

В.Ю. Кучерук, д.т.н., професор

П.І. Кулаков, д.т.н., професор

Д.В. Мостовий, аспірант

А.П. Кулакова, студент

АНАЛІЗ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У ВОДНО-МОЛОЧНОМУ РОЗЧИНІ

Вінницький національний технічний університет, e-mail: vladimir.kucheruk@gmail.com

У статті запропоновано математичну модель та проведено математичне моделювання проходження оптичного випромінювання видимого діапазону крізь водно-молочний розчин. Математична модель створена на основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень спектральних характеристик пропускання водно-молочного розчину. В результаті моделювання отримано залежність вихідної напруги фотоприймача на основі пари фотодіод - операційний підсилювач від відносної масової частки молока у водно-молочному розчині та довжини хвилі оптичного випромінювання у видимому діапазоні.

Ключові слова: водно-молочний розчин, видимий діапазон, оптичне випромінювання, виявлення води у молоці.

Вступ

Стійлові доїльні установки нині займають майже половину світового ринку доїльних установок. Вони використовуються при прив'язному утриманні тварин та забезпечують їх машинне доїння, транспортування молока в молокоприймальну ємність, перекачування молока з молокоприймальної ємності в охолоджувальну або перемішувальну установку [1]. У переважній більшості випадків заробітна плата дояркам нараховується у відповідності з кількістю отриманого ними молока, тому як цей показник характеризує якість їх роботи. Згідно технологічного регламенту роботи доїльної установки, у кожного дояра є ємність з водою, яка необхідна для догляду за тваринами [2, 3]. З метою збільшення показників удою, дояри дуже часто, за допомогою доїльного апарата, всмоктують цю воду в молокопровід. Окрім того, нечесні постачальники з приватних дрібних господарств розбавляють молоко водою та здають його в приймальні пункти. Візуально виявити ці випадки неможливо, тому як відрізнити водно-молочний розчин з невеликим вмістом води від чистого молока людське око не може. Існуючі засоби вимірювання параметрів молока в більшості випадків не дозволяють проводити оперативний контроль наявності води у молоці, окрім того, за їх допомогою в більшості випадків неможливо виявити дояра, який здійснює фальсифікацію. Виходячи з цього, розвиток методів оперативного вимірювання відносної масової частки молока у водно-молочному розчині та створення їх математичних моделей є важливим та актуальним завданням.

Аналіз літературних джерел

У теперішній час для виявлення вмісту води у молоці в лабораторних умовах найчастіше здійснюють вимірювальний контроль температури його замерзання [4]. Таку методику складно застосувати на приймальних пунктах та неможливо використати на стійлових доїльних установках у процесі доїння. У роботі [5] розглянуто лічильник порцій молока для стійлових доїльних установок з сенсором електропровідності, принцип дії якого полягає в наступному. Порція молока проходить крізь сенсор, який являє собою трубку з вмонтованими електродами. Сенсор формує сигнал напруги, що прямо пропорційний значенню електропровідності. При наявності води у молоці електропровідність молока зменшується, але внаслідок наявності піни та відсутності контролю температури, виявити незначне розбавлення молока при використанні такого сенсора практично неможливо. У роботах [5 - 7] розглянуто оптичний метод вимірювання відносної масової частки молока у водно-молочному розчині, який заснований на вимірюванні ступеню зменшення інтенсивності інфрачервоного випромінювання нижнього діапазону при його проходженні крізь розчин. В роботі [6] визначено оптимальну довжину хвилі інфрачервоного випромінювання шляхом визначення максимуму відношення спектральних характеристики пропускання води та молока. Питання проходження оптичного випромінювання видимого діапазону крізь водно-молочний розчин у теперішній час мало досліджені.

Постановка задачі

Для подальшої розробки засобів оперативного вимірювального контролю вмісту води у молоці на стійлових доїльних установках необхідно створити математичну модель проходження оптичного випромінювання видимого діапазону крізь водно-молочний розчин на основі його експериментальних характеристик пропускання. За допомогою отриманої математичної моделі можливе визначення оптимальної довжини хвилі оптичного випромінювання видимого діапазону для вимірювання малих значень відносної масової частки води у водно-молочному розчині. Розробка нових засобів оперативного вимірювального контролю вмісту води у молоці дозволить виявляти факти фальсифікації молока водою доярами та нечесними постачальниками.

Рішення проблеми

Розглянемо теоретичні засади оптичного методу вимірювання відносної масової частки молока у водно-молочному розчині при використанні оптичного випромінювання видимого діапазону. Ослаблення випромінювання розчином визначається законом Бугера-Ламберта-Бера

$$I(\lambda) = I_0 \cdot 10^{-k(\lambda)cd}, \quad (1)$$

де I_0 - інтенсивність випромінювання, яке падає на розчин; $I(\lambda)$ - інтенсивність випромінювання, яке пройшло крізь розчин; d - товщина шару розчину; c - концентрація речовини; λ - довжина хвилі оптичного випромінювання; $k(\lambda)$ - коефіцієнт екстинкції.

Оптична щільність розчину визначається за виразом

$$D(\lambda) = \lg \frac{I_0}{I(\lambda)} = k(\lambda)cd \quad (2)$$

Проходячи через розчин з n компонентів, випромінювання кожним з них поглинається по різному. Результуюче поглинання отримується адитивним накладенням окремих компонентів. Відповідно, оптична щільність n - компонентної суміші визначається за виразом [8]

$$D(\lambda) = \sum_{i=1}^n k_i(\lambda)c_i d \quad (3)$$

де $k_i(\lambda)$ - коефіцієнт екстинкції i - того компоненту суміші; c_i - концентрація i - того компоненту суміші.

Для водно-молочного розчину $n = 2$, відповідно, як слідує з (3), його оптична щільність визначається за виразом

$$D_{VM}(\lambda) = d(k_M(\lambda)c_M + k_V(\lambda)c_V) \quad (4)$$

де $k_M(\lambda)$ - коефіцієнт екстинкції молока; c_M - концентрація молока у водно-молочному розчині; $k_V(\lambda)$ - коефіцієнт екстинкції води; c_V - концентрація води у водно-молочному розчині.

Об'єм водно-молочного розчину, що поглинає випромінювання, визначається виразом

$$V_K = m_M / \rho_M + m_V / \rho_V \quad (5)$$

де m_M - маса молока у водно-молочному розчині; ρ_M - щільність молока; m_V - маса води у водно-молочному розчині; ρ_V - щільність води.

Концентрація води у водно-молочному розчині визначається як [6, 7]

$$c_V = \frac{m_V}{V_K} = \frac{m_V}{m_M / \rho_M + m_V / \rho_V} = m_V \frac{\rho_M \rho_V}{m_M \rho_V + m_V \rho_M} \quad (6)$$

Концентрація молока у водно-молочному розчині [6, 7]

$$c_M = \frac{m_M}{V_K} = \frac{m_M}{m_M / \rho_M + m_V / \rho_V} = m_M \frac{\rho_M \rho_V}{m_M \rho_V + m_V \rho_M} \quad (7)$$

Відносна масова частка молока у водно-молочному розчині визначається як

$$\eta = m_M / (m_M + m_V) \quad (8)$$

З виразу (8) після перетворень отримуємо

$$m_V = m_M (1/\eta - 1) \quad (9)$$

Підставимо (9) в (6) та (7), після перетворень отримуємо вирази, які зв'язують концентрацію молока та води у водно-молочному розчині з відносною масовою часткою молока.

$$c_V = \frac{\rho_M \rho_V (1/\eta - 1)}{\rho_V + \rho_M (1/\eta - 1)} \quad (10)$$

$$c_M = \frac{\rho_M \rho_V}{\rho_V + \rho_M (1/\eta - 1)} \quad (11)$$

Підставимо (10) та (11) до (4), та після перетворень отримуємо залежність оптичної щільності водно-молочного розчину від відносної масової частки молока

$$D_{VM}(\lambda) = \frac{d \rho_M \rho_V (k_M(\lambda) + k_V(\lambda)(1/\eta - 1))}{\rho_V + \rho_M (1/\eta - 1)} \quad (12)$$

З урахуванням виразу (2), після перетворень отримуємо

$$I(\lambda)/I_0 = 10^{-\frac{d\rho_M\rho_V(k_M(\lambda)+k_V(\lambda)(1/\eta-1))}{\rho_V+\rho_M(1/\eta-1)}}. \quad (13)$$

Вираз (13) зв'язує інтенсивність оптичного випромінювання, що проходить крізь водно-молочний розчин, з відносною масовою часткою молока у розчині.

На рис. 1 наведено отримані за допомогою спектрофотометра СФ-4 експериментальні спектральні характеристики пропускання водно-молочного розчину, які являють собою залежності параметра $I(\lambda)/I_0$ при різних значеннях η від довжини хвилі оптичного випромінювання у видимому діапазоні при $d = 10$ мм.

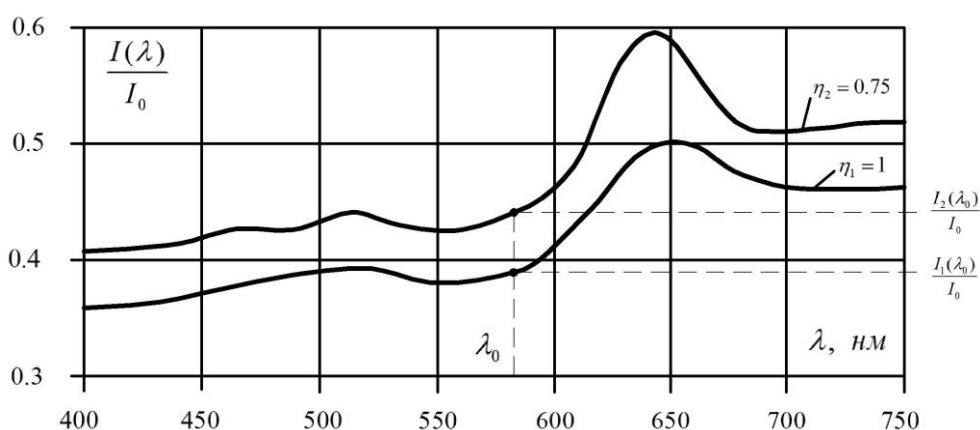


Рисунок 1 - Експериментальні залежності спектральних характеристик пропускання водно-молочного розчину у видимому діапазоні при різних значеннях η .

Як слідує з рис.1, значення спектральних характеристик пропускання значно змінюються в залежності від довжини хвилі. При довжині хвилі приблизно 640 нм спостерігається певний резонанс, який зумовлений дифракцією та інтерференцією оптичних хвиль у проміжках між шариками жиру та сильно впливає на значення коефіцієнтів екстинкції.

Розглянемо систему двох рівнянь, які визначають параметр $I(\lambda)/I_0$ при певній довжині хвилі λ_0 та двох значеннях відносної масової частки молока у водно-молочному розчині $\eta_1 = 1$ та $\eta_2 = 0.75$ (див. рис. 1)

$$\begin{cases} I_1(\lambda_0)/I_0 = 10^{-\frac{d\rho_M\rho_V(k_M(\lambda_0)+k_V(\lambda_0)(1/\eta_1-1))}{\rho_V+\rho_M(1/\eta_1-1)}}, \\ I_2(\lambda_0)/I_0 = 10^{-\frac{d\rho_M\rho_V(k_M(\lambda_0)+k_V(\lambda_0)(1/\eta_2-1))}{\rho_V+\rho_M(1/\eta_2-1)}}. \end{cases} \quad (14)$$

Вирішимо цю систему рівнянь відносно невідомих значень коефіцієнтів екстинкції води та молока, які є функціями довжини хвилі оптичного випромінювання. Після перетворень першого виразу системи (14) отримуємо вираз, який зв'язує коефіцієнт екстинкції молока з коефіцієнтом екстинкції води при довжині хвилі оптичного випромінювання λ_0 .

$$k_M(\lambda_0) = -\frac{(\rho_V + \rho_M(1/\eta_1 - 1)) \lg \frac{I_1(\lambda_0)}{I_0}}{d\rho_M\rho_V} - k_V(\lambda_0)(1/\eta_1 - 1). \quad (15)$$

Аналогічний вираз отримуємо після перетворень другого виразу системи рівнянь (14)

$$k_M(\lambda_0) = -\frac{(\rho_V + \rho_M(1/\eta_2 - 1)) \lg \frac{I_2(\lambda_0)}{I_0}}{d\rho_M\rho_V} - k_V(\lambda_0)(1/\eta_2 - 1). \quad (16)$$

Прирівнявши праві частини виразів (15) та (16) і вирішивши отримане рівняння відносно $k_V(\lambda_0)$, отримуємо вираз для коефіцієнта екстинкції води

$$k_V(\lambda_0) = \frac{(\rho_V + \rho_M(1/\eta_1 - 1)) \lg \frac{I_1(\lambda_0)}{I_0} - (\rho_V + \rho_M(1/\eta_2 - 1)) \lg \frac{I_2(\lambda_0)}{I_0}}{d\rho_M\rho_V(1/\eta_2 - 1/\eta_1)}. \quad (17)$$

Підставивши (17) до (15) отримуємо вираз для коефіцієнта екстинкції молока

$$k_M(\lambda_0) = -\frac{(\rho_V + \rho_M(1/\eta_1 - 1)) \lg \frac{I_1(\lambda_0)}{I_0}}{d\rho_M\rho_V} - \frac{(\rho_V + \rho_M(1/\eta_1 - 1)) \lg \frac{I_1(\lambda_0)}{I_0} - (\rho_V + \rho_M(1/\eta_2 - 1)) \lg \frac{I_2(\lambda_0)}{I_0}}{d\rho_M\rho_V(1/\eta_2 - 1/\eta_1)}(1/\eta_1 - 1). \quad (18)$$

За допомогою виразів (18), (17) та експериментальних залежностей на рис. 1 можливо визначити коефіцієнти екстинкції води та сирого молока у водно-молочному розчині для будь-якого значення довжини хвилі оптичного випромінювання у видимому діапазоні.

Для вимірювання інтенсивності оптичного випромінювання широко використовуються лінійні фотоприймачі на основі пари фотодіод-операційний підсилювач. У відповідності з [6, 7], залежність вихідної напруги фотоприймача на основі пари фотодіод – операційний підсилювач від відносної масової частки молока у водно-молочному розчині визначається виразом

$$U_F(\eta) = I_0 \cdot S_{I_0}(\lambda) \cdot R \cdot S \cdot 10^{-\frac{d\rho_M\rho_V(k_M(\lambda) + k_V(\lambda)(1/\eta - 1))}{\rho_V + \rho_M(1/\eta - 1)}}, \quad (19)$$

де $S_{I_0}(\lambda)$ - інтегральна струмова чутливість фотодіоду; S - площа фоточутливого шару фотодіоду, що освітлюється; R - опір в колі зворотного зв'язку операційного підсилювача.

Як слідує з виразу (19), вихідна напруга фотоприймача на основі пари фотодіод - операційний підсилювач прямо пропорційна інтенсивності оптичного випромінювання видимого діапазону, яке пройшло крізь водно-молочний розчин. Провівши вимірювання інтенсивності світлового випромінювання, яке пройшло крізь водно-молочний розчин, можливо визначити відносну масову частку молока у розчині за виразом [6, 7]

$$\eta = \frac{\rho_M \lg \frac{U_F(\eta)}{I_0 \cdot S_{I_0}(\lambda) \cdot R \cdot S} + d\rho_M\rho_V k_V(\lambda)}{(\rho_M - \rho_V) \lg \frac{U_F(\eta)}{I_0 \cdot S_{I_0}(\lambda) \cdot R \cdot S} + d\rho_M\rho_V (k_V(\lambda) - k_M(\lambda))}. \quad (20)$$

Проведемо математичне моделювання проходження оптичного випромінювання видимого діапазону крізь водно-молочний розчин. Для цього проведемо інтерполяцію звичайними кубічними сплайнами експериментальних спектральних характеристик пропускання, які наведено на рис. 1, тобто представимо їх у вигляді [9]

$$\frac{I_1(\lambda)}{I_0} = \begin{cases} a_{1M} + b_{1M}(\lambda - \lambda_1) + c_{1M}(\lambda - \lambda_1)^2 + d_{1M}(\lambda - \lambda_1)^3, \lambda \in [\lambda_1, \lambda_2]; \\ a_{2M} + b_{2M}(\lambda - \lambda_2) + c_{2M}(\lambda - \lambda_2)^2 + d_{2M}(\lambda - \lambda_2)^3, \lambda \in [\lambda_2, \lambda_3]; \\ \dots \\ a_{N-1M} + b_{N-1M}(\lambda - \lambda_{N-1}) + c_{N-1M}(\lambda - \lambda_{N-1})^2 + d_{N-1M}(\lambda - \lambda_{N-1})^3, \lambda \in [\lambda_{N-1}, \lambda_N], \end{cases} \quad (21)$$

$$\frac{I_2(\lambda)}{I_0} = \begin{cases} a_{1V} + b_{1V}(\lambda - \lambda_1) + c_{1V}(\lambda - \lambda_1)^2 + d_{1V}(\lambda - \lambda_1)^3, \lambda \in [\lambda_1, \lambda_2]; \\ a_{2V} + b_{2V}(\lambda - \lambda_2) + c_{2V}(\lambda - \lambda_2)^2 + d_{2V}(\lambda - \lambda_2)^3, \lambda \in [\lambda_2, \lambda_3]; \\ \dots \\ a_{N-1V} + b_{N-1V}(\lambda - \lambda_{N-1}) + c_{N-1V}(\lambda - \lambda_{N-1})^2 + d_{N-1V}(\lambda - \lambda_{N-1})^3, \lambda \in [\lambda_{N-1}, \lambda_N], \end{cases} \quad (22)$$

де $a_{iM}, b_{iM}, c_{iM}, d_{iM}$ - коефіцієнти інтерполюючих кубічних сплайнів експериментальної спектральної характеристики пропускання $I_1(\lambda)/I_0$; $a_{iV}, b_{iV}, c_{iV}, d_{iV}$ - коефіцієнти інтерполюючих кубічних сплайнів експериментальної спектральної характеристики пропускання $I_2(\lambda)/I_0$; $\lambda_1 \dots \lambda_N$ - абсциси вузлів інтерполюючої сплайн-функції.

Сукупність виразів (17) - (22) являють собою математичну модель проходження оптичного випромінювання видимого діапазону крізь водно-молочний розчин. Для математичного моделювання було використано пакет математичних програм Maple 9 [10]. Отримана в результаті математичного моделювання залежність вихідної напруги фотоприймача на основі пари фотодіод - операційний підсилювач від відносної масової частки молока у водно-молочному розчині та довжини хвилі оптичного випромінювання у видимому діапазоні наведена на рис. 2.

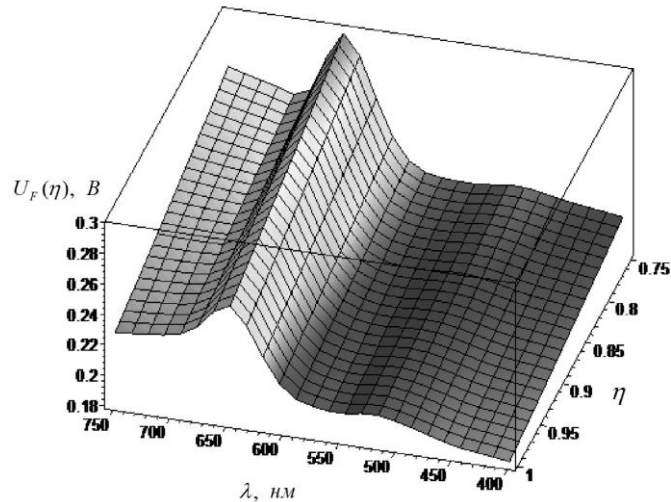


Рисунок 2 – Залежність вихідної напруги фотоприймача на основі пари фотодіод - операційний підсилювач від відносної масової частки молока у водно-молочному розчині та довжини хвилі оптичного випромінювання у видимому діапазоні.

Моделювання було проведено у видимому діапазоні оптичного випромінювання для довжин хвиль від 400 нм до 750 нм та діапазоні відносної масової частки молока у водно-молочному розчині від 0.75 до 1. При проведенні моделювання було припущено, що інтегральна чутливість фотодіоду є постійною в усьому діапазоні довжин хвиль. Вибір діапазону відносної масової частки молока у водно-молочному розчині зумовлений тим, що за спостереженнями авторів, при $\eta < 0.75$ людське око починає відрізняти водно-молочний розчин від чистого молока. Як слідує з рис. 2,

існує оптимальне значення довжини хвилі, при якому чутливість вимірювального каналу відносної масової частки молока у водно-молочному розчині буде максимальною.

Висновки

Запропоновано математичну модель та проведено математичне моделювання проходження оптичного випромінювання видимого діапазону крізь водно-молочний розчин. Математична модель створена на основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень спектральних характеристик пропускання водно-молочного розчину. В результаті моделювання отримано залежність вихідної напруги фотоприймача на основі пари фотодіод - операційний підсилювач від відносної масової частки молока у водно-молочному розчині та довжини хвилі оптичного випромінювання у видимому діапазоні. Перспективним є використання запропонованої математичної моделі для створення засобів вимірювання відносної масової частки молока у водно-молочному розчині для виявлення фактів фальсифікації молока на стійлових доїльних установках та у приймальних пунктах.

Список літератури

1. Фененко, А. І. Механізація доїння корів. Теорія і практика. / А. І. Фененко –К. : ННЦ «ІАЕ», 2008. – 198 с.
2. Доїльна установка УДМ-200 / Технічний опис і інструкція з експлуатації. – Брацлав. – 2002. – 165 с.
3. Цой, Ю. А. Процессы и оборудование доильно-молочных отделений животноводческих ферм / Ю. А. Цой. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2010. – 424 с.
4. Тёпел, А. Химия и физика молока / А. Тёпел. – М. : Пищевая промышленность, 1979. – 623 с.
5. Кулаков П. І. Елементи теорії вимірювального контролю параметрів біотехнічної системи доїння / П. І. Кулаков. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 220 с.
6. Kucheruk, V. Measuring of the relative milk mass fraction in water-milk Solution // V. Kucheruk, P. Kulakov, E. Palamarchuk, N. Storozhuk, W. Wojcik, M. Zhassandykyzy // Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 93 NR 3/2017, p. 83 – 87, doi:10.15199/48.2017.03.20
7. Kucheruk, V. Measurement of the Number Servings of Milk and Control of Water Content in Milk on Stall Milking Machines / V. Kucheruk, P. Kulakov, N. Storozhuk // Proceedings of the International Conference SCIT 2016, May 20-21, 2016, Warsaw, Poland. Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. Part V, Volume 543 of the series Advances in Intelligent Systems and Computing, pp 435-447. – 01 December 2016. – DOI: 10.1007/978-3-319-48923-0_46
8. Авраменко, В. Н. Инфракрасные спектры пищевых продуктов / В. Н. Авраменко, М. П. Есельсон, А. А. Заика. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 173 с.
9. Завьялов, Ю. С. Методы сплайн-функций / Ю. С. Завьялов, Б. И. Квасов, В. Л. Мирошниченко. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
10. Official company website Maple – Software developer Maple 9. – [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.maplesoft.com> (Serial Number IS: 917995808). (Eng).