

УДК 004.896

UDC 004.896

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex

**ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ СОРТИРОВКИ ЯБЛОК ПО РАЗМЕРАМ**

**NEAR INFRARED ABSORPTION SPECTROSCOPY USAGE FOR APPLE SIZE SORTING**

Эльчин Барат оглы Искендерзаде  
д-р т.н., профессор, ORCID: 0000-0003-2822-1000  
[isgenderzadeh@rambler.ru](mailto:isgenderzadeh@rambler.ru)

Elchin Barat ogli Iskenderzadeh  
Dr.Sci.Tech., Professor, ORCID: 0000-0003-2822-1000, [isgenderzadeh@rambler.ru](mailto:isgenderzadeh@rambler.ru)

Хумар Сабир гызы Алиева  
к.т.н., доцент, Scopus ID: 59660151500, ORCID: 0009-0002-6657-3445, Web of Science JRX-0775-2023, [a.khumar.1962@gmail.com](mailto:a.khumar.1962@gmail.com)

Khumar Sabir gizi Aliyeva  
Cand.Tech.Sci., Associate Professor, Scopus ID: 59660151500, ORCID: 0009-0002-6657-3445, Web of Science JRX-0775-2023, [a.khumar.1962@gmail.com](mailto:a.khumar.1962@gmail.com)

Камиль Сохраб оглы Гусейнов  
аспирант  
*Национальное Аэрокосмическое Агентство,  
г.Баку, Азербайджанская Республика*

Kamil Sohrab ogli Huseynov  
Postgraduate Student  
*National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan*

Статья посвящена вопросам использования метода ближней инфракрасной абсорбционной спектроскопии для сортировки сельскохозяйственной продукции. Проведено модельное исследование известной конвейерной установки, используемой для сортировки яблочной продукции по размерам. Получена минимально возможная оценка, показывающее суммарный сигнал на выходе спектрометра, используемого в составе установки сортировки. Полученная минимальная оценка может быть использована для оценки или характеристики конкретной партии яблочной продукции при их сравнении с другими товарными партиями яблок

This article examines the use of near-infrared absorption spectroscopy for sorting agricultural produce. A model study of a well-known conveyor system used for sorting apples by size was conducted. A minimum possible estimate was obtained, representing the total signal at the output of the spectrometer used in the sorting system. This minimum estimate can be used to evaluate or characterize a specific batch of apples when compared to other commercial batches of apples

Ключевые слова: АБСОРБЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ, СОРТИРОВКА ПО РАЗМЕРАМ, ЯБЛОЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ, КОНВЕЙЕРНАЯ УСТАНОВКА, ОПТИМИЗАЦИЯ

Keywords: ABSORPTION SPECTROSCOPY, SIZE SORTING, APPLE PRODUCTS, CONVEYOR SYSTEM, OPTIMIZATION

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-214-041>

Хорошо известно, что ближняя инфракрасная (БИК) абсорбционная спектроскопия является эффективным средством для проведения неразрушающей сортировки яблок по размерам [1-4]. БИК абсорбционная спектроскопия часто используется для неразрушающей диагностики цитрусовых, помидоров, груши и другой сельскохозяйственной продукции

<http://ej.kubagro.ru/2025/10/pdf/41.pdf>

[5-8]. Например, в работе [9] этот метод использовался для определения количества сухого вещества в грушевой продукции. В работе [10] этим же методом исследовался такой сельхозпродукт как киви. В этих работах было показано преимущества абсорбционной спектроскопии над отражательной спектроскопией по точности полученных результатов.

В работе [11] изложены результаты экспериментального исследования возможности сортировки яблок типа “Fuji” по размерам. Использовалась экспериментальная конвейерная установка, функциональная схема которой показана на рис. 1.

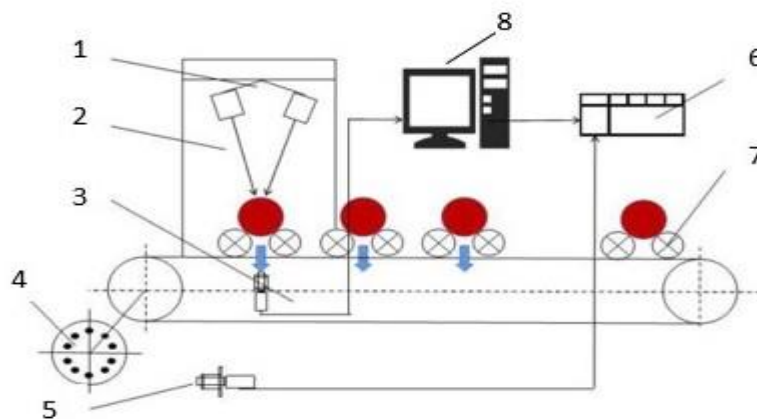


Рис 1. Функциональная схема экспериментальной конвейерной установки для сортировки яблок по размерам с использованием БИК абсорбционной спектроскопии.

1 – источник БИК излучения; 2 – пространство тестирования; 3 – приемное оптоволокно; 4 – счетчики; 5 – чувствительные элементы; 6 – контроллер; 7 – держатель яблок; 8 – спектрометр.

Абсорбционные спектры, полученные от яблок различных размеров показаны на рис. 2.

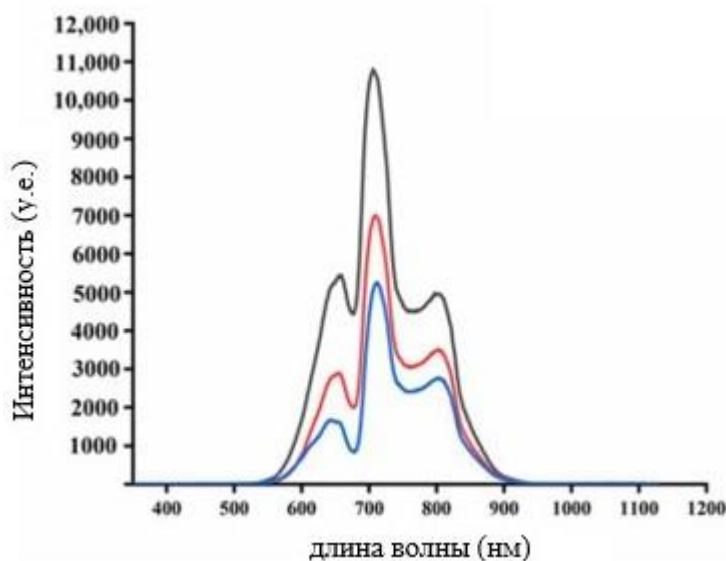


Рис 2. Абсорбционные спектры яблок разных размеров в БИК диапазоне [11].

Цифрами показаны:

- 1 - спектр яблок с диаметрам 65-75 мм;
- 2 - спектр яблок с диаметрам 75-85 мм;
- 3 – спектр яблок с диаметрам 85-95 мм.

Как видно из спектров, представленных на рис. 2, амплитуда этих спектров уменьшается с увеличением диаметра яблок, что вполне закономерно для абсорбционной спектроскопии. Из проведенных спектров также можно увидеть наличие абсорбционных пиков на длинах волн 675, 758 и 830 нм. Согласно [12], пик на длине волны 645 нм образуется по причине цвета и эпидермиса. Согласно [13], минимум на длине волны 675 нм образуется из-за поглощения хлорофилла; согласно [14], минимум на длине волны 758 нм образуется из-за вибрационного механизма поглощения триплета O-H; а минимум на длине волны 830 нм образован вибрационным механизмом ослабления сигнала триплетом N-H [15].

Как отмечается в работе [16] степень ослабления БИК сигнала увеличивается с ростом диаметра яблока по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 \exp[-U \cdot d] \quad (1)$$

где:  $I$  – сигнал (интенсивность света) на входе спектрометра;

$I_0$  – интенсивность излучения БИК источника;

$d$  – диаметр яблока;

$U$  – коэффициент ослабления.

Если принять, что существуют две группы яблок с диаметрами  $d_1$  и  $d_2$ , то можно вычесть коэффициент ослабления. Из выражения (1) находим

$$\ln I = \ln I_0 - U \cdot d \quad (2)$$

для групп яблок с диаметром  $d_1$  имеем

$$\ln I(d_1) = \ln I_0 - U d_1 \quad (3)$$

для яблок с диаметром  $d_2$  имеем

$$\frac{\ln I}{d_2} = \ln I_0 - U d_2 \quad (4)$$

Из (3) и (4) получим

$$-U = \frac{\ln I(d_1) - \ln I(d_2)}{d_1 - d_2} \quad (5)$$

Вместе с тем, каждая партия яблок, подвергнутая сортировке на такой установке, должна иметь единую оценку, характеризующую ее товарные габариты. Очевидно, что более крупные яблоки более привлекательны для большого числа покупателей. Далее, в настоящей статье рассматривается вопрос о формировании средне интегрального показателя габаритов яблочной продукции, прошедшей через сортировочной конвейер, показанный на рис. 1.

#### Материалы и методы

Допустим, что по результатам сортировки получены два множества  $D$  и  $N$ , где

$$D = \{d_i\}; \quad i = 1, n \quad (6)$$

$$N = \{n_i\} \quad (7)$$

При этом  $n_i$  – показатель количества яблок, имеющих диаметр  $d$ .

Множества (6) и (7) считаем упорядоченными, т.е. имеем

$$d_i = d_{i-1} + \Delta d; \quad \Delta d = \text{const} \quad (8)$$

$$d_0 = 0$$

$$n_i = n_{i-1} + \Delta n; \quad \Delta n = \text{const} \quad (9)$$

$$n_0 = 0$$

На основе вышеизложенного можно сформировать дискретный показатель габаритности яблочной продукции

$$\varepsilon_g = \sum_{i=1}^n n_i I_0 \exp(-d_i \cdot U) \quad (10)$$

Как видно из выражения (10) показатель  $\varepsilon_g$  определяет суммарный сигнал, поступающий на вход спектрометра в течение времени сортировки всей партии яблок. В общем случае можно допустить наличие функциональной зависимости

$$d_1 = \varphi(n_i) \quad (11)$$

Показывающей взаимосвязь  $d_1$  и  $n_i$ .

Условно перехода на непрерывную модель, зависимость (11) представим в виде

$$d = \varphi(n) \quad (12)$$

Далее, примем, что функция (12) является нормируемой, т.е. имеет место условия

$$\int_0^{n_{\max}} \varphi(n) = C; \quad C = \text{const} \quad (13)$$

Некоторые варианты функции  $\varphi_n$  удовлетворяющие условию (13) приведены на рис.3.

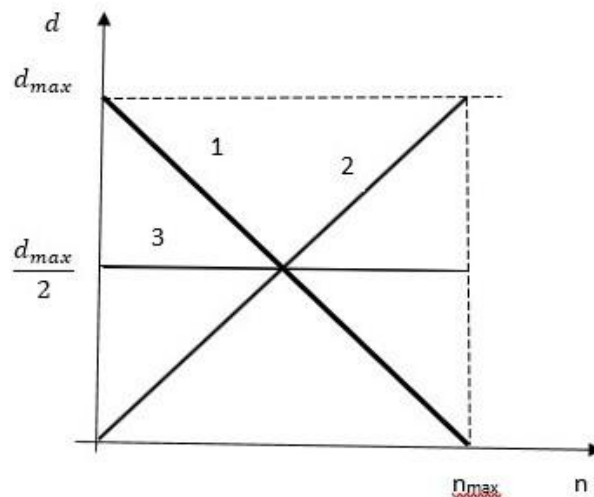


Рис. 3. Некоторые варианты функции (12), удовлетворяющие условию (13).

Цифрами показаны:

1 – функция в виде  $d = d_{max} - kn$  ( $k=const$ )

2 – функция в виде  $d = kn$

3 – функция в виде  $d = \frac{d_{max}}{2}$ .

В общем случае дискретная модель (10) условно может быть представлена в непрерывном виде:

$$\varphi_n = \int_0^{n_{max}} n I_0 \exp[\varphi(n) \cdot U] dn \quad (14)$$

Далее с учетом выражений (13) и (14) можно сформировать следующий целевой функционал  $F$  вариационной оптимизации для вычисления оптимальной функции  $\varphi_n$  при которой  $F$  мог бы достичь экстремума. Имеем:

$$F = \int_0^{n_{max}} n I_0 \exp[-\varphi(n) \cdot U] dn + \lambda \left[ \int_0^{n_{max}} \varphi(n) dn - C \right] \quad (15)$$

где  $\lambda$  – множитель Лагранжа.

Согласно методу Эйлера, функция  $\varphi_n$  при которой  $F$  достигает экстремума удовлетворяет условию:

$$\frac{d\{nI_0 \exp[-\varphi(n) \cdot U] + \lambda \cdot \varphi(n)\}}{d\varphi(n)} = 0 \quad (16)$$

Из условия (16) находим

$$U \cdot n \cdot I_0 \exp[-\varphi(n) \cdot U] + \lambda = 0 \quad (17)$$

Из выражения (17) получаем

$$\exp[-\varphi(n) \cdot U] = -\frac{\lambda}{Un \cdot I_0} \quad (18)$$

Логарифмируя выражение (18), получим

$$\varphi(n) = \frac{1}{U} \ln \frac{U \cdot n \cdot I_0}{\lambda} \quad (19)$$

### Обсуждение

При решении (19) функционал  $F$  достигает минимума, что легко проверить по признаку Лагранжа следующим образом.

Проверка знака следующего выражения

$$Z = \frac{d^2\{nI_0 \exp[-\varphi(n)U] + \lambda\varphi(n)\}}{d\varphi(n)^2} \quad (20)$$

показывает, что показатель  $Z$  всегда является положительной величиной, что согласно признаку Лагранжа, означает достижение функционалом  $F$  минимума при решении (19). Для вычисления величины  $\lambda$  можно воспользоваться выражением (13) и (19), имеем

$$\int_0^{n_{max}} \frac{1}{U} \ln \frac{Un \cdot I_0}{\lambda} dn = C \quad (21)$$

Из (21) имеем

$$\int_0^{n_{max}} \frac{1}{U} \ln U \cdot n I_0 dn - \int_0^{n_{max}} \frac{1}{U} \ln \lambda dn = C \quad (22)$$

Из выражения (12) находим

$$\ln \lambda = \frac{C - \int_0^{n_{max}} \frac{1}{U} \ln(UnI_0) dn}{\int_0^{n_{max}} \frac{dn}{U}} \quad (23)$$

или

$$\lambda = \exp \left[ \frac{C - \int_0^{n_{max}} \frac{1}{U} \ln(UnI_0) dn}{\int_0^{n_{max}} \frac{dn}{U}} \right] \quad (24)$$

С учетом вышеизложенного сформируем обобщенный показатель конвейерной сортировки продукции. С учетом (14) и (19) имеем

$$\varepsilon_0 = \int_0^{n_{max}} nI_0 \cdot U \frac{I_0 dn}{\lambda} = \frac{I_0^2 \cdot n_{max}^2 \cdot U}{2\lambda} \quad (20)$$

Таким образом получена минимально возможная оценка партии яблока, сортируемая на конвейерной установке, показанной на рис. 1.

### Заключение

1. Проведено модельное исследование известной конвейерной установки, используемой для сортировки яблочной продукции по размерам.

2. Получена минимально возможная оценка, показывающее суммарный сигнал на выходе спектрометра, используемого в составе установке сортировки.

3. Полученная минимальная оценка может быть использована для оценки или характеристики партий яблочной продукции при их сравнении.

### **Литература**

1. Zhao J., Kuang L.X., Xu F.X., Su Y., Feng X.Q. Different placement methods of oranges on near red Effect of the variability of the effective acidity model of external NDEs. Chin. J. Food. 2014;14:246–250.
2. Caramês E.T.S., Alamar P.D., Poppi R.J., Pallone J.A.L. Quality control of cashew apple and guava nectar by near infrared spectroscopy. J. Food Compos. Anal. 2017;56:41–46. doi: 10.1016/j.jfca.2016.12.002.
3. Clark C.J., Mcglone A.V., Jordan R.B. Detection of Brownheart in 'Braeburn' apple by transmission NIR spectroscopy. Postharvest Biol. Technol. 2003;28:87–96. doi: 10.1016/S0925-5214(02)00122-9.
4. Gong Y.J., Pei J.Q., Li H.B., Feng Y.L., Ning X.F. Design of Portable Rapid Non-Destructive Testing System for Apple Quality. J. Shenyang Agric. Univ. 2017;48:238–243.
5. McGlone V.A., Martinsen P.J., Clark C.J., Jordan R.B. On-line detection of Brownheart in Braeburn apples using near infrared transmission measurements. Postharvest Biol. Technol. 2005; 37:142–151. doi: 10.1016/j.postharvbio. 2005.04.011.



6. Li L.S., Liu Y.D., Hu J., Song Y., Zhu X.R., Huang M., Zhou X.Q. Application of near-infrared nondestructive testing technology in fruit ripeness discrimination. *J. East China Jiaotong Univ.* 2021;38:95–105.
7. McGlone V.A., Martinsen P.J. Transmission Measurements on Intact Apples Moving at High Speed. *J. Near Infrared Spectrosc.* 2004;12:37–43. doi: 10.1255/jnirs.406.
8. Sun T., Mo X.X., Liu M.H. Effect of fruit peel on the accuracy of visible/near infrared detection of soluble solids in navel oranges. *Spectrosc. Spect. Anal.* 2018;38:1406–1412.
9. Travers S., Bertelsen M.G., Petersen K.K. Predicting pear (cv. Clara Frijs) dry matter and soluble solids content with near infrared spectroscopy. *LWT-Food Sci. Technol.* 2014;59:1107–1113. doi: 10.1016/j.lwt.2014.04.048. - DOI - PubMed
10. Schaare P.N., Fraser D.G. Comparison of reflectance, interactance and transmission modes of visible-near infrared spectroscopy for measuring internal properties of kiwifruit (*Actinidia chinensis*) Postharvest *Biol. Technol.* 2000;20:175–184. doi: 10.1016/S0925-5214(00)00130-7.
11. Xiaogang Jiang, Mingwang Zhu, Jinliang Yao, Yuxiang Zhang, Yande Liu Calibration of Near Infrared Spectroscopy of Apples with Different Fruit Sizes to Improve Soluble Solids Content Model Performance DOI: 10.3390/foods11131923
12. Murray I., Williams P. Near Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries. American Association of Cereal Chemists, Inc.; St. Paul, MN, USA: 1987. pp. 17–34.
13. McDevitt R.M., Gavin A.J., Andrés S. The ability of visible and near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to predict the chemical composition of ground chicken carcasses and to discriminate between carcasses from different enotypes. *J. Near Infrared Spectroscopy.* 2005;13:109–117. doi: 10.1255/jnirs.463.
14. Zhou L.J., Wu H.J., Li T., Wang Z.Y. Determination of fatty acids in broiler breast meat by near-infrared reflectance spectroscopy. *Meat Sci.* 2012;90:658–664. doi: 10.1016/j.meatsci.2011.10.010. - DOI - PubMed
15. Prieto N., Ross D.W., Navajas R.I. Online prediction of fatty acid profiles in crossbred Limousin and Aberdeen Angus beef cattle using near infrared reflectance spectroscopy. *Animal.* 2011;5:155–165. doi: 10.1017/S1751731110001618. - DOI - PubMed
16. Fraser D.G., Kunнемeyer R., McGlone V.A., Jordan R.B. Near infrared (NIR) light penetration into an apple. *Postharvest Biol. Technol.* 2001;22:191–194. doi: 10.1016/S0925-5214(01)00103-X.