem.kyoto/> (дата звернення: 29.09.2025).
5. McClimans M., LaPlante C., Bonner D., Bali S. Real-time differential refractometry without interferometry at a sensitivity level of 10^{-6} . *Applied Optics*. 2006. Vol. 45, iss. 25. P. 6477-6486. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.45.006477>
6. Wang Z., Zhenyuan J. Development of high accurate family-use digital refractometer based on CMOS. *Instrumentation*. 2023. Vol. 10, iss. 3. P. 12-22. DOI: <https://doi.org/10.15878/j.cnki.instrumentation.2023.03.005>
7. Chen J., Yang K., Xia M., Li L., Zeng X. Design of acid-lead battery stage-of-charge detection system based on refractive index detection technology. *AOPC 2015: Optical And Optoelectronic Sensing And Imaging Technology*, 9674. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2199904>
8. Chen J., Guo W., Yang K., Yin X., Yu L. Measurement of refractive index distribution using micro-lens array based on total internal reflection. *Physics And Simulation Of Optoelectronic Devices XXV*, 10098. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2248406>
9. Su D.C., Lee J.Y., Chiu M.H. New type of liquid refractometer. *Optical Engineering*. 1998. Vol. 37, iss. 10. P. 2795-2797. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.601818>
10. Hao L., Ke-cheng Y., Wen-Ping G., Jie D., Jun-Wei Y., Wei L., Min X. An experimental calibration method for digital Abbe refractometer. // *International Symposium On Photoelectronic Detection And Imaging 2013: Imaging Sensors And Applications*, 8908. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2034682>
11. Wan, J., Lu, Y., Lu, Z., Dou, W., Wang, C., & Jiang, G. Optical design of a refractometer with the liquid prism. *Tenth International Conference On Information Optics And Photonics*, 10964. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2505408>
12. Wan J., Liang Z. A Refractometer Based on Liquid Prism. // *2011 International Conference On Optical Instruments And Technology: Optoelectronic Measurement Technology And Systems*, 8201. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.905399>
13. Wan J., Lu Y., Lu Z., Dou W., Wang C., Jiang, G. Refractometer with broad refractive index measurement range. *Sixth International Conference On Optical And Photonic Engineering (ICOPEN 2018)*, 10827. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2500969>
14. De Angelis M., De Nicola S., Ferraro P., Finizio A., Pierattini G. Liquid refractometer based on fringe projection technique. *Interferometry '99: Applications*, 3745. 1999. P. 58-62. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.357807>
15. Yang H., Shin S., Kumar S., Seo D., Oh S., Lee M., Seo S. A CMOS Image Sensor Based Refractometer without Spectrometry. *Sensors*. 2022. Vol. 22, iss. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22031209>

16. Barrios C.A. Smartphone-Based Refractive Index Optosensing Platform Using a DVD Grating. *Sensors*. 2022. Vol. 22, iss. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22030903>
17. Vlaeva I., Yovcheva T., Zdravkov K., Minchev G., Stoykova E. Design and testing of four-wavelength laser micro-refractometer. 15th International School On Quantum Electronics: Laser Physics And Applications, 7027. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.822469>
18. Винник О.Ф., Комісова Т.Є., Кратенко Р.І. (2021). Розробка програмно-методичного комплексу SchoolKit. Електронне наукове фахове видання «Відкрите освітнє Е-середовище сучасного університету». 2021. № 11. С. 32-48. DOI: <https://doi.org/10.28925/2414-0325.2021.113>
19. Rheims J., Köser J., Wriedt T. Refractive-index measurements in the near-IR using an Abbe refractometer. *Measurement Science and Technology*. 1999. Vol. 8, iss. 6. P. 601-605. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/6/003>
20. Universität Leipzig. O5e «Index of Refraction of Liquids (Refractometry)». URL : <http://home.uni-leipzig.de/prakphys/pdf/VersucheIPSP/Optics/O-05e-AUF.pdf> (date of access: 29.09.2025).
21. Cen X., Su J., Li G., Wei W., Bai X., Wu C. Optimal design of optical refractometer for seawater salinity measurement. *Second Target Recognition and Artificial Intelligence Summit Forum*, 11427. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2553186>

Матеріал надіслано до редакції 06.10.2025 р.

Затверджено до друку 27.11.2025 р.

STEM PROJECT «COMPUTER-BASED REFRACTOMETER WITH LIQUID PRISM» BASED ON COLORKIT SOFTWARE

Oleksandr Vynnyk

Senior Lecturer

H. S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University, Kharkiv, Ukraine

vinnik7777777@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5130-5056

Tetiana Komisova

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor

H. S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University, Kharkiv, Ukraine

tatyanakomisova@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3959-8575

Serhii Makieiev

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor

H. S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University, Kharkiv, Ukraine

s.j.makeiev@hnpu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1021-6003

Abstract. The ColorKit project originated about 15 years ago as a free tool for processing photographic and video data for scientific purposes. It is primarily intended for educational and research projects in the fields of chemistry and biology and is used by students of the Junior Academy of Sciences of Ukraine as well as degree seekers at the H.S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University. Thanks to its simple, intuitive interface and flexible configuration options, a number of original devices have been developed on its basis, including colorimeters, refractometers, spectrophotometers, and nephelometers. Creating DIY devices for physicochemical analysis requires in-depth knowledge of analytical chemistry, the fundamentals of optics, geometry, electrical engineering, and computer technologies. The incorporation of DIY projects into the educational process fosters the development of sustainable competencies and teamwork skills. At the Department of Physics and Chemistry of H.S. Skovoroda KhNPU, several homemade

refractometers have been designed and tested together with degree seekers and students of the Junior Academy of Sciences. These include a simple demonstration refractometer, a V-prism refractometer, a liquid-prism refractometer, and an original device whose operating principle is based on changes in the magnification of a lens in contact with a solution. Such projects integrate natural and mathematical sciences at a deep level, including physics, chemistry, geometry, mathematics, and biology. This article examines the organization of a STEM project aimed at creating a computer-based refractometer with a liquid-filled prism. Recent research and publications are analyzed, the design features of modern refractometers are described, and the prospects for implementing optical schemes in DIY refractometers are discussed. A functional prototype of a homemade computer-based flow refractometer with a liquid-filled prism is presented. The absence of lenses between the sensor and the cuvette prevents image distortion by the webcam optics, thereby increasing measurement accuracy. The mathematical justification of the device's optical scheme is provided. The results of prototype testing are also presented. It is shown that the refractive-index measurements of glycerol solutions obtained with the device do not differ significantly from those obtained using the RPL-3 refractometer. The developed flow refractometer enables sufficiently accurate measurement of refractive indices across a wide range of values, making it a promising tool for DIY projects related to the development of computer-controlled distillation systems, substance synthesis, biological research, and the analysis of food products and plant materials.

Keywords: educational experiment; refractometer; liquid prism; computer processing of visual data; CMOS; STEM; DIY

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Cabinet of Ministers of Ukraine (2020). On approval of the Concept for the Development of Science and Mathematics Education (STEM Education): Order 05.08.2020 r. №960-r. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/960-2020-%D1%80#Text>
2. Cabinet of Ministers of Ukraine (2020). On approval of the Standard List of Teaching Aids and Equipment for Classrooms and STEM Laboratories: Order 29.04.2020 r. № 574. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0410-20#Text>
3. Vynnyk, O., Butyrina, Y., & Kratenko, R. (2024). Visual data computer processing in educational DIY projects. *Electronic Scientific Professional Journal «Open Educational E-Environment of Modern University»*, 16, 1-21. <https://doi.org/10.28925/2414-0325.2024.161>
4. Kyoto Electronics. (2020). Refractometer. Brix meter. Kyoto Electronics Manufacturing CO., LTD. September 29, 2025 <https://www.kem.kyoto/>
5. McClimans, M., LaPlante, C., Bonner, D., & Bali, S. (2006). Real-time differential refractometry without interferometry at a sensitivity level of 10⁻⁶. *APPLIED OPTICS*, 45(25), 6477-6486. <https://doi.org/10.1364/AO.45.006477>
6. Wang, Z., & Zhenyuan, J. (2023). Development of high accurate family-use digital refractometer based on CMOS. *Instrumentation*, 10(3), pp. 12-22. <https://doi.org/10.15878/j.cnki.instrumentation.2023.03.005>
7. Chen, J., Yang, K., Xia, M., Li, L., & Zeng, X. (2015). Design of acid-lead battery stage-of-charge detection system based on refractive index detection technology. In H. Gong, N. Wu, Y. Ni, W. Chen, & J. Lu (Ed.), *AOPC 2015: Optical and Optoelectronic Sensing And Imaging Technology*. 9674. 1000 20TH ST, PO BOX 10, Bellingham, WA 98227-0010 USA: SPIE-INT SOC Optical Engineering. <https://doi.org/10.1117/12.2199904>
8. Chen, J., Guo, W., Yang, K., Yin, X., & Yu, L. (2017). Measurement of refractive index distribution using micro-lens array based on total internal reflection. In B. Witzigmann, M. Osinski, & Y. Arakawa (Ed.), *Physics And Simulation Of Optoelectronic Devices XXV*. 10098. 1000 20TH ST, PO BOX 10, Bellingham, WA 98227-0010 USA: SPIE-INT SOC Optical Engineering.

- <https://doi.org/10.1117/12.2248406>
9. Su, D., Lee, J., & Chiu, M. (1998). New type of liquid refractometer. *Optical Engineering*, 37, 2795-2797.
<https://doi.org/10.1117/1.601818>
 10. Hao, L., Ke-cheng, Y., Wen-Ping, G., Jie, D., Jun-wei, Y., Wei, L., et al. (2013). An experimental calibration method for digital Abbe refractometer. B J. Ohta, N. Wu, & B. Li (Ред.), *International Symposium On Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Imaging Sensors And Applications*, 8908.
<https://doi.org/10.1117/12.2034682>
 11. Jiang G., Wan J., Lu Z., Dou W., Wang C., Lu Y. Optical design of a refractometer with the liquid prism. *Tenth International Conference On Information Optics And Photonics*, 10964. 2018. DOI:
<https://doi.org/10.1117/12.2505408>
 12. Wan, J., & Liang, Z. (2011). A Refractometer Based on Liquid Prism. In X. Dong, X. Bao, P. P. Shum, & T. Liu (Ed.), *2011 International Conference On Optical Instruments And Technology: Optoelectronic Measurement Technology And Systems*. 8201. 1000 20TH ST, PO BOX 10, Bellingham, WA 98227-0010 USA: SPIE-INT SOC Optical Engineering.
<https://doi.org/10.1117/12.905399>
 13. Wan, J., Lu, Y., Lu, Z., Dou, W., Wang, C., & Jiang, G. (2018). Refractometer with broad refractive index measurement range. In Y. Yu, C. Zuo, & K. Qian (Ed.), *Sixth International Conference On Optical And Photonic Engineering (ICOPEN 2018)*. 10827. 1000 20TH ST, PO BOX 10, Bellingham, WA 98227-0010 USA: SPIE-INT SOC Optical Engineering.
<https://doi.org/10.1117/12.2500969>
 14. De Angelis, M., De Nicola, S., Ferraro, P., Finizio, A., & Pierattini, G. (1999). Liquid refractometer based on fringe projection technique. In W. P. Juptner, & K. Paturski (Ed.), *Interferometry '99: Applications*. 3745, pp. 58-62. 1000 20TH ST, PO BOX 10, Bellingham, WA 98227-0010 USA: SPIE-INT SOC Optical Engineering.
<https://doi.org/10.1117/12.357807>
 15. Yang, H., Shin, S., Kumar, S., Seo, D., Oh, S., Lee, M., et al. (2022). A CMOS Image Sensor Based Refractometer without Spectrometry. *Sensors*, 22(3).
<https://doi.org/10.3390/s22031209>
 16. Barrios, C. (2022). Smartphone-Based Refractive Index Optosensing Platform Using a DVD Grating. *Sensors*, 22(3).
<https://doi.org/10.3390/s22030903>
 17. Vlaeva, I., Yovcheva, T., Zdravkov, K., Minchev, G., & Stoykova, E. (2008). Design and testing of four-wavelength laser micro-refractometer. In T. Dreischuh, E. Taskova, E. Borisova, & A. Serafetinides (Ed.), *15th International School On Quantum Electronics: Laser Physics And Applications*. 7027. 1000 20TH ST, PO BOX 10, Bellingham, WA 98227-0010 USA: SPIE-INT SOC Optical Engineering.
<https://doi.org/10.1117/12.822469>
 18. Vynnyk, O. F., Komisova, T. Je., & Kratenko, R. I. (2021). Rozrobka programno-metodychnogho kompleksu SchoolKit. *Electronic Scientific Professional Journal «Open Educational E-Environment of Modern University»*, 11, 32-48.
<https://doi.org/10.28925/2414-0325.2021.113>
 19. Rheims, J., Koser, J., & Wriedt, T. (1997). Refractive-index measurements in the near-IR using an Abbe refractometer. *Measurement Science and Technology*, 8(6), 601-605.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/6/003>

20. Universitat Leipzig (2025). O5e «Index of Refraction of Liquids (Refractometry)». Optics. September 29, 2025.
<http://home.uni-leipzig.de/prakphys/pdf/VersucheIPSP/Optics/O-05e-AUF.pdf>
21. Cen, X., Su, J., Li, G., Wei, W., Bai, X., & Wu, C. (2020). Optimal design of optical refractometer for seawater salinity measurement. In W. Tianran, C. Tianyou, F. Huitao, & Y. Qifeng (Ed.), *Second Target Recognition And Artificial Intelligence Summit Forum*. 11427. 1000 20TH ST, PO BOX 10, Bellingham, WA 98227-0010 USA: SPIE-INT SOC Optical Engineering. <https://doi.org/10.1117/12.2553186>