

УДК 637.073.051

Н. М. ЗАЩЕПКИНА, О. А. НАКОНЕЧНИЙ, Д. В. ЖИЛЯКОВ, М. І. ХАРЧЕНКО

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРНА ПШЕНИЦІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В БЛИЖНІЙ ІНФРАЧЕРВОНІЙ ОБЛАСТІ СПЕКТРУ

Метою роботи є огляд та удосконалення засобів контролю оптичних характеристик зерна пшениці. Об'єкт дослідження – процес визначення оптичних характеристики зерна пшениці. схемні рішення для включення освітлювача та первинного перетворювача для визначення оптичних характеристики зерна пшениці. В процесі роботи було проведено аналіз літературних джерел пов'язаних із оглядом конструктивних особливостей аналізаторів спектру в ближній інфрачервоній області, визначено предмет, об'єкт дослідження, зроблено аналіз існуючих методів та засобів визначення оптичних характеристик зерна пшениці. Практична частина містить розробку та апробацію схемних рішень для забезпечення включення джерела випромінювання та фотодетектора для визначення оптичних характеристик зерна пшениці. Розроблено схему керування масивом світлодіодів джерела освітлення, та визначено її параметри функціонування. Розроблено схему керування фотоприймачем та методику вимірювання показників відзуків первинного перетворювача в аналоговій формі, для визначення оптичних характеристик зерна пшениці.

Ключові слова: БІЧ-аналізатор, вимірювання спектру, монохроматор, первинний перетворювач, світлодіодний масив, джерело освітлення, фотодіодний детектор, фотодіодна лінійка, аналоговий сигнал, градувальна модель.

N. M. ZASHCHEPKINA, O. A. NAKONECHNYJ, D. V. ZHYLJAKOV, M. I. HARCHENKO  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## IMPROVEMENT OF DETERMINATION OPTICAL CHARACTERISTICS WHEAT GRAINS WITH ELECTROMAGNETIC RADIATION IN THE NEAR INFRARED REGION OF THE SPECTRUM

Most of the models of spectrum analyzers working in the near-infrared region contain, as a source of radiation, halogen or nitrate lamps. This allows us to obtain a continuous and linear spectrum of radiation in the range of 0.8-2.5 microns. But, at the same time, such circuit solutions require massive autonomous power supplies, and can be limited to connecting to centralized power networks. The disadvantage of detectors which are using in detecting systems, can be considered an effect on their work temperature, so in most systems with their use, detectors are thermally stabilized. As part of the work, the replacement of the incandescent lamp in the typical scheme of the spectral analyzer "Infrasan-105", which measures the grain reflection spectrum of wheat, for the LED array (Honeywell SEP8705-003) on the basis of the household light-emitting diode lamp Ecola GU10 4200K, and the replacement of the standard photo detector of the device, (photoconductive element of lead selenide (PbSe)) with a monolithic photodiode P101 with a built-in operating amplifier from Texas Instruments. This solution eliminates most of the shortcomings of the incandescent lamps as a source of radiation, and with the correct selection of LEDs according to the energy characteristics and linearity of the spectral curve, it allows to reduce the price of the sample of the spectral luminance registration device, needs lower electricity consumption and has better characteristics of the duration of work.

Key words: spectral analyzer, spectrum measurement, monochromator, primary converter, LED array, light source, photodiode detector, photodiode line, analog signal, calibration model.

### Вступ

Сучасні ринкові умови розвитку сільського господарства вимагають від підприємств, що входять у виробничий цикл переробки зерна, оптимізації процесу приймання і розподілу сировини всередині підприємства, мінімізації можливих витрат, пов'язаних з простим машин і агрегатів, а також прийманням неякісної продукції. Дуже важливим є аспект збереження якості зерна і недопущення його змішування. Для вирішення цих завдань необхідне введення контролю якості всього потоку продукції, що призводить до необхідності багаторазового збільшення кількості проведених аналізів.

Для здійснення такого контролю потрібно визначити кількісний та якісний склад речовин. При використанні класичних трудомістких і тривалих методів аналізу, контроль вхідного потоку зернової сировини на елеваторах і хлібоприймальних підприємствах перетворюється в важко реалізоване завдання [3]. Для цього традиційно використовуються стандартизовані методи, які базуються на проведенні хімічних реакцій, що призводить до руйнування зразка. Операції виконуються вручну, потребують ретельної підготовки проб і потребують великої кількості часу для проведення аналізу. Актуальним є удосконалення експрес-контролю, заснованого на сучасних і швидких методах аналізу [5].

Таким методом, що постійно розвивається, є ближня інфрачервона спектроскопія (БІЧ-спектроскопія). Вимірювальні прилади, робота яких заснована на цьому методі, дозволяють проводити велику кількість аналізів (від декількох десятків до сотень в день) при мінімумі операцій підготовки проб. Спектроскопія у ближній інфрачервоній області (БІЧ-області) являє собою сучасний інструментальний метод кількісного та якісного аналізу різних об'єктів. Область спектру, яка використовується, безпечна як для оператора, так і для об'єкту аналізу, що при відповідному технічному забезпеченні дозволяє досліджувати різні сільськогосподарські продукти без нанесення їм будь-якої шкоди [11].

За кордоном аналізатори, які працюють в ближньому інфрачервоному спектрі (БІЧ-аналізатори) використовуються досить широко, в першу чергу для контролю якості зернових культур. Результати аналізів, отримані на цих приладах, використовуються при операціях первинної прийомки, зберігання та сортування зерна на елеваторах, а також при торгових операціях. У вітчизняних реаліях масштаби впровадження БІЧ-аналізаторів та перетворювачів не відповідають сучасним потребам ринку

сільськогосподарської продукції, і до цього часу значна частина виробників зерна та елеваторів не оснащені такою технікою.

Таким чином, розробка та удосконалення засобів аналізу зернових культур за допомогою БІЧ-спектроскопії є доцільним, актуальним і потребує подальших досліджень.

#### Експериментальна частина

Відомо, що світло має двоїсту природу – хвильову і корпускулярну, і для його опису використовуються характеристики двох видів: хвильові та квантові. Одні фізичні явища, викликані взаємодією світла і матерії, можуть бути описані за допомогою хвильової природи світла, інші – тільки на основі нової теорії. Видиме світло є прикладом електромагнітного випромінювання. Як приклад, можна назвати: рентгенівське, ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання. Всі ці види випромінювання можна реєструвати в вигляді електромагнітних хвиль, що поширюються зі швидкістю світла і відрізняються тільки частотою, і відповідно – довжиною хвиль, тобто спектральними характеристиками [7].

Метою роботи є огляд та удосконалення оптичних методів та засобів контролю якості зерна пшениці із застосуванням електромагнітного випромінювання в ближній інфрачервоній області спектру.

Об'єктом дослідження є процес визначення оптичних характеристики зерна пшениці.

Предмет дослідження – схемні рішення для включення освітлювача та первинного перетворювача для визначення оптичних характеристик зерна пшениці.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено наступні задачі:

- аналіз літературних джерел пов'язаних із оглядом конструктивних особливостей БІЧ-аналізаторів;
- огляд існуючих методів визначення оптичних характеристик зерна пшениці;
- вибір схемних рішень для забезпечення розробки фотодіодного перетворювача та світлодіодного джерела випромінювання;
- розробка конструкції перетворювача для визначення оптичних характеристик зерна пшениці та схеми включення світлодіодного масиву джерела освітлення.

Більшість спектроскопічних методів визначають взаємодію між електромагнітним випромінюванням і матерією. Спектроскопія, за визначенням, займається аналізом характеристичних відгуків атомів, іонів, радикалів і молекул на основі реєстрації і розшифровки їх спектрів, отриманих за допомогою різних вимірювальних методик. Спектроскопічні прилади складаються, як правило, з трьох основних вузлів:

- 1) джерела випромінювання;
- 2) пристрою для спектрального розкладання;
- 3) детектора для вимірювання випромінювання.

Практична спектроскопія розвивається в двох напрямках і ділиться на атомну та молекулярну.

При атомній спектроскопії мова йде про якісне і кількісне визначення елементів в різних речовинах і областях концентрацій. Сюди відносяться, наприклад, методи атомної абсорбції, атомної емісії та рентгенівської флуоресценції. Методи молекулярної спектроскопії на основі ультрафіолетової (УФ), видимої, та інфрачервоної (ІЧ) областей спектру, комбінаційного розсіювання та ядерного магнітного резонансу (ЯМР) дозволяють зробити висновок про зв'язки і структуру молекул. До загального поняття «спектроскопія» відносяться також методи мас-спектрометрії та електронної спектрометрії [9].

За допомогою спектроскопічних методів вдається вирішувати такі завдання:

- 1) знаходити та ідентифікувати сировинні ресурси;
- 2) діагностувати нові вироби та технології;
- 3) проектувати та оптимізувати виробничі процеси;
- 4) забезпечувати необхідну якість вхідної сировини.

За допомогою спектроскопії можна діагностувати як якісні, так і кількісні результати. Але в ідеальному варіанті, речовини при цьому повинні бути абсолютно чистими, бо в разі їх суміші відбувається накладання спектрів поглинання чи відбиття кожного з окремих компонентів. Якщо ми маємо справу з невідомою сумішшю речовин, то, особливо, для молекулярної спектроскопії потрібний попередній поділ цієї суміші на окремі субстанції – наприклад, із застосуванням хроматографії. На відміну від цього, атомна спектроскопія завдяки своїм особливостям має надзвичайно високу селективність, тому при цьому поділ на складові не потрібен, якщо не виникають будь-які перехресні завади [4, 15].

*Якісний аналіз.* Спектр поглинання, тобто графічне відображення перехідних процесів в речовині відповідно до довжини хвилі поглинутого або відбитого світла, дає інформацію щодо кількісного та якісного складу речовини. Різні речовини, описані через формули хімічних сполук, розрізняються своїми структурами – атомною, просторовою та електронною. Тому кожна речовина по-своєму реагує на електронне, коливальне або обертальне збудження, формуючи характерний тільки для неї спектральний відгук. Таким чином, у кожній речовині характеристичний спектр поглинання чи відбиття є індивідуальним, як і відбитки пальців у людини [10].

У разі суміші речовин, отримують сумарний спектр всіх її компонентів. З математичної точки зору тут виникає проблема одного рівняння з  $n$  невідомими (одного спектра з  $n$  речовинами). Якщо області поглинання характеризують складну суміш (накладаються один на одного), то сумарний спектр не дозволяє зробити достовірний висновок про вид і кількість окремих компонентів. У випадку, якщо області поглинання в сумарному спектрі не будуть перекриватися – окремі речовини можуть бути ідентифіковані.

*Кількісний аналіз.* В основі кількісного аналізу лежить закон Ламберта-Бера, тобто визначення

оптичної щільності  $E$  при тій довжині хвилі, при якій досліджувана речовина поглинає світло. Закон Ламберта стверджує, що кількість світла, яке поглинається речовиною, не залежить від інтенсивності джерела випромінювання, а є пропорційною числу поглинаючих молекул. Тому [13]:

$$E = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) = ecd, \quad (1)$$

де  $E$  – характеризує, як оптичну щільність, так і логарифм частки від розподілу інтенсивностей падаючого  $I_0$  і відбитого  $I$  світла (не має розмірності);

$d$  – величина, що показує довжину шляху світла, що пройшло через пробу, тобто товщину шару;

$e$  – стала матеріалу, якщо використовується концентрація  $c$  (в моль/л) при товщині шару  $d$  (см), позначається як молярний коефіцієнт поглинання, або молярний показник поглинання з розмірністю см/млімоль.

Інфрачервоні (ІЧ) промені, які використовуються в БІЧ-спектроскопії, являють собою електромагнітне випромінювання. Однією з основних характеристик електромагнітного випромінювання, як і будь-якого коливального руху, є довжина хвилі, або пов'язана з нею, через швидкість руху хвилі, частота [10].

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (2)$$

де  $\nu$  – частота, Гц;

$c$  – швидкість світла, м/с;

$\lambda$  – довжина хвилі світла, м.

В ближній інфрачервоній спектроскопії зазвичай використовують хвильові числа  $\sigma$ , зворотні довжині хвилі, які вимірюються в  $\text{см}^{-1}$ . Хвильові числа показують, скільки довжин хвиль вкладається в 1 см ( $\sigma \approx 10000/\lambda$ , де  $\lambda$  вимірюється в мкм).

Під спектром розуміють розподіл електромагнітного випромінювання по довжинах хвиль. Розрізняють спектри випромінювання (емісійні) і поглинання (абсорбційні). Сукупність довжин хвиль (частот), що містяться у випромінюванні будь-якої речовини, називається емісійним спектром, а спектр що поглинаються даною речовиною – абсорбційним спектром. Крім двох найбільш поширених типів спектрів існують також характеристичні спектри розсіювання. [1]

Подання випромінювання у вигляді спектра несе в собі вагомий інформацію про хімічний склад речовини, її агрегатний стан, температуру, фізичні і хімічні процеси, що протікають в ній. Ця інформація закодована у вимірювальних параметрах – питомій потужності випромінювання в окремих ділянках спектра, а також в ширині та формі спектральних ліній.

ІЧ-область, зазвичай, розглядають, починаючи з червоного краю видимого спектру, приблизно з  $14000 \text{ см}^{-1}$  (або  $0,7 \text{ мкм}$ ). До БІЧ-області спектра відносять діапазон випромінювання від  $14000$  до  $3600 \text{ см}^{-1}$  (від  $0,7$  до  $2,8 \text{ мкм}$ ). Так звана, фундаментальна область, лежить в межах від  $3600$  до  $300 \text{ см}^{-1}$ . Дальню ІЧ-область вважають від  $300$  до  $20 \text{ см}^{-1}$ , але для аналізу вона практично не використовується [10].

При взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, частина енергії поглинається молекулами, що її утворюють, вільними атомами або іонами в залежності від стану або складу речовини. Методи аналітичної хімії, що аналізують спектри, називаються спектральними методами або спектроскопією. Вони класифікуються як атомні або молекулярні в залежності від того, як взаємодіє із збуджуючим випромінюванням досліджувана речовина: емісійні або абсорбційні відповідно до характеру спектрів.

У спектроскопії у ближній інфрачервоній області, незалежно від того, отримують спектри пропускання або відбиття, діагностують характеристичне випромінювання молекулами речовини, що досліджується. Цей метод можна визначити як молекулярну абсорбційну спектроскопію [2, 8].

Фундаментальні смуги поглинання коливальних спектрів молекул речовин в твердому і рідкому стані знаходяться в середній інфрачервоній області ( $2,5$ - $50 \text{ мкм}$ ). У ближній інфрачервоній області знаходяться обертони і складові частоти, обумовлені зв'язками атома водню з атомами інших хімічних елементів. Частота коливання і, відповідно, довжина хвилі поглинання та відбиття залежать від того, з яким атомом пов'язаний атом водню і в яких структурах знаходиться.

Отримання спектрів в ближній інфрачервоній області значно простіше в технічному відношенні, ніж у середній, що істотно зменшує вартість аналізу. Джерелом випромінювання може бути звичайна лампа розжарювання або світлодіод з відповідним характеристичним спектром. Причому, для БІЧ-діапазону прозорим є не тільки кварц, але і скло, що полегшує завдання виготовлення оптичних деталей і кювет. В БІЧ-області також можна отримувати спектри водних розчинів, суспензій і емульсій, що ускладнено через сильне поглинання води в середній інфрачервоної області. Це істотно полегшує, проведення аналізів не тільки твердих багатокомпонентних речовин (зернових культур), а і алкогольної продукції, молока, йогуртів та ін. У табл. 1 наведені смуги поглинання деяких речовин в БІЧ-області спектру і зазначено характер їх коливань [6, 13].

Процес спектрального аналізу кількісного та якісного складу речовин в БІЧ-області полягає у виконанні простих операцій і, зазвичай, зводиться до заповнення кювети досліджуваним матеріалом, її розміщення у вимірювальній камері приладу та отримання результатів. За короткий проміжок часу спектрометр реєструє спектри, виконуючи серію вимірювань. Пов'язаний з БІЧ-аналізатором комп'ютер проводить перетворення отриманих сигналів та обробляє результати кількох показників одночасно, що є

метою комплексного аналізу. Комп'ютер порівнює отриману спектральну інформацію з даними, що зберігаються в бібліотеці спектрів різних речовин, і визначає відповідність даного зразка при заданому рівні ймовірності, здійснює ідентифікацію або якісний аналіз зразка.

Таблиця 1

## Приклади смуг поглинання речовин в БІЧ-області спектру

Довжина хвилі, нм	Характер коливань	Структура
760	O-H валентний (вал.) третій обертон	H <sub>2</sub> O
874	C-H вал. третій обертон	Бензол
990	O-H вал. третій обертон	Крохмаль
1143	C-H вал. другий обертон	Ароматичні сполуки
1410	O-H вал. перший обертон	R-OH, жир
1940	O-H вал. <sup>+</sup> O-H деформаційний (деф.)	H <sub>2</sub> O
2060	N-H деф. другий обертон або N-H деф. <sup>+</sup> N-H вал.	Білок
2132	N-H вал. <sup>+</sup> C=O вал.	Амінокислоти
2488	C-H вал., <sup>+</sup> C-C вал.	Целюлоза

Методи обробки спектральних даних, як і методи градування інфрачервоних аналізаторів, досить складні і трудомісткі внаслідок характерної для БІЧ-області слабо диференційованої спектральної картини, що являє собою результат взаємного перекриття численних смуг поглинання чи відбиття. Це ускладнює проведення аналізу, тому дана область спектру довго не привертала особливої уваги науковців. В значно більшій мірі вивчена більш довгохвильова частина інфрачервоного діапазону, де лежать фундаментальні частоти коливання молекул. У той же час для практичного аналітичного застосування БІЧ-область має ряд переваг. Перш за все, слід вказати на велику проникаючу здатність випромінювання в цій області. На відміну від фундаментальної, в БІЧ-області практично прозорий кварц і навіть скло, що полегшує проблему виготовлення кювет і деталей оптики. В БІЧ-області можливе проведення вимірювань при значній товщині об'єкту, в той час, як в класичній інфрачервоній спектроскопії для вимірювання коефіцієнтів поглинання використовують тільки дуже тонкі плівки твердого матеріалу [6].

Спектральні прилади для проведення аналізу в ближній інфрачервоній області вельми різноманітні. Як приклад: вимірювальні засоби з фіксованими довжинами хвиль (аналізатори InfraAlyser фірми «Technicon/ Dickey John», Inframatic-9200 фірми «Perten Instruments», InfraAlyser-360 фірми «Bran & Luebbe»); скануючі фільтрові спектрометри (аналізатор GQA фірми «Neotec», аналізатор моделі 4250 фірми «NIRSistems»); прилади з монохроматорами на основі дифракційної решітки (аналізатор Infrapid-61 фірми «LaborMIM», аналізатор моделі 4500 фірми «NIRSistems», аналізатор Infratec-1255 фірми «Tecator», аналізатор InfraAlyser-500 фірми «Technicon», аналізатор OmegaAnalyzer фірми «Bruins Instruments», аналізатор InfraAlyzer Grain фірми «Bran & Luebbe») [14].

У системах детектування аналізаторів в основному застосовуються три типи детекторів: кремнієвий напівпровідниковий (Si), фоторезистивний із сульфиду свинцю (PbS) і фоторезистивний із селеніду свинцю (PbSe), а також широкий спектр фотодіодів та фотодіодних матриць (лінійок) [12].

Найбільш чутливим з них є кремнієвий напівпровідниковий детектор. Він використовується в короткохвильовій інфрачервоній області в приладах, що вимірюють спектри пропускання зразків. Для вимірювання дифузного відбиття частіше використовується детектор із сульфиду свинцю. Недоліком цього детектора можна вважати вплив на його роботу температури та необхідність термостабілізації.

Загальну будову БІЧ-аналізаторів, незалежно від принципу вимірювання і технічних пристроїв, можна представити наступним чином (рис. 1):

Кожен з методів вимірювання спектру накладає свої вимоги до спектрального діапазону та системи детектування, маючи власні переваги та недоліки. Таким чином, важливу роль грає не тільки шлях проходження оптичного випромінювання в системі, але і його енергетичні характеристики, та наявність додаткових викривлень в оптичній системі спричинених аберациями, недостатнім юстируванням оптичних елементів та сторонніми впливами (вібрація, удари, різкі зміни положення приладу в просторі).

Для вимірювання дифузного відбиття найчастіше використовується спектральний діапазон от 0,8 до 2,5 мкм (від 12000 до 4000 см<sup>-1</sup>). Це обумовлено, в першу чергу, тим, що поглинання речовиною інфрачервоного випромінювання збільшується зі збільшенням довжини хвилі.

До переваг цього методу можна віднести більш явну спектральну інформацію, наприклад, смуги білків, жирів, зв'язаної вологи в зернах злакових в цьому діапазоні сильніше виражені, ніж в більш короткохвильовій області. Це дозволяє використовувати фільтрові аналізатори, що діагностують від 4 до 20-30 точок в спектрі.

Використовуючи дане конструктивне рішення, в залежності від поставленої задачі і агрегатного стану зразка, можна вимірювати як спектр пропускання, так і спектр дифузного відбиття, причому як мінімум двома способами (рис. 2) [6].

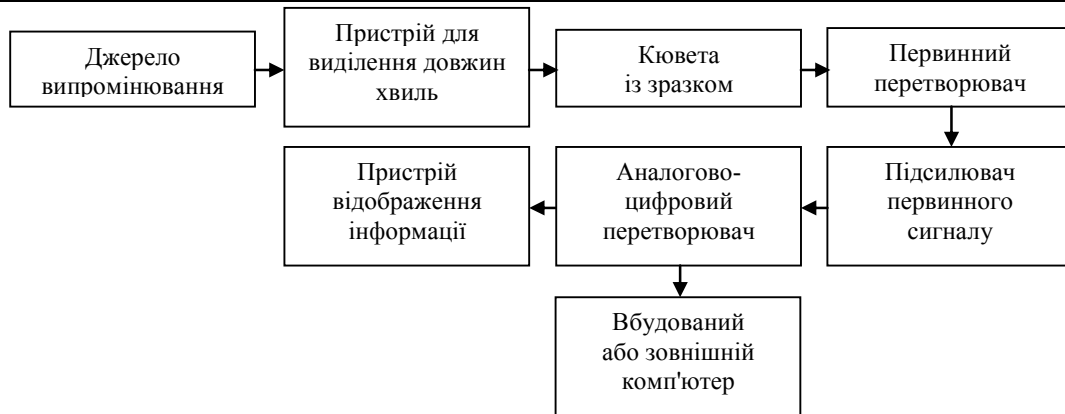


Рис. 1. Загальна схема роботи аналізаторів ближнього ІЧ спектру

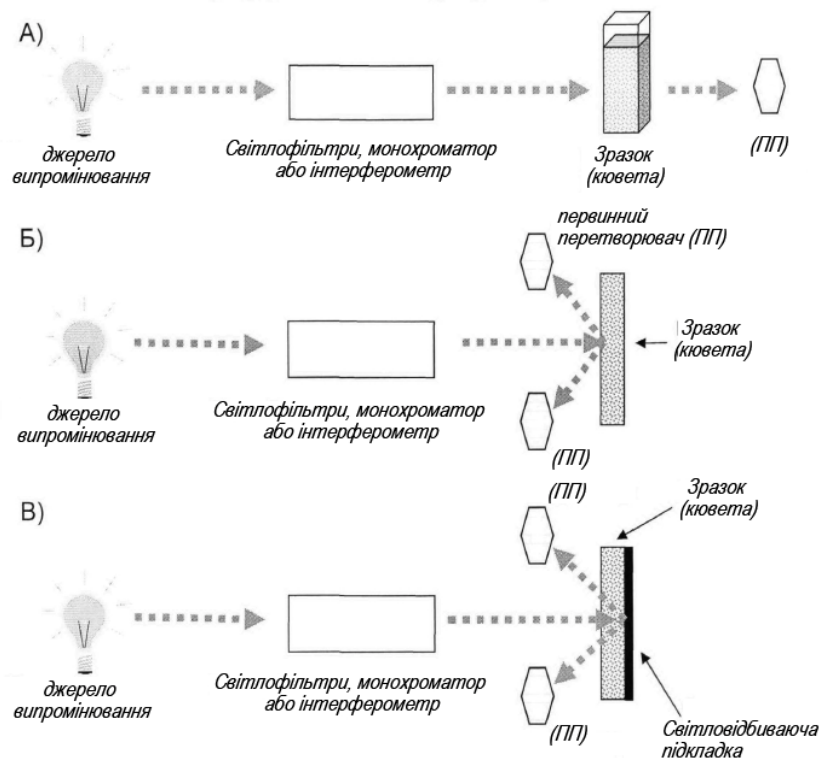


Рис. 2. Основні методи вимірювання зразків: А - пропускання, Б - дифузне відбиття, В - комбінований (дифузне відбиття + пропускання) [6]

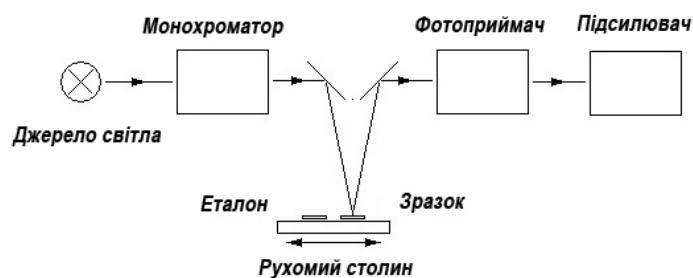


Рис. 3. Блок-схема однопроменевого спектрофотометра з фокусуванням на зразку вузької області спектра після монохроматора і надалі вимірюванням рівня сигналу

В зв'язку з тим, що основою для наших дослідів був макет на базі БІЧ спектрофотометра «Інфраскан-105», який має конструктивну особливість розміщення монохроматора перед досліджуваним зразком, для розробки перетворювача була вибрана схема інтеграції в спектрофотометр, що потребувала мінімальних змін конструкції засобу вимірювань, із збереженням характеристик оптичної системи приладу (рис.3).

Принцип дії аналізатора заснований на вимірюванні відношення двох світлових потоків: потоку, дифузно відбитого досліджуваним зразком, і потоку, дифузно відбитого контрольним зразком (еталоном). Конструктивні особливості приладу показані на рис. 3.

У монохроматичний потік по черзі вводяться досліджуваний та контрольний зразки. Фотоприймач

формує у вимірювальному колі напругу, пропорційну кількості світла, дифузно розсіяного зразком. Вимірювання темного струму фотоприймача здійснюється при відключеному джерелі світла. Коефіцієнт дифузного відбиття досліджуваного зразка  $R$  розраховується за формулою:

$$R = \frac{(U_e - U_\phi)}{(U_3 - U_\phi)}, \quad (3)$$

де  $U_e$  – напруга, пропорційна світловому потоку відбитому еталоном;  
 $U_3$  – напруга, пропорційна світловому потоку відбитому зразком;  
 $U_\phi$  – напруга, пропорційна темному струму фотоприймача.

Вимірні значення коефіцієнта дифузного відбиття визначено за допомогою потенціометра, осцилографа (при безпосередньому вимірі опорних струмів та напруг в ключових точках електричної схеми включення фотоприймача) або у випадку переведення сигналу відгуку в дискретну форму – за допомогою штатного АЦП аналізатору «Інфраскан-105», відображення результатів на індикаторній панелі приладу та подальшого аналізу за допомогою підключення аналізатора до ЕОМ.

Експериментальна установка побудована на базі спектрофотометра «Інфраскан-105», у якому у відсік приймача випромінювання встановлено фотодіодний перетворювач. На лицьову панель спектрофотометра виведені потенціометр, також стрілочний індикатор напруги. Реакція фотодіода реєструється універсальним вимірювальним приладом типу В7-21.

Мета розробки – заміна ксенонової лампи розжарення матрицею світлодіодів (Honeywall SEP8705-003) на базі побутової світлодіодної лампи Ecola GU10 4200K, а також заміна штатного фотодетектора приладу (фоторезистивний елемент із селеніду свинцю (PbSe)) монолітним фотодіодом P101 із вбудованим операційним підсилювачем фірми Texas Instruments. Таке рішення виключає більшість недоліків ламп розжарення у якості джерел випромінювання, та при правильному підборі світлодіодів по енергетичним характеристикам, лінійності спектральної кривої дає змогу здешевити кінцевий зразок засобу реєстрації спектральної яскравості. Дане конструктивне рішення потребує значно менших затрат електроенергії, має кращі характеристики напрацювання на відмову джерела випромінювання, та в меншій мірі виключає можливість фізичного пошкодження випромінювача.

В той же час використання фотодіоду (у подальшому – лінійки фотодіодів) із вбудованим операційним підсилювачем, дозволяє уникнути необхідності використання фотодетекторів (фоторезистивних елементів) із системою охолодження, а також дозволяє реєструвати дуже малу інтенсивність випромінювання.

Так як, фотодіоди являються малоінерційними приймачами випромінювання (їх інерційність не залежить від рівня збудження, тобто від потужності потоку випромінювання), відповідно вони мають низький рівень шуму і високу чутливість, що дозволяє використовувати їх для вимірювання дуже малих потоків випромінювання ( $P_{min} \approx 10^{-12}$  Вт).

Таким чином, основним методом розрахунку коефіцієнта заломлення на даному етапі розробки перетворювача є застосування аналогової електричної схеми включення, із використанням простого трансімпедансного підсилювача та подальшим визначенням різницевої напруги на виході підсилювача фотодіоду.

При виборі джерела випромінювання керуємося наступними положеннями:

- 1) Найважчий у наших дослідженнях макет на базі БІЧ аналізатору «Інфраскан-105» містить стабілізоване джерело живлення в якому наявна лінія змінного струму напругою 220 В та струмом 5 А.
- 2) Відсік для розміщення джерела випромінювання дозволяє провести заміну штатного освітлювача вимірювального засобу (галогенової лампи з відбивачем ІЧ-випромінювання) на освітлювач в габаритних розмірах звичайної лампи розжарювання потужністю 100 Вт.

Таким чином, було вибрано драйвер побутової світлодіодної лампи Ecola GU10 4200K (що має напругу живлення змінного струму  $U = 220$  В, при струмі 28 мА) із заміною штатних світлодіодів у матриці на інфрачервоні світлодіоди Honeywall SEP8705-003 у кількості 15 одиниць.

Використаний в роботі світлодіод Honeywall SEP8705-003 є інфрачервоним світлодіодом із максимумом випромінювання в області 0,88 мкм, та має наступні характеристики:

- Пряма напруга живлення: 1,7 В;
- Зворотня напруга: 3 В при 10 мА;
- Робочий прямий струм: 20 мА;
- Максимальний прямий струм: 20 мА;
- Спектральний максимум: 880 нм;
- Вихідний світловий потік потужністю: 1130 лм/Вт.
- Кут розходження променів:  $15^\circ$
- Максимальна потужність: 70 мВт;
- Робочі температури:  $-40^\circ$ – $(+85^\circ\text{C})$ ;

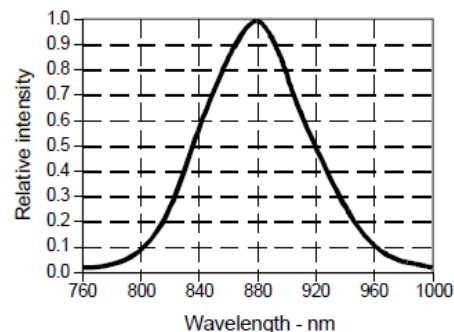


Рис. 4. характеристичний спектр випромінювання світлодіода Honeywall sep8705-003

Контролер керування світлодіодним масивом побудований на мікросхемі BP2831A, і дає на виході 100 В та 60 мА постійної напруги. Контролер зібраний на мініатюрній платі, яка цілком розміщена в цоколі, входи і виходи контролера підключені проводами мінімальної довжини.

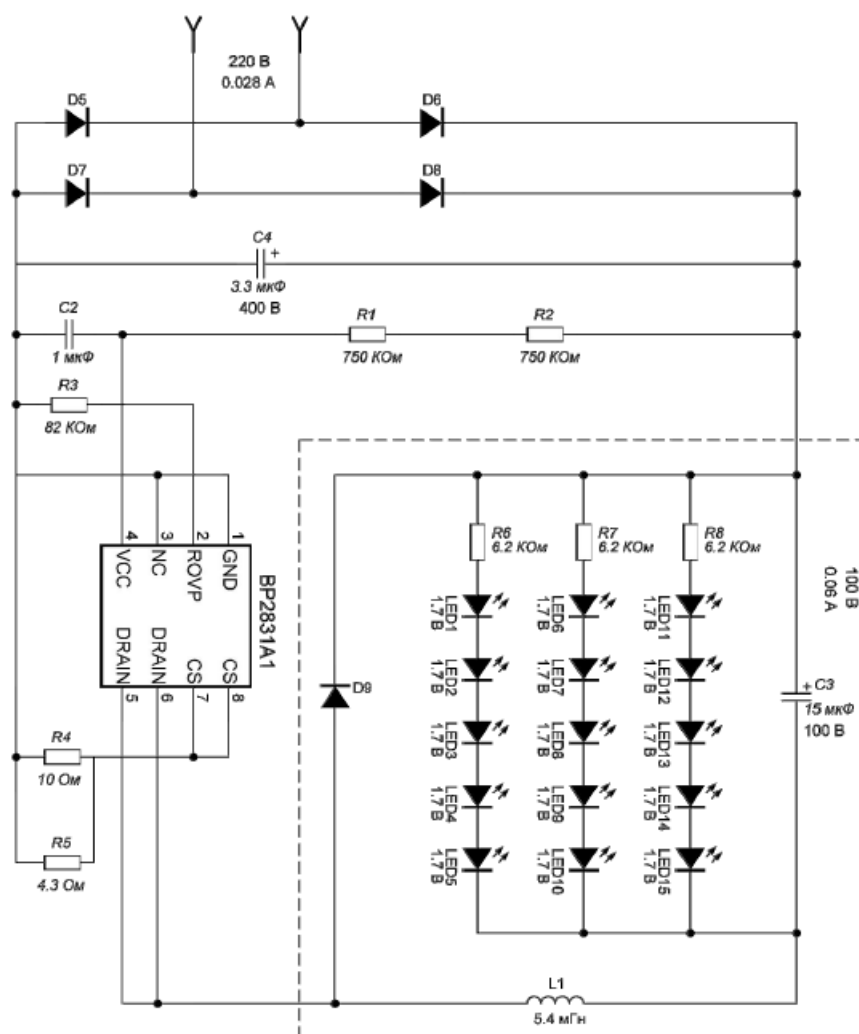


Рис. 5. Схема керування драйвером світлодіодної лампи Ecola GU10 4200K із інфрачервоними світлодіодами Honeywall SEP8705-003

Для підключення масиву світлодіодів до штатного драйвера світлодіодної лампи було використано паралельно-послідовний тип підключення (3 лінії споживають потужність 7,5 Вт, та струмом живлення 20 мА). Так як штатний драйвер світлодіодної лампи Ecola GU10 4200K має на виході напругу постійного струму  $U = 100$  В, при струмі 60 мА, відповідно кожна лінія живлення світлодіодів при паралельному підключенні буде становити 20 мА, що цілком достатньо для послідовного включення вибраних нами світлодіодів послідовно в лінію.

Світлодіоди мають пряму напругу 1,7 В, тому падіння напруги на 5 світлодіодах буде становити  $1,7 \cdot 5 = 8,5$  В. Потрібно скомпенсувати  $100 - 8,5 = 91,5$  В. Для забезпечення роботи світлодіодних лінійок було вибрано однакові обмежувальні опори R6, R7 та R8 із параметрами 6,2 КОм та потужністю 2 Вт із стандартним відхиленням від номіналу  $\pm 5\%$  (E-24).

Враховуючи наявність в макетній установці стабілізованого штатного джерела живлення із постійною напругою на виході  $U = 15$  В і струмом споживання  $I = 500$  мА (для живлення фоторезистивного детектора на основі селеніду свинцю (PbSe)), для зменшення операцій по зміні конструкції електричної схеми приладу було прийнято рішення застосувати монолітний фотодіод із вбудованим підсилювачем OPT101, фірми Texas Instruments. Даний фотодіод має наступні параметри:

Фотодіодний приймач OPT101 є монолітним фотодіодом із трансімідансним підсилювачем на чіпі (рис. 6). Інтегрована комбінація фотодіода і підсилювача на одному чіпі усуває проблеми, що часто зустрічаються в дискретних конструкціях: стрибки струму витoku, високочастотні шуми та дозволяє отримати покращення частотних характеристик внаслідок усунення впливу паразитних ємностей. Вихідна напруга лінійно збільшується з інтенсивністю світла. Підсилювач призначений для роботи з одним або двома джерелами живлення.

В фотодіодному режимі фотодіод працює в режимі фотопровідності, забезпечуючи лінійність характеристик і низьке значення темного струму. OPT101 працює з напругами від 2,7 В до 36 В, його



темновий струм становить всього 120 нА. Температурний діапазон роботи фотодіодного підсилювача становить від 0°C до 70°C.

Напруга живлення: від 2,7 до 36 В;  
 Розмір фотодіоду: 2,29 мм x 2,29 мм;  
 Чутливість: 0,45 мкА/мкВт (650 нм);

Ширина смуги частот: 14 кГц при  $R_F = 1 \text{ M}\Omega$ ;  
 Темновий струм: 120 нА.

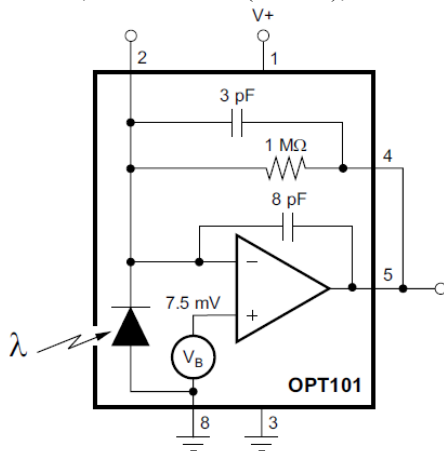


Рис. 6. Принципова схема фотодіоду із встроєним трансімпедантним підсилювачем

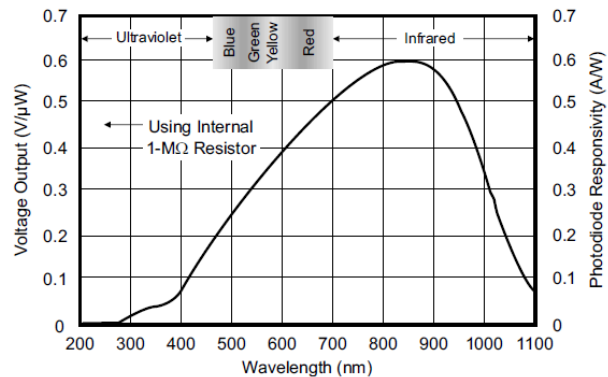


Рис. 7. Спектральна чутливість фотодіоду із встроєним трансімпедантним підсилювачем

Даний фотодіод має широку спектральну чутливість з максимумом близько 0,84 мкм, та спектральний діапазон вимірювань інтенсивності світлового потоку 0,9–1,42 мкм. Діапазон лінійності фотодіоду по спектру становить 0,41–1,08 мкм (рис. 7).

Згідно специфікації фотодіодного підсилювача, даний вимірювальний елемент дозволяє провести вимірювання інтенсивності світлового потоку як по струму так і по напрузі, при внесенні додаткових опорів у вимірювальне коло.

1. Вимірювання сили світлового потоку по струму (рис. 8,а). Таке вимірювання дає більш високу точність вимірювання та незалежність від вихідних навантажень, але при цьому не використовується повністю коефіцієнт підсилення операційного підсилювача. Для проведення вимірювань вносимо в стандартний ланцюг включення фотодіодного підсилювача навантаження  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ , і послідовно включаємо мікроамперметр з низьким опором.

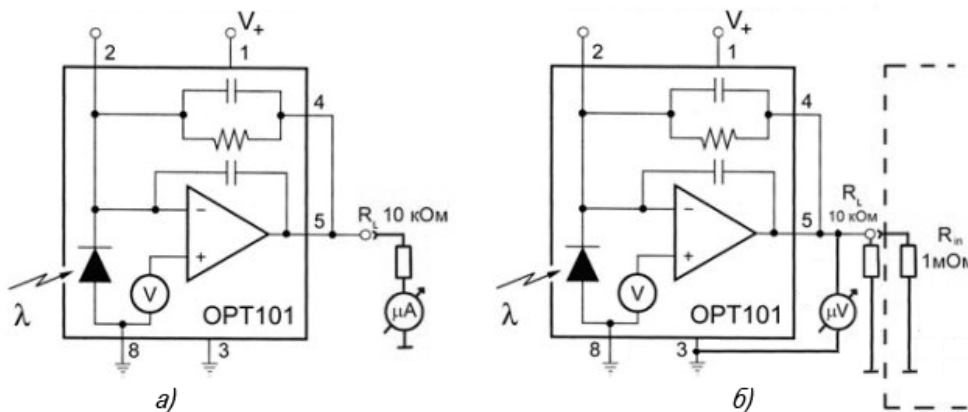


Рис. 8. Вимірювання рівня освітленості фотодіоду: а) за струмом; б) за напругою

2. Вимірювання сили світлового потоку за напругою (рис. 8,б). Так як, у штатному режимі роботи засіб вимірювань («Інфраскан-105»), на основі якого збирався макет експериментальної установки, визначає коефіцієнт дифузного відбиття досліджуваного зразка  $R$  по напрузі то основним режимом вимірювань у наших дослідженнях були вимірювання різницевої напруги на виході операційного підсилювача (див. вираз 3). Реакція фотодіода рееструвалася універсальним вимірювальним приладом типу В7-21.

Вимірювання проводилися на виході операційного підсилювача фотодіодного приймача OPT101 при зрівнянні відгуків сигналів вимірювальної інформації спричинених відбитим світловим потоком почергово від еталону та досліджуваного зразка. Для шунтування виходу операційного підсилювача був використаний резистор  $R_{10}$  номіналом 10 КОм.

Операційний підсилювач видає напругу в межах від 2,7 В (у випадку протікання темного струму) до 8,5 В при роботі світлодіодного масиву. Отриманий діапазон напруг є достатнім для побудови калібрувальних графіків у випадку подальших вимірювань із застосуванням логотричного методу



зрівняння різницевих напруг при використанні двох вимірювальних каналів («еталон» + «зразок») із включенням вимірювальних ланок що містять фотодетектори паралельно. Таке конструктивне рішення, у майбутньому, дозволяє виключити інтегруючу сферу із оптичної схеми макету.

Вимірюючи опорні напруги на виході операційного підсилювача (згідно схем на рис. 8) може виникнути небезпека зменшення точності вимірювання, якщо вхідний опір вольтметра відрізняється від заданого значення опору навантаження ( $R_1 = 10$  кОм). Тоді режим роботи операційного підсилювача зміниться, що призведе до невідповідності з паспортними даними. Наприклад, небезпечно підключати звичайні універсальні тестери – у них може бути сильний розкид вхідних опорів. В такому випадку, для забезпечення паспортної чутливості необхідно зашунтувати вихід операційного підсилювача опором  $R_{in}$  і підключати вольтметри зі свідомо великим вхідним опором (сотні і тисячі кОм).

### Висновки

В результаті аналізу інформації щодо доступності комерційних зразків наявних на ринку БЧ-аналізаторів, можна дійти висновку, що у більшості випадків для контролю якості харчової і сільськогосподарської продукції, використовується техніка, заснована на відбивній спектроскопії. Відповідно і розроблене методичне забезпечення призначене для роботи з аналізаторами, що вимірюють спектр відбиття частіше всього в пробах розмеленого зерна.

Тому доцільним є розробка та вдосконалення перетворювачів та аналізаторів спектру здатних вимірювати спектри пропускання і відбиття цільного зерна, а також їх впровадженням у вітчизняне виробництво та стандартизація технологічних карт призначених для проведення експрес-аналізу.

2. Більшість розглянутих моделей спектрометрів, що працюють в ближній інфрачервоної області містять, у якості джерела випромінювання, галогенні або нітратні лампи. Це дозволяє отримати безперервний та лінійний спектр випромінювання в області 0,8–2,5 мкм. Але, в той же час, такі схемні рішення потребують масивних автономних джерел живлення, та можуть обмежено використовуватися без підключення до централізованих мереж енергоспоживання.

3. В даний час існує велика кількість конструктивних рішень, що використовуються в аналізаторах спектру в ближній інфрачервоної області. У системах детектування аналізаторів в основному застосовуються три типи детекторів: кремнієвий напівпровідниковий (Si), фоторезистивний із сульфиду свинцю (PbS) і фоторезистивний із селеніду свинцю (PbSe) а також широкий спектр фотодіодів та фотодіодних матриць (лінійок). Недоліком таких детекторів можна вважати вплив на їх роботу температури, тому в більшості систем з їх використанням детектори термостабілізуються.

Таким чином, доцільним є удосконалення БЧ аналізаторних пристроїв із можливістю заміни джерела випромінювання та фотоприймача відповідно світло- і фотодіодними компонентами, що мають високу інерційність і дозволяють реєструвати низькі рівні випромінювання.

4. Було проаналізовано заміну лампи розжарення, в типовій схемі аналізатору спектру, що вимірює спектр відбиття зерна пшениці, матрицею світлодіодів (Honeywall SEP8705-003) на базі побутової світлодіодної лампи Ecola GU10 4200K, та заміна штатного фотодетектору приладу, (фоторезистивний елемент із селеніду свинцю (PbSe)) монолітним фотодіодом P101 із вбудованим операційним підсилювачем фірми Texas Instruments. Таке рішення виключає більшість недоліків ламп розжарення у якості джерела випромінювання, та при правильному підборі світлодіодів по енергетичним характеристикам та лінійності спектральної кривої, дає змогу здешевити кінцевий зразок засобу реєстрації спектральної яскравості, потребує значно менших затрат електроенергії та має кращі характеристики тривалості роботи до настання деградації (а у випадку ламп розжарення – до деструкції).

5. Використання фотодіоду (у подальшому – лінійки фотодіодів) із вбудованим операційним підсилювачем, дозволяє уникнути необхідності використання фотодетекторів (на основі фоторезистивних елементів) із системою охолодження, а також реєструвати дуже малу інтенсивність випромінювання.

Таким чином, основним методом розрахунку коефіцієнта заломлення на даному етапі удосконалення вимірювального засобу є застосування аналогової електричної схеми включення випромінювача та фотодетектора з визначенням різницевих напруг на виході підсилювача фотодіоду.

### Література

1. Берет И. Д. Применение метода инфракрасной спектроскопии для определения количества и качества клейковины в зерне пшеницы / И. Д. Берет, В. И. Киянов, А. А. Кремер, Л. Я. Найдис // Применение спектроскопии в ближней инфракрасной области для контроля качества продукции [4-й сборник научных трудов по ИКС] : тезисы докл. – М. : Интеграпротех, 1989. – С. 322–327.
2. Вечкасов М. А. Приборы и методы в ближней инфракрасной области / М. А. Вечкасов, К. А. Кручинин – М. : Химия, 1977. – 280 с.
3. Горин В. М. Приборы для экспресс-контроля и анализа показателей качества технологических процессов на перерабатывающих предприятиях / В. М. Горин, И. Г. Голубев. – М. : ФГПУ «Росинформагротех», 2001. – 104 с.
4. Кеслер Н. Методы инфракрасной спектроскопии в химическом анализе : учебн. [для студ. высш. учебн. зав.] / Н. Кеслер. – М. : Мир, 1984. – 287 с.
5. Крищенко В. П. Контроль качества зерна озимой пшеницы / В. П. Крищенко, Ю. Г. Сазонов, Л. А. Чуйкова // Химия в сельском хозяйстве. – 1987. – № 9. – С. 61–68.
6. Лузанов П. А. Исследование влияния конструктивных особенностей БИК-анализатора зерна на

точность измерений / П. А. Лузанов, К. А. Жаринов // Датчики и системы. – 2006. – № 8. – С. 49–52.

7. Лузанов П. А. Создание градуировочной модели, устойчивой к конструктивным изменениям инфракрасного анализатора / П. А. Лузанов, К. А. Жаринов // Научное приборостроение. – 2006. – Т. 16, № 4. – С. 80–84.

8. Норрис К. Х. Приборы для ближней инфракрасной спектроскопии / К. Х. Норрис // Применение спектроскопии в ближней инфракрасной области для контроля качества продукции [4-й сборник научных трудов по ИКС] : тезисы докл. – М. : Интерагротех, 1989. – С. 5–10.

9. Панкратов Г. Н. Определение состава ржано-пшеничных компонентов в муке с помощью ИК-спектроскопии / Г. Н. Панкратов, И. Д. Береш, В. П. Изосимов // Пищевая промышленность России на пороге XXI века : междунар. науч.-техн. конф. : тезисы докл. – М. : МГАПП, 1996. – С. 38–41.

10. Петрова Е. В. Определение состава ржано-пшеничной муки из зерносмесей методом инфракрасной спектроскопии / Е. В. Петрова, Г. Н. Панкратов // Индустрия продуктов здорового питания – третье тысячелетие (человек, наука, технология, экономика) : междунар. науч.-техн. конф. : тезисы докл. – М. : МГУПП, 1999. – Т. 24. – С. 13–16.

11. Хуршудян С.А. Аналитические приборы. Отечественная продукция / С. А. Хуршудян // Пищевая промышленность. – 2001. – Т. 8. – С. 46–47.

12. Хуршудян С.А. Применение оптических анализаторов в пищевой промышленности / С. А. Хуршудян // Пищевая промышленность. – 2000. – № 11. – С. 76–78.

13. Чулюков О. Г. Экспресс-контроль качества цельного зерна по спектрам пропускания в ближней инфракрасной области : дисс. ... канд. техн. наук : 05.18. / Чулюков Олег Геннадиевич. – М., 2007. – 168 с.

14. Cassells J.A., Reuss R., Osborne B.G. and Wesley I.J. Near infrared spectroscopic studies of changes in stored grain // J. Near Infrared Spectrosc. – 2007. – 15 (3). – P. 161–167.

15. Henry R.J. Calibration and use of a scanning near infrared reflectance spectrophotometer // International Symposium on NIRS. – Melbourne, Australia: Royal Australian Chemical Institute. – 1985. – 12 (2). – P. 93–94.

#### References

1. Beret Y. D. Prymenenye metoda ynfyrakrasnoi spektroskopyy dlia opredeleniya kolychestva y kachestva kleikovyny v zerne pshenytsy / Y. D. Beret, V. Y. Kyianov, A. A. Kremer, L. Ya. Naidys // Prymenenye spektroskopyy v blyzhnei ynfyrakrasnoi oblasti dlia kontrolya kachestva produktsyy [4-y sbornik nauchnykh trudov po YKS] : tezysy dokl. – M. : Ynterahrotekh, 1989. – S. 322–327.

2. Vechkasov M. A. Prybory y metody v blyzhnei ynfyrakrasnoi oblasti / M. A. Vechkasov, K. A. Kruchynyn – M. : Khymyia, 1977. – 280 s.

3. Horyn V. M. Prybory dlia ekspress-kontrolya y analiza pokazatelei kachestva tekhpolycheskykh protsessov na prerabatyvaiushchykh predpriyatiakh / V. M. Horyn, Y. H. Holubev. – M. : FHPU «Rosynformahrotekh», 2001. – 104 s.

4. Kesler N. Metody ynfyrakrasnoi spektroskopyy v khymyicheskoy analize : uchebn. [dlia stud. vyssh. uchebn. zav.] / N. Kesler. – M. : Myr, 1984. – 287 s.

5. Kryshchenko V. P. Kontrol kachestva zerna ozymoi pshenytsy / V. P. Kryshchenko, Yu. H. Sazonov, L. A. Chuikova // Khymyia v selskom khoziaistve. – 1987. – # 9. – S. 61–68.

6. Luzanov P.A. Yssledovanye vlyaniya konstruktivnykh osobennosti BYK-analyzatora zerna na tochnost yzmerenyi / P. A. Luzanov, K. A. Zharynov // Datchyky y systemy. – 2006. – # 8. – S. 49–52.

7. Luzanov P. A. Sozdanye hraduyrovochnoi modely, ustoichyvoi k konstruktivnym yzmeneniyam ynfyrakrasnoho analizatora / P. A. Luzanov, K. A. Zharynov // Nauchnoe pryborostroeye. – 2006. – T. 16, # 4. – S. 80–84.

8. Norrys K. Kh. Prybory dlia blyzhnei ynfyrakrasnoi spektroskopyy / K. Kh. Norrys // Prymenenye spektroskopyy v blyzhnei ynfyrakrasnoi oblasti dlia kontrolya kachestva produktsyy [4-y sbornik nauchnykh trudov po YKS] : tezysy dokl. – M. : Ynterahrotekh, 1989. – S. 5–10.

9. Pankratov H. N. Opredelenye sostava rzhano-pshenychnykh komponentov v muke s pomoshchiu YK-spektroskopyy / H. N. Pankratov, Y. D. Beresh, V. P. Yzosymov // Pysheveiaia promyshlennost Rossyy na porohe XXI veka : mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. : tezysy dokl. – M. : MHAPP, 1996. – S. 38–41.

10. Petrova E. V. Opredelenye sostava rzhano-pshenychnoi muky yz zernosmesei metodom ynfyrakrasnoi spektroskopyy / E. V. Petrova, H. N. Pankratov // Yndustryia produktov zdorovogo pytaniya – trete tysiacheletye (chelovek, nauka, tekhnolohyia, ekonomyka) : mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. : tezysy dokl. – M. : MHUPP, 1999. – T. 24. – S. 13–16.

11. Khurshudian S.A. Analytycheskye prybory. Otechestvennaia produktsyia / S. A. Khurshudian // Pysheveiaia promyshlennost. – 2001. – T. 8. – S. 46–47.

12. Khurshudian S.A. Prymenenye optycheskykh analizatorov v pysheveioi promyshlennosti / S. A. Khurshudian // Pysheveiaia promyshlennost. – 2000. – # 11. – S. 76–78.

13. Chuliukov O. H. Ekspress-kontrol kachestva tselnoho zerna po spektram propuskaniya v blyzhnei ynfyrakrasnoi oblasti : dyss. ... kand. tekhn. nauk : 05.18. / Chuliukov Oleh Henadyevych. – M., 2007. – 168 s.

14. Cassells J.A., Reuss R., Osborne B.G. and Wesley I.J. Near infrared spectroscopic studies of changes in stored grain // J. Near Infrared Spectrosc. – 2007. – 15 (3). – P. 161–167.

15. Henry R.J. Calibration and use of a scanning near infrared reflectance spectrophotometer // International Symposium on NIRS. – Melbourne, Australia: Royal Australian Chemical Institute. – 1985. – 12 (2). – P. 93–94.

Рецензія/Peer review : 10.06.2017 р.

Надрукована/Printed : 02.09.2017 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Здоренко В.Г.