

## ВИСОКОЧАСТОТНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ЗЕРНА

Куцевол О.М., Поджаренко В.О.

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

кафедра метрології та промислової автоматики

E-mail: mrmarkus2004@mail.ru

**Abstract**

*Kutsevol O. N., Podzharenko V. O. Radio-frequency methods of humidity measurement of the wheat grain. The radio-frequency methods of humidity measurement of capillary - osculiferous stuffs are described, the grain of the wheat concerns also to which one, which one will use new information parameters.*

**Загальна постановка проблеми.** Вологість зерна є однією з основних його якісних характеристик, яка впливає не тільки на якість продуктів, а й на техніко-економічні показники сільсько-господарських виробників та підприємств переробної галузі. Складнощі побудови високочастотних емнісних вологомірів полягає в тому, що волога в капілярно-пористих матеріалах, до яких відноситься і зерно, знаходиться як в вільному, так і в зв'язаному стані [4, 9]. Електричні властивості вільної і зв'язаної вологи різко відрізняються. На практиці більше уваги приділяють вимірюванням вільної вологи, адже саме вона визначає більшість якісних параметрів як готової продукції, так і напівфабрикатів чи сировини.

**Постановка задач дослідження.** Для експресного вимірювання вологості капілярно-пористих речовин, зокрема зерна, необхідно знайти нові інформативні параметри та методи дослідження вологості, незалежні від основних дестабілізуючих факторів.

**Розв'язання задачі та результати дослідження.**

**1. Радіочастотний метод вимірювання вологості капілярно-пористих матеріалів зі значними втратами.** Вимірювана вологість в загальному вигляді є функцією багатьох змінних.

$$W_B = \phi \cdot (A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, \dots), \quad (1)$$

де:  $A_1$  – вологість досліджуваного матеріалу;

$A_2$  – гранулометричний склад сипких матеріалів;

$A_3$  – температура;

$A_4$  – хімічний склад;

$A_5$  – коефіцієнт заповнення первинного перетворювача (ПП).

З виразу (1) очевидно, що зусилля розробників вологомірів мають бути спрямовані на нейтралізацію заважаючих факторів  $A_2, A_3, A_4, A_5$ .

Високочастотний контроль вологості зазначеним методом передбачає дію на контрольований матеріал, що знаходиться в емнісному ПП, джерелом змінного струму з ЕРС

$$e(t) = E_m \cdot \cos(\omega \cdot t).$$

Еквівалентна схема досліджуваного матеріалу в більшості випадків [11, 12] подається в вигляді найпростішого еквівалентного двополосника з паралельним з'єднанням опору втрат  $R_M$  і ємності  $C_M$  (рис. 1, а). Під дією ЕРС джерела в матеріалі виникає змінний струм.

$$i(t) = I_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi), \quad (2)$$

де:  $I_m$  – амплітуда струму;

$\phi$  – фазовий зсув між напругою  $u(t)$  і струмом  $i(t)$ .

В матеріалі струм  $i(t)$  умовно розподіляється, утворюючи активну складову  $i_R(t)$  і

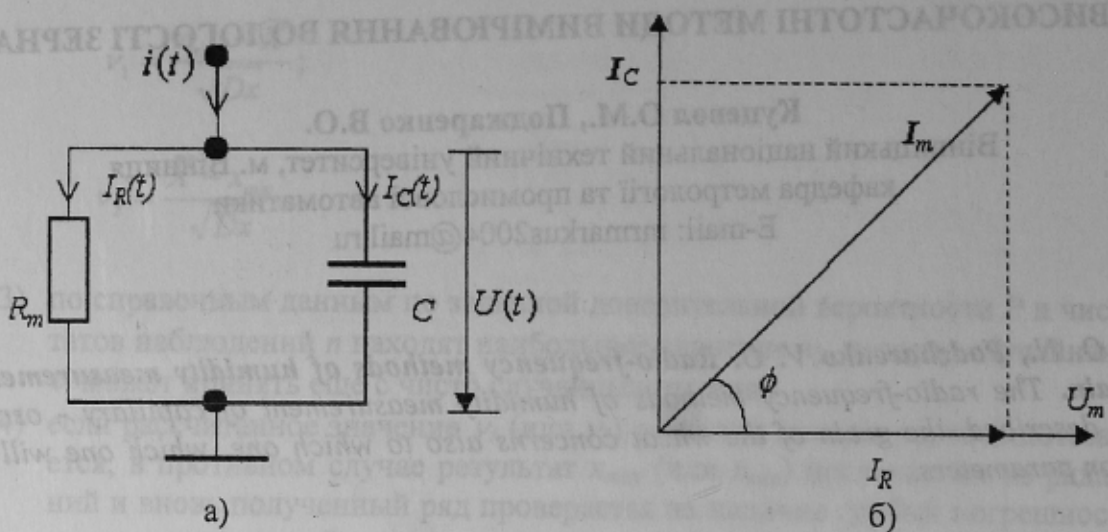


Рис. 1. Еквівалентна схема та суміщена векторна діаграма первинного перетворювача з матеріалом.

реактивну складову  $i_C(t)$ . Векторна діаграма струмів в досліджуваному матеріалі показана на рис.1,б. Опір втрат  $R_M$  є сумою діелектричних втрат і втрат провідності. Цей параметр залежить від вологості і міг би бути інформативним, якби в значній мірі не залежав від температури. Ємність  $C_K$  - сума ємностей, обумовлених поляризаційними ефектами. Цей параметр має незначну температурну залежність і може бути інформативним, оскільки має залежність від вологості.

З діаграмами (рис.1, б) видно, що

$$I_C = I_m \cdot \sin \phi. \tag{3}$$

Схема вимірювального перетворювача (ВП) показана на рис.2,а, і складається з дже-рела гармонічної ЕРС, зразкової ємності і ємності

$$C = C_M + C_0,$$

де:  $C_0$  – ємність незаповненого давача;

$C_M$  – ємність матеріалу.

Ємність  $C_0$  і  $C_M$  з'єднані паралельно.

Знаходимо  $I_m$ :

$$I_m = \frac{U_{3m}}{X_{C3}} = \omega \cdot C_3 \cdot U_{3m}. \tag{4}$$

З діаграми перетворювача (рис.2, б) знаходимо  $\phi$

$$\phi = \frac{\pi}{2} - |\phi|. \tag{5}$$

Підставляємо (4) і (5) в (3) і одержуємо [2, 7]:

$$I_m = \omega \cdot C_3 \cdot U_{3m} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - |\phi|\right) = \omega \cdot C_3 \cdot U_{3m} \cdot \cos(\phi). \tag{6}$$

Частотні графіки струму  $I_C$  для двох різних вологостей капілярно-пористого матеріалу (зерна пшениці) показані на рис.3,а, а на рис.3, б – для однієї вологості і різних пористостей [13].

Аналізуючи ці залежності, приходимо до висновку, що кут нахилу функції  $I_C = \phi(f)$  в певній смузі частот залежить від вологості і не залежить від пористості, оскільки з рис.3, б видно, що

$$I_{C11} - I_{C12} = I_{C21} - I_{C22}.$$

Таким чином, вимірюючи напругу на зразковій ємності, та  $U_3$  і  $\phi$  на двох частотах  $f_1$  та  $f_2$ , за виразом (3) знаходимо  $I_C$ , та визначаємо кут  $\alpha$ , який однозначно залежить від вологості матеріалу  $A_1$  і не залежить від заважаючих факторів  $A_2, A_3, A_4, A_5$ .

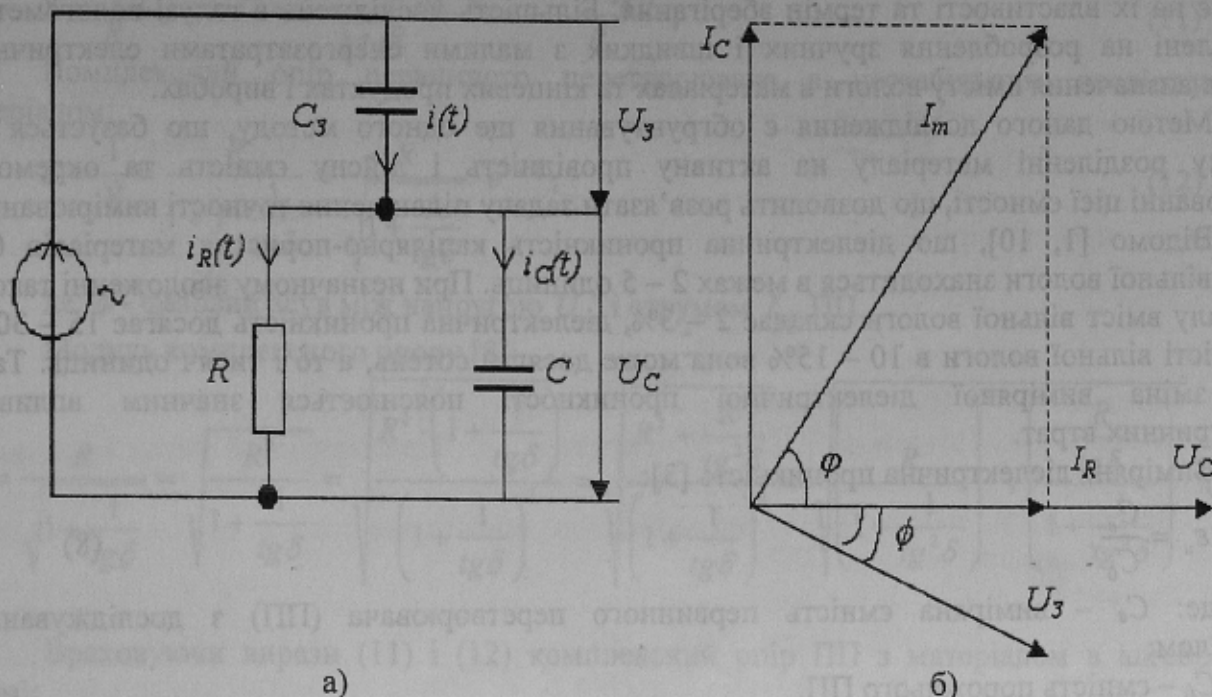


Рис. 2. Еквівалентна схема та векторна діаграма первинного перетворювача.

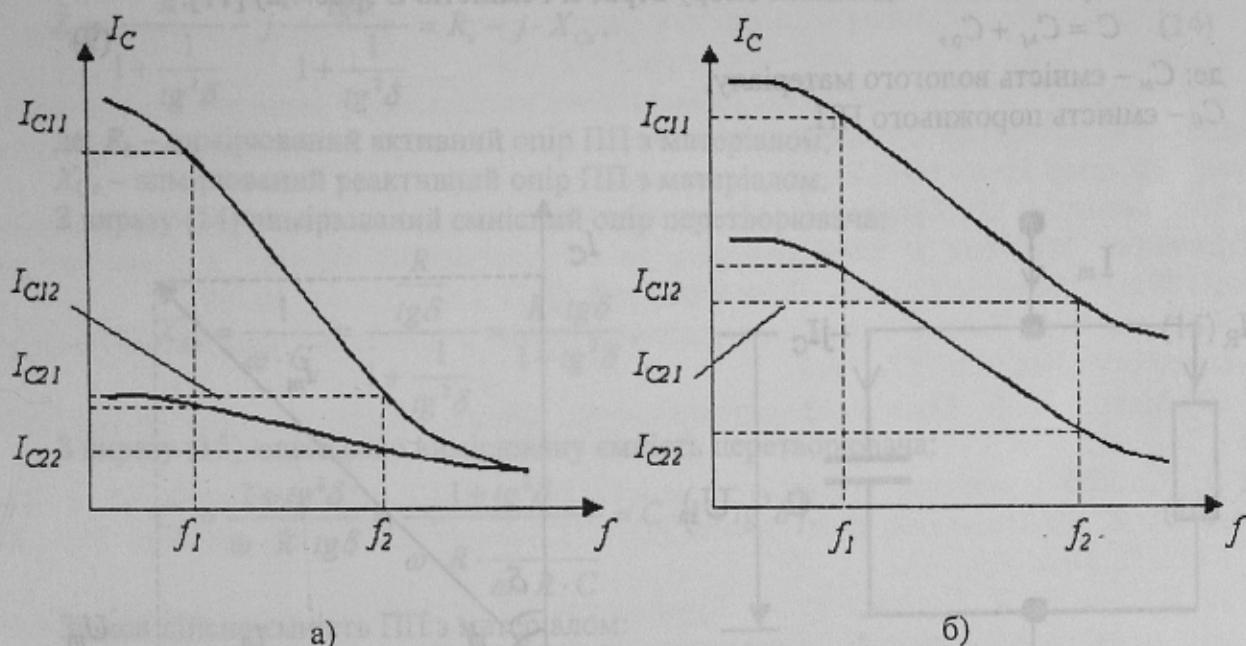


Рис. 3. Частотні залежності діелектричних характеристик зерна.

Шляхом багатофакторного експерименту знаходимо формулу:

$$W(\alpha) = 11,6 + 0,235 \cdot \arctag \left( m \cdot \frac{I_{C1} - I_{C2}}{f_1 - f_2} \right), \quad (7)$$

де:  $m$  – масштабний коефіцієнт;

$I_{C1}$  – значення ємнісної складової струму ПП на частоті  $f_1$ ;

$I_{C2}$  – значення ємнісної складової струму ПП на частоті  $f_2$ .

Вираз (7) є основою побудови вологоміра капілярно-пористих матеріалів зі значними втратами і нестабільним гранулометричним складом (або пористістю).

**2. Метод визначення дійсної ємності сильно зволжених капілярно-пористих матеріалів.** Великий вміст води в капілярно-пористих органічних матеріалах суттєво впливає на їх властивості та термін зберігання. Більшість досліджень в галузі вологометрії направлені на розроблення зручних і швидких з малими енергозатратами електричних методів визначення вмісту води в матеріалах та кінцевих продуктах і виробках.

Метою даного дослідження є обґрунтування ще одного методу, що базується на уявному розділенні матеріалу на активну провідність і дійсну ємність та окремому вимірюванні цієї ємності, що дозволить розв'язати задачу підвищення точності вимірювань.

Відомо [1, 10], що діелектрична проникність капілярно-пористих матеріалів без вмісту вільної води знаходиться в межах 2 – 5 одиниць. При незначному зволоженні такого матеріалу вміст вільної води складає 2 – 3%, діелектрична проникність досягає 15 – 30, а при вмісті вільної води в 10 – 15% вона може досягти сотень, а то і тисяч одиниць. Така різка зміна вимірюваної діелектричної проникності пояснюється значним впливом діелектричних втрат.

Вимірювана діелектрична проникність [3]:

$$\epsilon_u = \frac{C_u}{C_0}, \tag{8}$$

де:  $C_u$  – вимірювана ємність первинного перетворювача (ПП) з досліджуваним матеріалом;

$C_0$  – ємність порожнього ПП.

В більшості випадків еквівалентна схема ПП з досліджуваним матеріалом може бути представлена паралельним з'єднанням опору втрат  $R$  і ємністю  $C$  (рис.4,а) [11].

$$C = C_M + C_0, \tag{9}$$

де:  $C_M$  – ємність вологого матеріалу;

$C_0$  – ємність порожнього ПП.

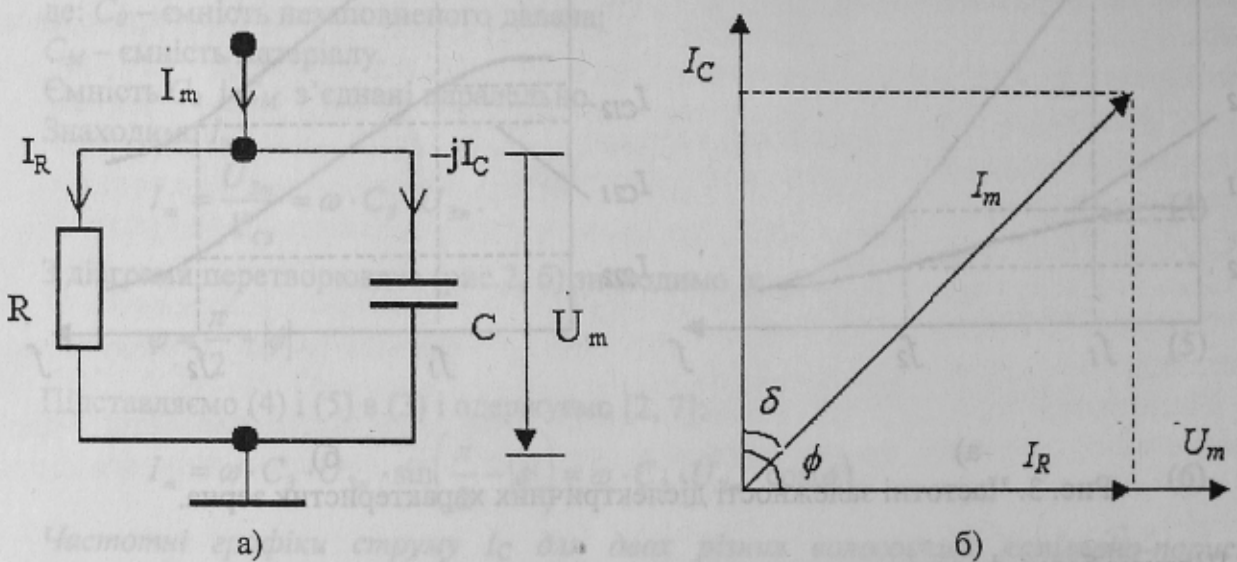


Рис. 4. Еквівалентна схема та векторна діаграма первинного перетворювача вологості.

Як видно з діаграми (рис.4,б) [6]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R}, \tag{10}$$

Комплексна провідність заповненого ПП:

$$\dot{Y} = \frac{1}{R} + j \cdot \omega \cdot C = \frac{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C}{R} = \frac{1 + j \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}}{R}, \quad (11)$$

Комплексний опір первинного перетворювача з нестабільним досліджуваним матеріалом:

$$\dot{Z} = \frac{1}{\dot{Y}} = \frac{R}{1 + j \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}} = \frac{R}{\sqrt{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}}} \cdot e^{-j\varphi}, \quad (12)$$

де:  $\varphi$  - фазовий зсув між напругою  $\dot{U}_m$  і струмом  $\dot{I}_m$  ПП.

Модуль комплексного опору [8]:

$$|\dot{Z}| = \frac{R}{\sqrt{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}}} = \sqrt{\frac{R^2}{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}}} = \sqrt{\frac{R^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}\right)}{\left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}\right)^2}} = \sqrt{\frac{R^2 + \frac{R^2}{\operatorname{tg}^2 \delta}}{\left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}\right)^2}} = \sqrt{\left(\frac{R}{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}}\right)^2 + \left(\frac{\frac{R}{\operatorname{tg} \delta}}{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}}\right)^2}. \quad (13)$$

Враховуючи вирази (11) і (12) комплексний опір ПП з матеріалом в алгебраїчній формі:

$$\dot{Z} = \frac{R}{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}} - j \cdot \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}} = R_a - j \cdot X_{C_a}, \quad (14)$$

де:  $R_a$  - вимірюваний активний опір ПП з матеріалом;

$X_{C_a}$  - вимірюваний реактивний опір ПП з матеріалом.

З виразу (14) вимірюваний ємнісний опір перетворювача:

$$X_{C_a} = \frac{1}{\omega \cdot C_a} = \frac{\frac{R}{\operatorname{tg} \delta}}{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}} = \frac{R \cdot \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (15)$$

З виразу (15) знаходимо вимірювану ємність перетворювача:

$$C_a = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}{\omega \cdot R \cdot \operatorname{tg} \delta} = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}{\omega \cdot R \cdot \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C}} = C \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \delta), \quad (16)$$

Звідси дійсна ємність ПП з матеріалом:

$$C = \frac{C_a}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}, \quad (17)$$

Виміряна (уявна) ємність і  $\operatorname{tg} \delta$  досліджуваного матеріалу можуть бути визначені будь-яким відомим методом.

Тангенс кута діелектричних втрат вологих капілярно-пористих матеріалів може досягати десятків – сотень [5, 13], тому виміряна ємність набагато більша ємності матеріалу, обумовленої вологістю. Наявність нестабільного і тривалого в часі струму активної провідності матеріалу вимагає великого часу вимірювання (десятки секунд), що зменшує експресність контролю. Цим пояснюється значна похибка вимірювання вологості при використанні виміряної діелектричної проникності, яка знаходиться як відношення виміряної

ємності до ємності порожнього давача і може бути усунута завдяки застосуванню методу знаходження дійсної ємності матеріалу з виразом (17).

### Висновки.

Таким чином, кут нахилу залежності  $I_c(f)$  є інформативним параметром при вимірах вологості капілярно-пористих матеріалів з нестабільними діелектричними втратами та пористістю і може бути застосованим для побудови широкого спектру вологомірів зерна.

Очевидно, що дійсна ємність матеріалу може бути також ефективним інформативним параметром при вимірюванні вологості матеріалів з нестабільними діелектричними втратами.

### Література

1. Берлинер М. А. Измерения влажности. –М.: Энергия, 1973. –400 с.
2. Бойко В. О., Платонов П. Н., Пикерсгиль А. А. Двухчастотный метод измерения влажности зерна // Измерительная техника. –1980. –№4. –с. 59 – 60.
3. Бугров А. В. Высокочастотные ёмкостные преобразователи и приборы контроля качества. –М.: Машиностроение, 1982. –94 с.
4. Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин / В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. –М.: Наука, 1978. –280 с.
5. Дубров Н. С., Кричевский Е. С., Невзлин Б. И. Многопараметрические влагомеры сыпучих материалов. –М.: Машиностроение, 1980. – 144 с.
6. Куцевол Н. А., Супьян В. Я., Крушевский Ю. В. Амплитудно-фазовый метод измерения влажности капиллярно-пористых материалов // Контроль и управление в технических системах. Сб. науч. раб. –Винница, 1992. С.89.
7. Куцевол М. О., Куцевол О. М. Двочастотный метод вимірювання вологості капілярно – шпаристих матеріалів зі значними втратами // В кн. “Контроль і управління в складних системах”. За матеріалами МНТК. –Вінниця, 1999, т.2 –с 185 – 188.
8. Куцевол М. О., Куцевол О. М. Метод визначення ємності матеріалу зі значними діелектричними втратами // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Збірник наукових праць. –Хмельницький: ТУП, 2002. Т.1 – С. 86-88.
9. Лыков А. В. Теория сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов пищевой промышленности. –М.: ГИТТЛ, 1946.
10. Матяш И. В. Вода в конденсированных средах. –Киев: Наукова думка, 1978. –236 с.
11. Способ измерения влажности: А.с.1718089 СССР, МКИ G01N27/22. / Н.А. Куцевол, Ю. В. Крушевський, В.Я. Супьян (СССР). - № 4775221 / 25; заявлено 04.11.89; опубл. 07.03.92, Бюл. №9. –4 с.
12. Супьян В. Я., Куцевол Н. А., Крушевский Ю. В. Методы и средства измерения влажности капиллярно-пористых материалов. Радиотехнические устройства контроля и обработки информации. Сб. науч. тр. –К.: УМКВО, 1992.
13. Федоткин И. М., Клочков В. П. Физико-технические основы влагометрии в пищевой промышленности. –Киев: Техніка, 1974. – 320 с.