

## Перетворення цукрів в при дефекації соку та математичне обґрунтування процесів меланоїдиноутворення

*П.П. Загородній, доктор технічних наук, професор кафедри інженерної та комп'ютерної графіки, Національний університет харчових технологій, м. Київ*

*Л.М. Хомічак, доктор технічних наук, професор кафедри технології цукру та підготовки води, Національний університет харчових технологій, м. Київ*

*І.В. Попова, кандидат технічних наук, доцент кафедри органічної хімії, Національний університет харчових технологій, м. Київ*

*Для оптимізації процесу утворення барвних речовин в процесі основної дефекації соку наведено дослідження хімічних перетворень і математичне моделювання.*

*Ключові слова: дефекація, оксиметилфурфурол, цукрове виробництво, математична оптимізація.*

*Для оптимизации процесса образования красящих веществ в процессе основной дефекации сока приведены исследования химических превращений и математическое моделирование.*

*Ключевые слова: Дефекация, оксиметилфурфурол, сахарное производство, математическая оптимизация.*

*To optimize the process of formation of coloring agents in the main defecation juice are the study of chemical transformations and mathematical modeling.*

*Key words. Defecation, hydroxymethylfurfural, sugar production, mathematical optimization.*

Перетворенню цукрів в процесі виробництва присвячено надзвичайно багато досліджень. Їх короткий огляд приведений в [1]. Із цукрози при гідролізі утворюється інвертний цукор – еквімолярна суміш глюкози і фруктози, які при подальшому розкладі обумовлюють забарвлення цукрових розчинів у виробництві, а також затруднюють проведення технологічних процесів. Запропоновані різні схеми перетворення вказаних моносахаридів, які проходять через фенольну форму [2, 3]. При всій складності шляхів перетворень моносахаридів в виробничих умовах, можна виділити два основних:

- 1) кінцевими продуктами перетворень є органічні кислоти;
- 2) кінцевими продуктами перетворень є барвники.

Основними процесами, що проходять при основній дефекації є розкладання ряду органічних нецукрів соку (амідів кислот, солей амонію, редукуючих речовин), а також омилення жирів, доосадження аніонів кислот і створення надлишку вапна, необхідного для отримання достатньої кількості  $\text{CaCO}_3$  на I сатурації. У результаті розкладання амідів (аспарагіну, глутаміну та ін) виділяється аміак. У результаті розкладання редукуючих цукрів утворюються органічні кислоти: молочна, оцтова, мурашина та інші, що дають з вапном розчинні солі  $\text{Ca}^{2+}$ , які погіршують кристалізацію цукру. Ці реакції відбуваються, як наслідок реакцій Майара (меланоїдиноутворення). Сутність цієї реакції полягає у тому, що низькомолекулярні продукти розпаду білків (пептиди, амінокислоти), що містять вільну аміногрупу ( $-\text{NH}_2$ ), можуть вступати в реакцію зі сполуками, до складу яких входить карбонільна група  $-\text{C}=\text{O}$ , наприклад, з альдегідами і відновлюючими цукрами (фруктозою, глюкозою), у разі чого відбувається розкладання як амінокислоти, так і цукру. З амінокислоти утворюються альдегід, аміак і діоксид вуглецю, а з цукру-фурфурол і оксиметилфурфурол, які, в свою чергу, вступають в реакції з амінокислотами, утворюють забарвлені продукти, так звані меланоїдини, та при розкладанні перетворюються на органічні кислоти - левуленову та мурашину[4].

Метою нашого дослідження було встановлення механізмів основних хімічних реакцій, що протікають у процесі дефекації дифузійного соку для оптимізації цього процесу.

Задача розпаду редукуючих речовин із врахуванням розкладання сахарози вирішена П.П.Загороднім [5]. Відомо, що реакції перетворення цукрів при високій температурі і лужності в умовах гарячої ступені основної дефекації продовжуються з утворенням оксиметилфурфуролу та продуктів його полімеризації і далі – органічних кислот [2].

Розглянемо наступну схему перетворення цукрів:



де  $C_x$  – сахароза;  $I$  – інвертний цукор;  $C_0$  – оксиметилфурфурол та продукти його полімеризації;  $K_m$  – кислоти;  $K_1, K_2, K_3$  – константи швидкості відповідних реакцій,  $x\theta^{(-)}$ .

Наведеній схемі відповідає наступна система рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{dC_x}{d\tau} &= -K_1 C_x; \\ \frac{dI}{d\tau} &= K_1 C_x - K_2 I; \\ \frac{dC_0}{d\tau} &= K_2 I - K_3 C_0; \\ \frac{dK_m}{d\tau} &= K_3 C_0 \end{aligned} \quad (2)$$

Рішення першого рівняння системи відоме:

$$C_x = C_{x_0} (1 - e^{-K_1 \tau}), \quad (3)$$

де  $C_{x_0}$  - початкова концентрація сахарози в розчині, % до маси СР;

$\tau$  - тривалість процесу, хв.;  $K_1$  - константа швидкості розпаду цукру,  $x\theta^{(-)}$ .

Рішення другого рівняння, яке дає зміну концентрації інвертного цукру із врахуванням розкладання сахарози, отримане П.П.Загороднім [5]:

$$I = I_0 e^{-K_2 \tau} + C_{x_0} \frac{K_1}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 \tau} - e^{-K_2 \tau}), \quad (4)$$

де  $I_0$  - початкова концентрація інвертного цукру в розчині, % до маси СР;  $K_2$  - константа швидкості розпаду інвертного цукру,  $x\theta^{(-)}$ .

Третє рівняння системи (2) запишемо в такому вигляді:

$$\frac{dC_0}{d\tau} + K_3 C_0 = K_2 I \quad (5)$$

Це рівняння Бернуллі [7]. Його рішення знайдемо, прирівнюючи ліву частину до нуля. Після інтегрування отримаємо:

$$C_0 = A \cdot e^{-K_3 \tau}, \quad (6)$$

де  $A$  – постійна інтегрування.

Рівняння (5) із врахуванням (4) можна записати так:

$$\frac{dC_0}{d\tau} + K_3 C_0 = K_2 \left[ I_0 e^{-K_2 \tau} + C_{x_0} \frac{K_1}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 \tau} - e^{-K_2 \tau}) \right], \quad (7)$$

Тобто права частина рівняння є функцією часу. То і постійна  $A$  в рівнянні (6) є функцією часу. Продиференціюємо рівняння (6) по  $\tau$ , отримаємо:

$$\frac{dC_0}{d\tau} = -K_3 A e^{-K_3 \tau} + e^{-K_3 \tau} \frac{dA}{d\tau} \quad (8)$$

Підставляючи рівняння (6) та (8) в (7) будемо мати:

$$\frac{dA}{d\tau} e^{-K_3 \tau} - K_3 A e^{-K_3 \tau} + K_3 A e^{-K_3 \tau} = K_2 \left[ I_0 e^{-K_2 \tau} + C_{x_0} \frac{K_1}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 \tau} - e^{-K_2 \tau}) \right] \quad (9)$$

або

$$dA = K_2 e^{-K_3 \tau} \left[ I_0 e^{-K_2 \tau} + C_{x_0} \frac{K_1}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 \tau} - e^{-K_2 \tau}) \right] d\tau \quad (10)$$

Розіб'ємо останній вираз на три окремих інтеграла:

$$A_1 = I K_2 \int e^{(K_3 - K_2) \tau} d\tau = \frac{I_0 K_1}{K_3 - K_2} e^{(K_3 - K_2) \tau} + C_1 \quad (11)$$

$$A_2 = \frac{C_{x_0} K_1 K_2}{K_2 - K_1} \int e^{(K_3 - K_2) \tau} d\tau = \frac{C_{x_0} K_1 K_2}{(K_2 - K_1)(K_3 - K_1)} e^{(K_3 - K_2) \tau} + C_2 \quad (12)$$

$$A_3 = \frac{C_{x_0} K_1 K_2}{K_2 - K_1} \int e^{(K_3 - K_2) \tau} d\tau = \frac{C_{x_0} K_1 K_2}{(K_2 - K_1)(K_3 - K_1)} e^{(K_3 - K_2) \tau} + C_3 \quad (13)$$

Тоді після підстановки цих інтегралів в (10) отримаємо:

$$A = \frac{K_2}{K_3 - K_2} \left( I_0 - \frac{C_{x_0} K_1}{K_2 - K_1} \right) e^{(K_3 - K_2) \tau} + \frac{C_{x_0} K_1 K_2}{(K_2 - K_1)(K_3 - K_1)} e^{(K_3 - K_2) \tau} + B, \quad (14)$$

де  $B = C_1 + C_2 + C_3$  - постійна інтегрування.

Враховуючи останній вираз (14) із (6) маємо:

$$C_0 = \frac{K_2}{K_3 - K_2} \left( I_0 - \frac{C_{x_0} K_1}{K_2 - K_1} \right) e^{-K_2 \tau} + \frac{C_{x_0} K_1 K_2}{(K_2 - K_1)(K_3 - K_1)} e^{-K_1 \tau} + B e^{-K_3 \tau} \quad (15)$$

Постійну інтегрування В в останньому виразі можна визначити за початковою умовою: при  $\tau=0$ ,  $C_0=C_0^0$ .

$$B = C_0^0 \cdot \frac{I_0 K_2}{K_3 - K_2} - \frac{C_x K_1 K_2}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{1}{K_3 - K_1} - \frac{1}{K_3 - K_2} \right) \quad (16)$$

Тоді рівняння (15) із врахуванням (16), буде мати вид:

$$C_0 = \frac{I_0 K_2}{K_3 - K_2} e^{-K_2 \tau} + \frac{C_x K_1 K_2}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{e^{-K_1 \tau}}{K_3 - K_1} - \frac{e^{-K_2 \tau}}{K_3 - K_2} \right) + \left[ C_0^0 - \frac{I_0 K_2}{K_3 - K_2} - \frac{C_x K_1 K_2}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{1}{K_3 - K_1} - \frac{1}{K_3 - K_2} \right) \right] e^{-K_3 \tau} = \frac{C_x K_1 K_2}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{e^{-K_1 \tau} - e^{-K_3 \tau}}{K_3 - K_1} - \frac{e^{-K_3 \tau} - e^{-K_2 \tau}}{K_3 - K_2} \right) + \frac{I_0 K_2}{K_3 - K_2} (e^{-K_2 \tau} - e^{-K_3 \tau}) + C_0^0 e^{-K_3 \tau} \quad (17)$$

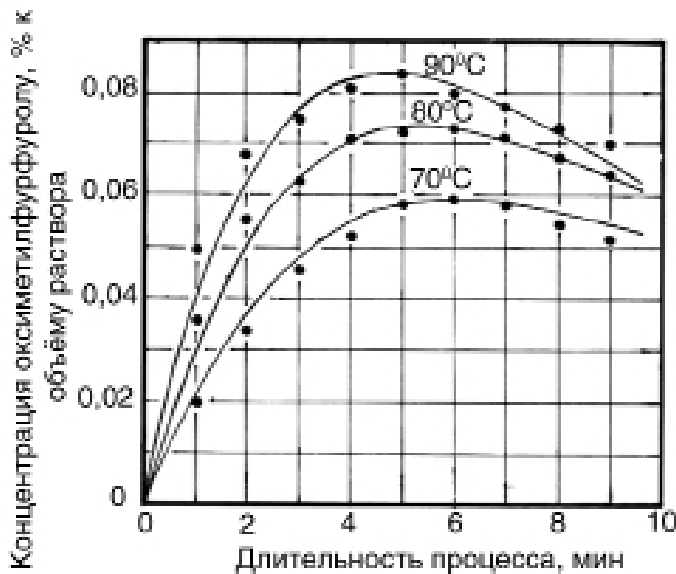
Рівняння (17) визначає концентрацію оксиметилфурфуролу та продуктів його полімеризації в будь-який момент проведення процесу.

Із рівняння (17) отримуємо: при  $\tau=0$ ,  $C_0=C_0^0$ , а при  $\tau \rightarrow \infty$ ,  $C_0 \rightarrow 0$ , тобто при  $\tau \rightarrow \infty$  і сахароза, і інвертний цукор, і оксиметилфурфурол розпадуться до кінцевих речовин – в основному органічних кислот та барвних сполук, що підтверджує коректність отриманого рішення.

Вираз (17) має максимум, який відповідає максимальній концентрації оксиметилфурфуролу  $C_0$  в дефекованому соці. Цей максимум легко знайти за умовою  $\frac{dC_0}{d\tau} = 0$ .

$$\frac{dC_0}{d\tau} = \frac{I_0 K_2^2}{K_3 - K_2} e^{-K_2 \tau} - \frac{C_x K_1 K_2}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{K_1 e^{-K_1 \tau}}{K_3 - K_1} - \frac{K_2 e^{-K_2 \tau}}{K_3 - K_2} \right) - \left[ C_0^0 - \frac{I_0 K_2}{K_3 - K_2} - \frac{C_x K_1 K_2}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{1}{K_3 - K_1} - \frac{1}{K_3 - K_2} \right) \right] K_3 e^{-K_3 \tau} = 0 \quad (18)$$

В рівнянні (18) дві невідомі  $K_3$  та  $\tau_{max}$ . Значення  $\tau_{max}$ , тобто тривалості процесу основної дефекації, при якому спостерігається максимальна концентрація в соку оксиметилфурфуролу та продуктів його полімеризації в залежності від температури процесу, визначені Л.І. Танащук [6] (**рис.1**)



**Рис.1.** Залежність концентрації оксиметилфурфуролу та продуктів його полімеризації в процесі дефекації соку при різних температурах (точки – дані [6]; криві – розрахунок за формулою 17a)

(При зміні температури змінюються  $K_2$  та  $t_{max}$ !).

Використовуючи ці данні, та розраховуючи  $K_1$ ,  $K_2$  в залежності від температури процесу і  $ph_t$  ( $K_1$  розраховували за даними [4], а  $K_2$  - за [1]) розраховали  $K_3$  за виразом (19б) для наведених температур [2] при відповідній  $K_2$ . Дані розрахунків наведені в **табл.1**.

Залежність  $K_3$  від температури процесу може бути описана рівнянням:

$$K_3 = 9,875 \cdot 10^{-5} t^2 - 2,35 \cdot 10^{-2} t + 1,475 \quad (20)$$

де  $t$  – температура процесу, °C.

Так як кінетика процесу розпаду редуруючих речовин змінюється при  $t \approx 60^\circ\text{C}$  [1], то рівняння (20) вочевидь не годиться для більш низьких температур.

Концентрація оксиметилфурфуролу та продуктів його полімеризації в модельному розчині в залежності від часу дефекації може бути визначена за виразом:

Враховуючи, що експерименти [6] були проведені на модельному розчині (1% інвертного цукру у воді з додаванням  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), рівняння (18) для цих умов прийме вид:

$$\frac{I_0 K_2}{K_3 - K_2} (K_3 e^{-K_3 \tau} - K_2 e^{-K_2 \tau}) = 0 \quad (19)$$

Зважаючи що початкова концентрація оксиметилфурфуролу та продуктів його полімеризації ( $C_0^0$ ), а також сахарози ( $C_x$ ) дорівнювали нулю.

А так як  $\frac{I_0 K_2}{K_3 - K_2} \neq 0$ , то  $K_3$  можна знайти за умовою:

$$K_3 e^{-K_3 \tau_{max}} - K_2 e^{-K_2 \tau_{max}} = 0 \quad (19a)$$

Враховуючи, що для заданої температури процесу  $K_2$  та  $\tau_{max}$  відомі, то рівняння для визначення  $K_3$  можна записати так:

$$K_3 e^{-K_3 \tau_{max}} - const = 0 \quad (19б)$$

Наприклад, для температури  $90^\circ\text{C}$  за умов дефекації із **рис.1** маємо для цих же умов розраховували за даними [5]  $K_2 = 0,266283$ . Тоді  $const = K_2 e^{-K_2 \tau_{max}^{90}} = 0,266283 \cdot e^{-0,266283 \cdot 4,8} = 0,074173$ .

Значення  $\tau_{max}^i$  та констант швидкостей відповідних реакцій в залежності від температури процесу основної дефекації ( $t_0=0,3\%$  до маси СР соку,  $C_{x_0}=87\%$ ).

Температура процесу, °C	70	80	90
$K_1, \text{хв}^{-1}$	$1,616717 \cdot 10^{-6}$	$4,37364 \cdot 10^{-6}$	$1,070346 \cdot 10^{-5}$
$K_2, \text{хв}^{-1}$	0,0701239	0,139256	0,266283
$K_3, \text{хв}^{-1}$	0,30969	0,24467	0,15947
$K_3, \text{хв}^{-1}$ розраховано за рівнянням (20)	0,31387	0,2270	0,15987

Розрахунки за виразом (17а) концентрації оксиметилфурфуролу та продуктів його полімеризації в модельному розчині (1% інвертного цукру) показують, що при 90°C тільки 18,1% інвертного цукру при його розкладанні утворює вищезазначені речовини, при 80°C – 25,8%, а при 70°C – 40,3%.

На рис.1 наведені експериментальні дані Л. Танащук [5], та розраховані за виразом (17а) концентрації оксиметилфурфуролу в модельному розчині при різних температурах з урахуванням ступенів перетворень.

Залежність ступенів перетворень інвертного цукру в оксиметилфурфурол та продукти його полімеризації від температури процесу дефекації може бути описана рівнянням:

$$\varphi = 0,034 \cdot t^2 - 6,525 \cdot t + 329,9 \quad (21)$$

Таким чином, з одного боку, із зниженням температури процесу ступінь перетворення інверту з утворенням оксиметилфурфуролу та продуктів його полімеризації зростає, але при цьому значно зростає швидкість його розпаду до органічних кислот.

З іншого боку, стійкість оксиметилфурфуролу та продуктів його полімеризації зростає з підвищенням температури ( $K_3$  зменшується!), хоч відомо, що швидкість хімічних реакцій зростає зі зростанням температури. Тому при проведенні дефекації при низькій температурі -40-50°C – оксиметилфурфурол швидше перетворюється на органічні кислоти. При цьому його концентрація в самому соці значно менша, ніж при проведенні дефекації за температури 85-90°C. Тобто за наявності холодної ступені дефекації в технологічній схемі, знижується кількість барвних речовин з інвертного цукру.

Більш інтенсивне розкладання оксиметилфурфуролу за низьких температур підтверджується тим, що в технологічних схемах очищення дифузійного соку із холодною ступінню основної дефекації отримують менш забарвлені продукти. Цей факт є ще одним доказом важливої ролі оксиметилфурфуролу в утворенні барвних речовин в умовах цукрового виробництва.

З останнього рівняння системи (2) находимо, враховуючи вираз (17):

$$dKm = K_3 \left\{ \frac{I_0 K_2^2}{K_3 - K_2} e^{-K_2 \tau} - \frac{C_{x_0} K_1 K_2}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{K_1 e^{-K_1 \tau}}{K_3 - K_1} - \frac{K_2 e^{-K_2 \tau}}{K_3 - K_2} \right) + \left[ C_0^0 - \frac{I_0 K_2}{K_3 - K_2} - \frac{C_{x_0} K_1 K_2}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{1}{K_3 - K_1} - \frac{1}{K_3 - K_2} \right) \right] e^{-K_3 \tau} \right\} d\tau \quad (22)$$

Інтегруючи, отримуємо:

$$K_m = K_3 \left\{ -\frac{I_0}{K_3 - K_2} e^{-K_2 \tau} - \frac{C_{x_0}}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{K_1 e^{-K_1 \tau}}{K_3 - K_1} - \frac{K_2 e^{-K_2 \tau}}{K_3 - K_2} \right) - \left[ C_0^0 - \frac{I_0 K_2}{K_3 - K_2} - \frac{C_{x_0} K_1 K_2}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{1}{K_3 - K_1} - \frac{1}{K_3 - K_2} \right) \right] \frac{1}{K_3} e^{-K_3 \tau} \right\} + D \quad (23)$$

де D – постійна інтегрування.

Постійну інтегрування D знайдемо за початковою умовою: при  $\tau=0$   $K_m = 0$ . Тоді

$$D = \frac{I_0 K_3}{K_3 - K_2} + \frac{C_{x_0} K_3}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{K_3}{K_3 - K_1} - \frac{K_3}{K_3 - K_2} \right) + \left[ C_0^0 - \frac{I_0 K_2}{K_3 - K_2} - \frac{C_{x_0} K_1 K_2}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{1}{K_3 - K_1} - \frac{1}{K_3 - K_2} \right) \right] \quad (24)$$

А тоді рівняння (23) із врахуванням (24) буде мати вигляд:

$$K_m = K_3 \left\{ -\frac{I_0}{K_3 - K_2} e^{-K_2 \tau} - \frac{C_{x_0}}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{K_1 e^{-K_1 \tau}}{K_3 - K_1} - \frac{K_2 e^{-K_2 \tau}}{K_3 - K_2} \right) - \left[ C_0^0 - \frac{I_0 K_2}{K_3 - K_2} - \frac{C_{x_0} K_1 K_2}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{1}{K_3 - K_1} - \frac{1}{K_3 - K_2} \right) \right] \frac{1}{K_3} e^{-K_3 \tau} \right\} + \frac{I_0 K_3}{K_3 - K_2} + \frac{C_{x_0} K_3}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{K_3}{K_3 - K_1} - \frac{K_3}{K_3 - K_2} \right) + \left[ C_0^0 - \frac{I_0 K_2}{K_3 - K_2} - \frac{C_{x_0} K_1 K_2}{(K_2 - K_1)} \left( \frac{1}{K_3 - K_1} - \frac{1}{K_3 - K_2} \right) \right] \quad (25)$$

Або після перетворень одержимо:

$$K_m = \frac{C_{x_0}}{(K_2 - K_1)} \left\{ \frac{K_2}{K_3 - K_1} [K_3(1 - e^{-K_1 \tau}) - K_1(1 - e^{-K_3 \tau})] - \frac{K_1}{K_3 - K_2} [K_3(1 - e^{-K_2 \tau}) - K_2(1 - e^{-K_3 \tau})] \right\} + \frac{I_0}{K_3 - K_2} [K_3(1 - e^{-K_2 \tau}) - K_2(1 - e^{-K_3 \tau})] + C_0^0(1 - e^{-K_3 \tau}) \quad (25a)$$

Рівняння (25а) визначає концентрацію кінцевих продуктів послідовної реакції розкладу сахарози через інвертний цукор, оксиметилфурфурол та продукти його полімеризації до органічних кислот.



При  $\tau=0, K_m=0$ , а при  $\tau \rightarrow \infty, K_m = C_{x_0} + I_0 + C_0^0$ , тобто на початку реакції кінцеві продукти відсутні в соці, при  $\tau \rightarrow \infty$  цукор, інверт та оксиметилфурфурол розкладаються до кінцевих продуктів.

В рівнянні (23) прийнято, що вихідна концентрація розчину  $K_m^0=0$  тому що в умовах дефекації органічні кислоти тут же нейтралізуються надлишком вапна, утворюючи розчинні солі.

Так як хімізм перетворення самих сахарів, починаючи з розкладання моносахаридів не встановлений, то неможливо застосувати стехіометричні коефіцієнти та встановити кількісний зв'язок цих перетворень, але пропорційний зв'язок, без сумніву, можна описати за допомогою отриманих рівнянь.

На **рис.2** наведено характерні криві перетворень сахарози, інвертного цукру, оксиметилфурфуролу та продуктів його полімеризації, а також накопичення в розчині кінцевих продуктів реакції в умовах дефекації соку за температури 90°C.

При цьому цю концентрацію інвертного цукру віднесено до початкової і помножено на 100, концентрація оксиметилфурфуролу та продуктів його полімеризації приведені в % до маси СР. Розрахунок даних наведених на **рис.2** виконаний за наступними вихідними даними:  $C_{x_0}=87\%$ , до маси СР;  $I_0=0,3\%$  до маси СР;  $K_m^0=0$ ;  $t=90^\circ\text{C}$ ; надлишок  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . (**рис.2**)

Концентрація сахарози за наведених умов змінюється незначно і на **рис.2** не наведена.

Крім того, прийнято, що константа швидкості перетворень оксиметилфурфуролу та продуктів його полімеризації залишилась такою ж, як і в модельних розчинах, тобто не залежить від наявності сахарози та інших сполук в соку.

**Висновки:**

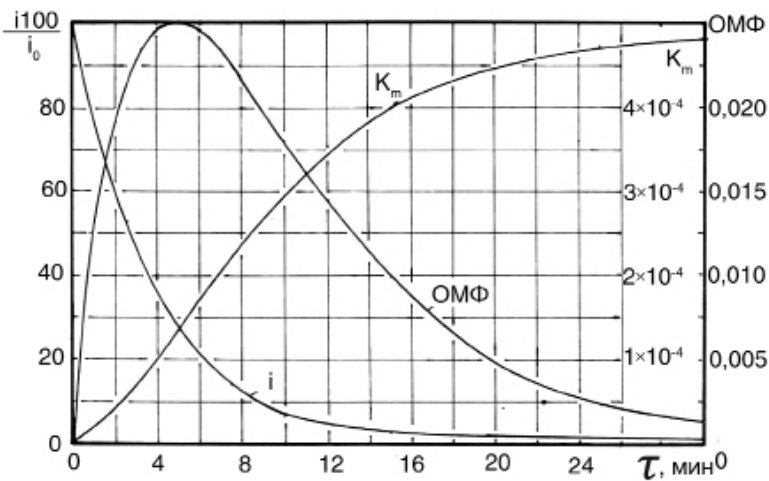
1. Досліджено кінетику утворення оксиметилфурфуролу та продуктів його полімеризації на модельних розчинах і за умов основної дефекації за різних температурних і часових режимів. Доведено, що при проведенні дефекації при низькій температурі - 40-50°C – оксиметилфурфурол швидше перетворюється на органічні кислоти. При цьому його концентрація в самому соку значно менша, ніж при проведенні дефекації за температури 85-90°C. Тобто за наявності холодної ступені дефекації в технологічній схемі, знижується кількість барвних речовин з інвертного цукру.

2. За допомогою математичних розрахунків підтверджено справедливості отриманих експериментальних результатів. Тобто використання приведених математичних обрахунків цілком доцільно

при проведенні і прогнозуванні виробничого процесу.

**Список використаних джерел**

1. Сапронов А.Р., Колчева Р.А. Красящие вещества и их влияние на качество сахара. – М. : Пищ. Пром-сть. 1975. – 348с.
2. Архипович Н.А. Общая технология сахаристых веществ. – К. : «Вища школа», 1970. – с.25.
3. Prey V. Vznik barbiv a fabrika v cukrovarnickom priemysle a ich odstranovanie. – «Lista cukrovarnicke», - 1970, №12, p.266-272.
4. Нахманович М.И. Реакции моносахаридов. – М. : Пищепромиздат, 1960. – 169с.
5. Загородний П.П. Совершенствование процессов очистки полупродуктов сахарного производства и их аппаратурного оформления: Дис. №33456745 д-р техн. наук – К., 1994. – 373с.
6. Танащук Л.И. Способ очистки соков сахарного производства а максимальным использованием адсорбционного эффекта. Автореф.дис., канд. техн. наук. – К., 1981. – 24с.
7. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Том II. Изд. двадцать первое, стереотипное. – М. : «Наука», 1974. – с.23-28.



**Рис.2.** Зміна концентрації інвертного цукру, оксиметилфурфуролу та продуктів його полімеризації, а також кислот при розкладанні інвертного цукру в умовах дефекації дифузійного соку при  $t=90^\circ\text{C}$  (надлишок  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). (Концентрації  $I, C_m, K_m$  розраховані відповідно за виразами 4, 17 та 25а).

