

# Фізичні основи застосування методів НВЧ-хвиль для діагностики розчинів сахарози

*А.Ф. Кравчук, технічний директор ТОВ «Фірма «ТМА»*

*В.В. Олійник, старший науковий співробітник, завідувач лабораторії квантової радіофізики Київського національного університету ім. Т.Г. Шевченка*

*В.Л. Лаунець, старший науковий співробітник лабораторії квантової радіофізики Київського національного університету ім. Т.Г. Шевченка*

*\* Дослідження виконано на базі Українського науково-дослідного інституту цукрової промисловості*

*Виконані дослідження спектру діелектричної проникності розчину сахарози. Досліджено вплив характеристик НВЧ-хвиль на основні параметри модельного цукрового розчину. Досліджено вплив величини перенасичення розчину сахарози на коефіцієнт поглинання НВЧ випромінювання.*

*Ключові слова: доброякісність, концентрація сухих речовин, перенасичення, розчин сахарози, НВЧ-вимірювання, структурні перетворення в розчинах сахарози.*

*Выполнены исследования спектра диэлектрической проницаемости раствора сахарозы. Исследовано влияние характеристик СВЧ-волн на основные параметры модельного сахарного раствора. Исследовано влияние величины перенасыщения раствора сахарозы на коэффициент поглощения СВЧ-излучения.*

*Ключевые слова: доброкачественность, концентрация сухих веществ, перенасыщение, раствор сахарозы, СВЧ-излучение, структурные превращения в растворах сахарозы.*

*Researches of a spectrum of dielectric permeability of a sucrose solution are executed. Influence of characteristics of microwave radiation on key parameters of a model sugar solution is researched. Influence of size of glut of a solution of sucrose on coefficient of absorption of the microwave oven of radiation is researched.*

*Keywords: high quality, concentration of solids, glut, sucrose solution, microwave radiation, structural transformations in sucrose solutions.*

## ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ РОЗЧИНУ САХАРОЗИ

Сахароза не є провідником струму, але чутлива до діелектричного стану.

Контроль змін діелектричної проникності у часі дозволяє визначати порядок реакції, константи швидкості реакції та енергію активації. Для розчинів, у яких характерний час зміни їх складу або стану порівняний з часом дії збурюючого поля, розроблено апарат релаксаційної спектроскопії [1]. Він заснований на тому, що у випадку дії на розчин змінного електричного поля має місце поляризація молекул розчину в умовах релаксації:  $P(t) = P(0) \exp(-t/\tau)$ , де  $\tau$  – стала, що характеризує процес діелектричної релаксації розчину. Діелектричний метод широко застосовується і для вивчення структурних перетворень в процесі фазових змін в розчинах. Нові можливості з'являються в зв'язку з підвищенням чутливості приладів до зони  $10^{-8}$  і можливості реалізації безперервної

реєстрації усіх стадій фазових переходів. Ми маємо виявлення аномально великих флуктуацій діелектричних властивостей для ряду розчинів при розшаруванні компонентів [2]. Визначені діелектрограми, що містять залежність діелектричної проникності розчину від молярного співвідношення його компонентів. На жаль, для розчинів сахарози ми маємо обмежену інформацію з цього приводу. Проведені нами дослідження концентрації розчинів сахарози дали можливість створити прилад для вимірювання концентрації розчину з точністю 0,2% [3, 4]. Найефективнішим є вимірювання вмісту води в цукровому розчині як найбільш інтенсивного компонента. Сахароза відноситься до речовин зі значною поляризацією, яка зумовлена наявністю одновалентного зв'язку С-Н в її молекулі. Тому використання методів НВЧ-діагностики для дослідження стану розчину са-

харози є доцільним. Теоретично роздільне визначення концентрації компонентів в розчинах можливе за умови взаємозалежності фізичних параметрів аналізу [5]. При цьому використовується визначення залежності діелектричних властивостей від частоти. Практика досліджень показала, що раціональним є не пряме вимірювання дійсної та уявної діелектричної проникності, а вимірювання однозначно пов'язаних з ним параметрів розповсюдження хвиль, наприклад, коефіцієнтів відбиття та поглинання, або зсуву резонансної частоти електродинамічної системи в області релаксації. Так, у міліметровому діапазоні ми спостерігаємо зсув діелектричних спектрів в залежності від концентрації сахарози. На основі цього було обрано спосіб визначення вмісту сахарози та води шляхом одночасного вимірювання при 8-мм і 3-мм діапазонів довжин хвиль електромагнітного випромінювання.

Крім того, для визначення робочих частот проведені дослідження взаємодії електромагнітного поля НВЧ з цукровими розчинами різної концентрації при різних температурах на основі поведінки основних електродинамічних параметрів: коефіцієнтів відбиття та поглинання, які однозначно визначаються величиною дійсної та уявної частин діелектричної проникності [6]. Враховуючи, що тип хвилі в лінії передачі, заповненій діелектриком, не змінюється і, нехтуючи втратами в стінках вимірювальної комірки, в результаті вимірювання коефіцієнтів передачі, як обернених величин до коефіцієнта поглинання  $1/N' \text{ і } 1/N''$  для двох значень довжин хвиль, матимемо комплексний коефіцієнт передачі лінії.

$$\begin{aligned} \gamma_{1d} \cdot \beta_{1d} &= [1/(L' - L'')] \ln (S'''_{12} / S'_{12}) \\ \alpha_{1d} &= (N'' - N') / (L' - L'') \\ \gamma_{1d} &= \beta_{1d} + \alpha_{1d} \end{aligned} \quad (1)$$

де:  $S'_{12}$ ,  $S'''_{12}$  – елементи матриці розсіювання.

Для немагнітних діелектриків справедливо:

$$\begin{aligned} \epsilon &= [\alpha^2_{1d} - \beta^2_{1d} + k^2_i] / \alpha^2_{10} \\ \text{tg } \epsilon &= (2\alpha_{1d} \cdot \beta_{1d}) / (\alpha^2_{1d} - \beta^2_{1d} + k^2_i) \end{aligned} \quad (2)$$

де:  $k_i$  – поперечний хвильовий коефіцієнт лінії передачі;

$\epsilon$  – дійсна частина відносної діелектричної проникності заповнюючого лінію діелектрика;

$\text{tg } \epsilon$  – тангенс його діелектричних втрат.

За допомогою вимірювання комплексного коефіцієнта відбиття

$$S_{11} = S_{11r} + jS_{11i} = K_b e^{j\varphi} \quad (3)$$

при відомому коефіцієнті фази в лінії без діелектрика

$$\alpha_{10} = 2\pi / \lambda_{10} \quad (4)$$

де:  $\lambda_{10}$  – довжина хвилі в лінії,

компоненти комплексного коефіцієнта передачі лінії знаходимо з співвідношень:

$$\begin{aligned} \alpha_{1d} / \alpha_{10} &= [(1 + K_b) / (1 + K_0)] \cdot \{1 - [S^2_{11i} / (2\alpha_{10})^2 K_b]\} \\ \beta_{1d} / \alpha_{10} &= S_{11i} / (1 - K_b) \cdot \{1 - [(1 + K_b) / 2(2\alpha_{10})^2] \cdot S^2_{11i} / K_b\} \end{aligned} \quad (5)$$

Підставляючи значення отриманих коефіцієнтів відбиття та поглинання, визначаємо компоненти діелектричної проникності.

Діелектричні спектри водних розчинів сахарози представлені на рисунках 1 та 2.

Що стосується залежності уявної частини діелектричної проникності від частоти, то можна зробити висновок, що ширина полоси поглинання НВЧ-випромінювання розчином сахарози збільшується при зростанні концентрації, а максимум поглинання зсувається в бік менших частот.

**Аналізуючи діелектричні спектри розчину сахарози, можна зробити висновок:**

- в діапазоні сантиметрових та міліметрових довжин хвиль електромагнітного випромінювання (20...65 ГГц) спостерігається значний вплив на діелектричні параметри розчину зміни концентрації сахарози;
- частота максимального поглинання НВЧ-випромінювання розчином сахарози змінюється при зміні концентрації сахарози в розчині, що відкриває можливості використання НВЧ-методів для аналізу стану цукрових розчинів (концентрація, рівень гідратації, рівень насичення, перенасичення, кристалоутворення і т.п.);
- максимальна взаємодія НВЧ-хвиль з розчином сахарози спостерігається в області частот 25...40 ГГц для даного діапазону концентрацій розчину.

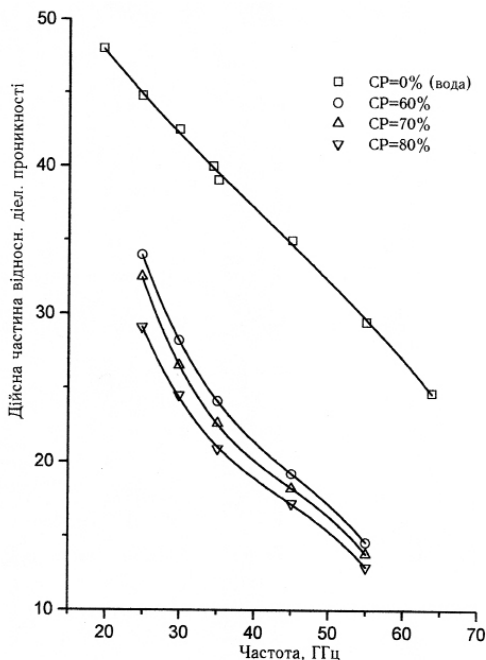


Рис.1.

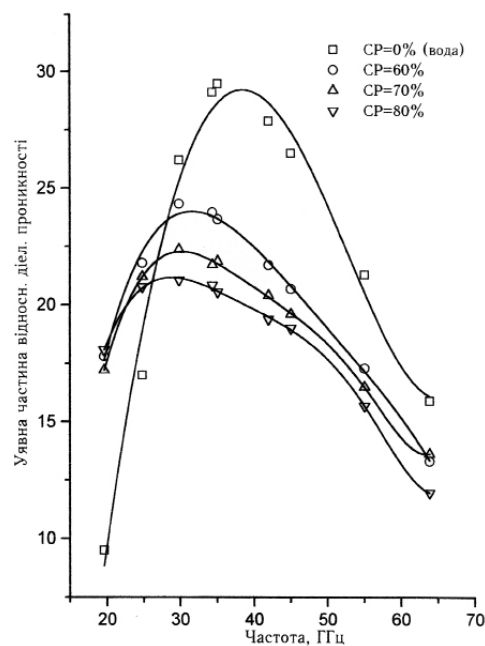


Рис.2.

Діелектричні спектри водних розчинів сахарози

## ТЕХНОЛОГІЇ

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НВЧ-ХВИЛЬ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЦУКРОВИХ РОЗЧИНІВ

Дослідження спрямовані на встановлення однозначного зв'язку між вимірюваними параметрами НВЧ-випромінювання та величинами доброякісності й вмісту сухих речовин в цукрових розчинах, які, в свою чергу, дають можливість визначити вміст сахарози і домішок у розчині. Це здійснюється за допомогою одночасного вимірювання в комірці з цукровим розчином коефіцієнтів відбиття та поглинання для різних значень

концентрації сухих речовин і доброякісності. Вимірювання коефіцієнтів відбиття та поглинання НВЧ-випромінювання проводились на фіксованій частоті 34,1 ГГц (довжина хвилі 9 мм). Температурний діапазон вибрано з врахуванням реальних умов цукрового виробництва.

Загальна тенденція поведінки коефіцієнта поглинання в залежності від температури для різної доброякісності розчину показана на **рисунках 3 і 4**.

Поведінка коефіцієнта поглинання відображає збільшення кінетичної енергії молекул при збільшенні температури, в результаті чого в гідратній оболонці послаблюються зв'язки між молекулами сахарози та води і знижується середній ступінь гідратації сахарози, а кількість вільної води збільшується. При наявності у розчині нецукрів, вони займають частину міжмолекулярного об'єму і виштовхують воду. Тому для роз-

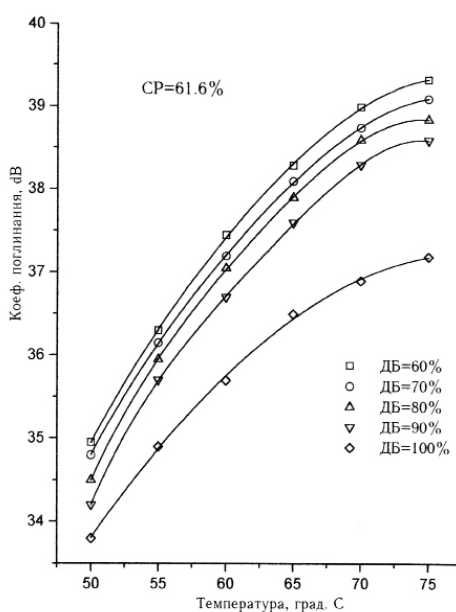


Рис. 3

Загальна тенденція поведінки коефіцієнта поглинання в залежності від температури для різної доброякісності розчину

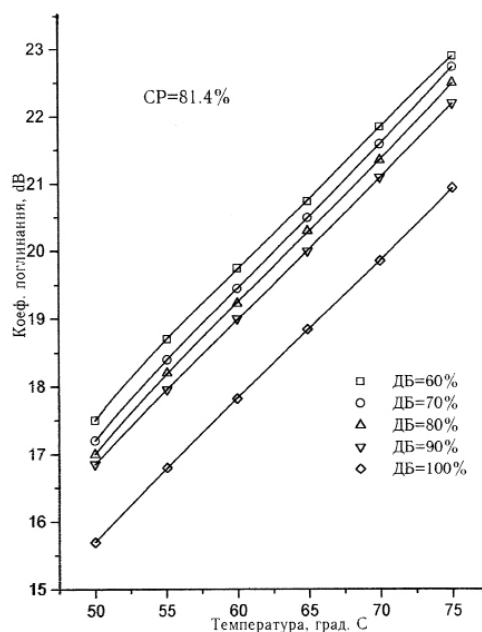


Рис. 4

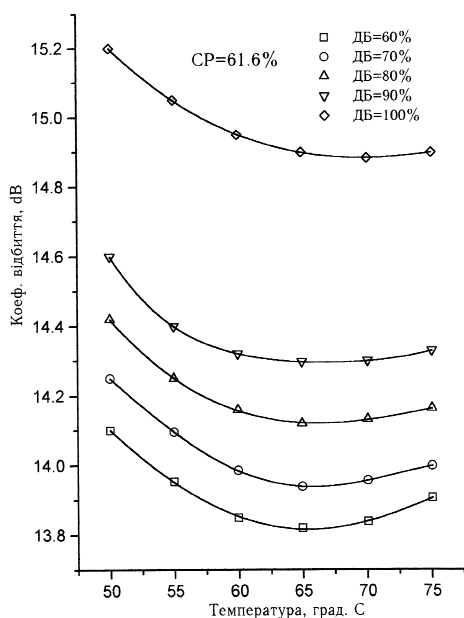


Рис. 5

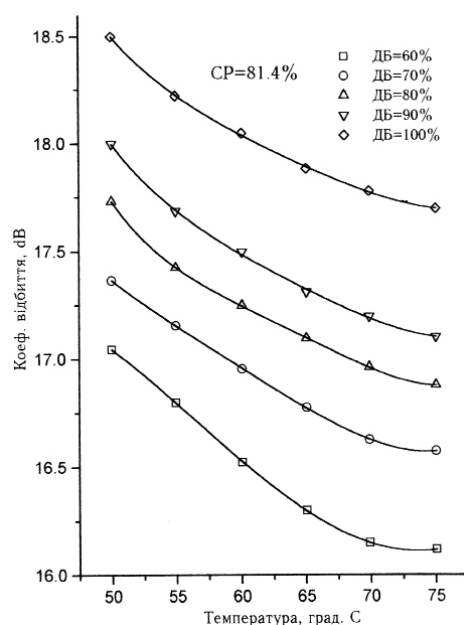


Рис. 6

чину сахарози за даної концентрації та  $D_b=100\%$  поглинання НВЧ-енергії найменше. При наявності нецукрів коефіцієнт поглинання починає зростати як від збільшення температури, так і від збільшення нецукрів. Маса вільної води при цьому також збільшується.

На **рисунках 5 і 6** зображена залежність коефіцієнта відбит-

тя від температури при різних значеннях доброякісності. Вона також відображає наявність та кількість вільної води в розчині.

**Вплив співвідношень Вд / Нц в розчині на параметри НВЧ-хвиль потребує окремого дослідження. З наведених даних на рис. 3, 4, 5, 6, 7, 8 слідує:**

– для кожного значення температури можливо визначити залежність коефіцієнтів відбиття та поглинання від  $D_b$  і  $CP$  розчину; – коефіцієнти поглинання та відбиття по-різному залежать від  $D_b$  і  $CP$  розчину, але для конкретної пари значень можливо вказати пару значень коефіцієнтів відбиття та поглинання, що їй відповідає.

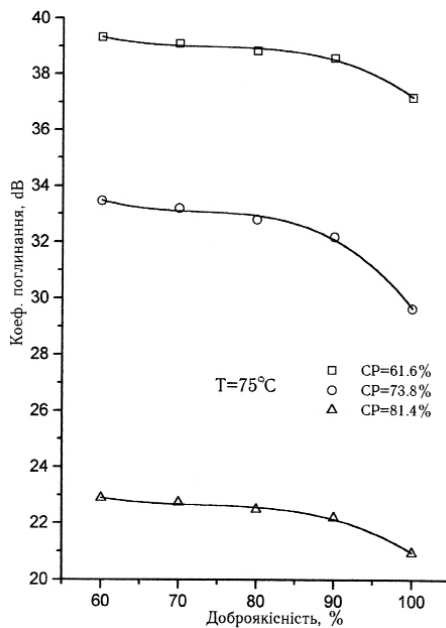


Рис. 7

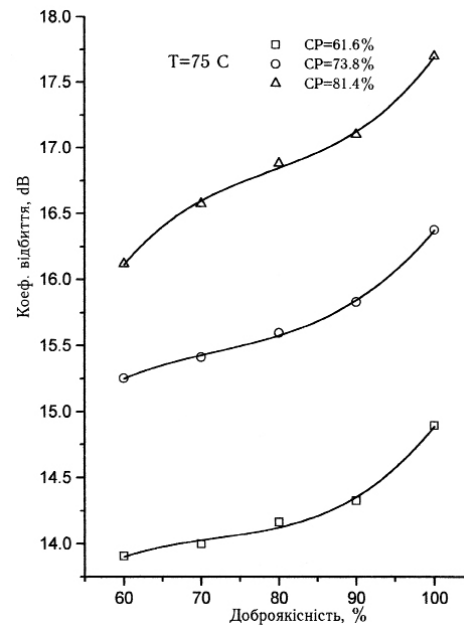


Рис. 8

*Залежність коефіцієнта відбиття від доброякісності при різних значеннях вмісту сухих речовин*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЕРЕНАСИЧЕННЯ ЦУКРОВОГО РОЗЧИНУ НА КОЕФІЦІЄНТ ПОГЛИНАННЯ НВЧ-ХВИЛЬ

Метою досліджень є вимірювання перенасичення розчину та доброякісності за допомогою визначення точки насичення по зламу ізотерм логарифма в'язкості в діапазоні концентрації сухих речовин від 67% до 81%. Дослідження перенасичених розчинів є окремою задачею.

### Методика вимірювань:

– виготовляється розчин сахарози необхідної концентрації з точністю 0,1%;

– розчин нагрівається до температури 85°C і заливається в попередньо нагріту до тієї ж температури кювету з НВЧ антеною-датчиком. Температура контролюється термометром з точністю 0,2°C;

– кювета з розчином охолоджується за графіком до температури 20°C;

– через кожні 2°C вимірюємо коефіцієнти поглинання та відбиття електромагнітного випромінювання;

– за даними вимірювань розраховуємо і зображуємо в координатах  $N=f(CP)$  ізотерми.

– точка зламу ізотерм дозволить визначити  $D_b$  і розрахувати перенасичення розчину.

На **рисунку 9** зображені результати експериментів щодо впливу величини перенасичення розчину на коефіцієнт поглинання НВЧ-випромінювань.

При сталій температурі розчину 22°C змінювалась його концентрація. Ми маємо два

злами прямої лінії. *Перший злам* відповідає концентрації 52,0%, а другий 66,0%. При цьому коефіцієнт перенасичення у другому випадку дорівнював 0,94. Якщо в роботі [7] дається припущення, що у системі «сахароза-вода» розрізняють три різні механізми взаємодії, що обумовлюють поведінку логарифма в'язкості в залежності від перенасичення розчину, то ми вважаємо, що перший злам відповідає повній гідратації сахарози в розчині (на одну молекулу сахарози припадає 8 молекул води – всі групи ОН дипольно зв'язані з водою) і це є перший рівень релаксації розчину. *Другий злам* характеризує нову зміну в структурі розчину: в розчині з'являються дво-

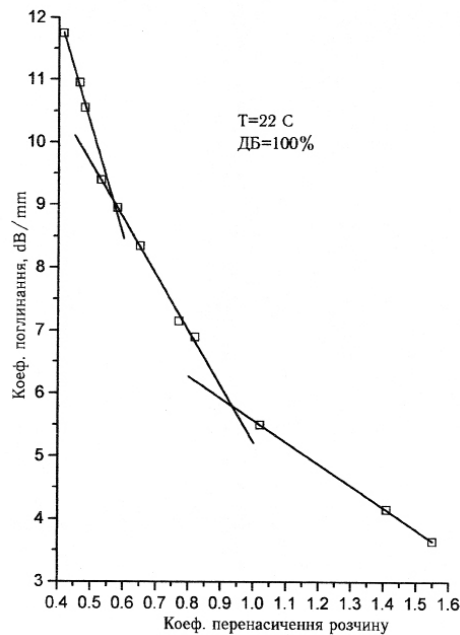


Рис. 9

мірні дипольні рідинні кристали, що відповідає наближенню до рівня насиченості розчину. Поява двомірних дипольних рідинних кристалів змінює структуру розчину і ми маємо *другий злам ізотерми, після якого розчин входить в метастабільну зону*

ризується утворенням тримірних дипольних рідинних кристалів, що можуть об'єднуватись на основі водневих зв'язків в комплекси з шести молекул сахарози, які формують гексагональну структуру молекулярного кристалу сахарози (рис. 11).

С.В. СВЧ-діелектрограф. / А.А. Потапов, С.В. Ливанцова С.В. - Иркутск : СФ ВНИИФТРИ, 1985. - 35 с.

3. *Применение СВЧ для анализа свойств сахарных растворов* / А.Ф. Кравчук, В.В. Загородний, В.Л. Лаунец, В.В.Олейник // Са-

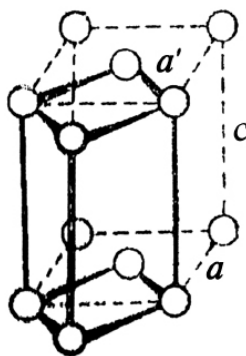


Рис.10. Кристал тетрагональної базоцентричної форми

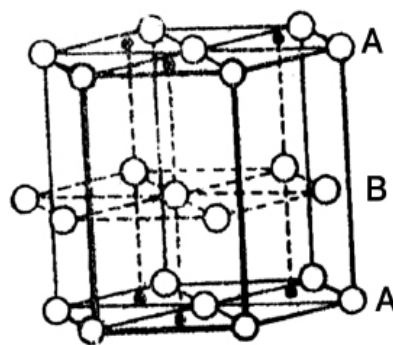


Рис.11. Гексагональна структура молекулярного кристалу сахарози

з точки зору виникнення молекулярних кристалів і їх росту. У цій зоні в залежності від величини перенасичення, температури і рН розчину можуть мати місце кристали як пластинчастої форми, так і кристали тетрагональної базоцентричної форм (рис. 10).

Припущення автора [7], що надалі концентрація вільної води стає мінімальною, водневі зв'язки руйнуються і виникають комплекси молекул сахарози мають місце, оскільки дійсно надалі є ще одна зміна структури розчину сахарози, яка характе-

Дані дослідження вказують на можливості контролю стану розчину чистої сахарози та промислових розчинів на рівні молекулярних взаємодій, а також у визначенні компонентів розчину. Створені промислові прилади для вимірювання вмісту води в розчині та визначення його концентрації [3, 4].

**Список використаних джерел**

1. Шахпаронов Б.В. Механизмы быстрых процессов в жидкостях / Б.В. Шахпаронов. - М. : Высшая школа, 1980. - 352 с.
2. Потапов А.А, Ливанцова

- хар, 1999. - №3. – С. 27-29.
4. Розробити нові методи автоматичного контролю перенасичення та доброякісності цукрових розчинів. Науковий звіт по НДР №938, УкрНДЦП і КДУ ім. Т.Шевченка, 1994, 55 с.
5. Roger J. Becker // Journal of applied physics, 1987 - vol. 61, № 3. -1123 p.
6. Захарія Й.А. Основи надвисоко-частотних вимірювань / Й.А. Захарія. – К : Вища школа, 1972. - 344с.
7. Сапронов А.Р. Технологія сахарного виробництва / Сапронов А.Р. – М : Агропромиздат, 1986. - 431 с.