

УДК 664.1.004.12::532.7

Миرونчук В.Г., д-р техн. наук, проф.,

Єщенко О.А., канд. техн. наук,

Картава М.М. (НУХТ, Київ)

МОДЕЛЮВАННЯ КРИСТАЛІЗАЦІЇ УТФЕЛЮ ОСТАННЬОГО ПРОДУКТУ В ПЕРЕМІШУВАЧАХ-КРИСТАЛІЗАТОРАХ

Розроблена математична модель кристалізації утфелю останнього продукту в перемішувачах-кристалізаторах. На основі результатів промислових, лабораторних та обчислювальних експериментів зроблено порівняльний аналіз різних технологічних схем.

Ключові слова: кристалізація, утфель, міжкристальний розчин, розкачка.

В бурякоцукровому виробництві існує ряд методів спрямованих на інтенсифікацію безперервної кристалізації цукрових утфелів останнього продукту в перемішувачах-кристалізаторах. Вони зводяться, в основному, до удосконалення технології та апаратурного оформлення процесу кристалізації за умов охолодження кристалізуючого продукту.

На сьогодні технологія процесу додаткової кристалізації утфелів останнього продукту удосконалювалась різними варіантами теплової обробки та розбавлення утфелів розкачками та проміжним центрифугуванням. Ці заходи застосовуються з метою уникнення вторинного кристалоутворення, зменшення в'язкості та підтримання необхідного пересичення міжкристального розчину.

Цукровики України накопичили вагомий досвід раціонального ведення процесу кристалізації в мішалках-кристалізаторах. В залежності від умов підприємства в експлуатації використовують різні схеми оснащення станцій кристалізації охолодженням: вертикальними кристалізаторами, горизонтальними кристалізаторами, комбінацією вертикальних і горизонтальних кристалізаторів.

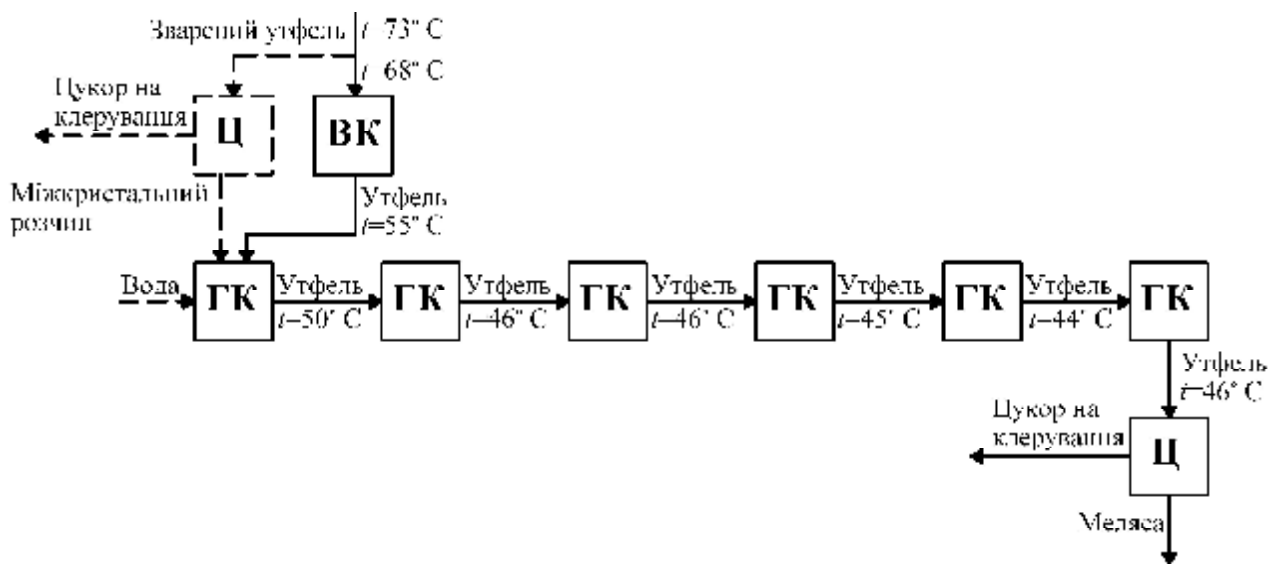
Прийнятий типовий технологічний режим охолодження утфелю в станціях кристалізації зі швидкістю 1,0–1,1 °С/годину протягом 32 годин в горизонтальних мішалках-кристалізаторах та 1,2–1,4 °С/годину у вертикальних кристалізаторах [1], як правило вимагає додаткової розкачки утфелю водою. Нерівномірність температурних полів утфелю в кристалізаторах та порушення режиму охолодження створює сприятливі умови для вторинного кристалоутворення, що зменшує кінцевий ефект кристалізації, збільшує вміст сахарози в мелясі та енергетичні витрати в продуктовому відділенні.

Досвід роботи цукрових підприємств показує, що станції кристалізації, які оснащені комбінацією вертикальних і горизонтальних кристалізаторів мають суттєві особливості і потребують додаткових вимог щодо технологічного регламенту ведення процесу кристалізації в них. Особливість роботи такої схеми полягає в тому, що час перебування утфелю у вертикальному кристалізаторі складає 18 годин, після чого утфель надходить в

батарею горизонтальних кристалізаторів (де розкачується водою чи цукровим розчином в першому кристалізаторі) і продовжується кристалізація протягом 26 годин.

Наші промислові дослідження такої станції кристалізації утфелю останнього продукту виявили ряд вагомих факторів, удосконалення яких забезпечує суттєву інтенсифікацію процесу і покращення технологічних характеристик кінцевого продукту.

З метою знаходження раціонального режиму ведення процесу для вище згаданої схеми нами побудована імітаційна модель [2] промислової кристалізації сахарози охолодженням у мішалках кристалізаторах. Розроблена нами модель базується на потоковому графі процесу уварювання утфелю (рисунок 1) та балансових рівняннях матеріальних потоків [3, 4], які пов'язані з дугами графа.



ВК – вертикальний кристалізатор;

ГК – горизонтальний кристалізатор;

Ц – центрифуга;

прихованою показано елементи моделі, що можуть вилучатися

Рисунок 1 – Поточковий граф процесу кристалізації утфелю охолодженням.

Рівняння матеріального балансу:

$$G_y = G_{кр_n} + G_{м_n} = G_{кр_к} + G_{м_к} \quad (1)$$

по сахарозі:

$$G_y Ц_{к_y} = G_{м_n} Ц_{к_{м_n}} + G_{кр_n} = G_{м_к} Ц_{к_{м_к}} + G_{кр_к}, \quad (2)$$

по нецукрам:

$$G_y Н_{ц_y} = G_{м_n} Н_{ц_{м_n}} = G_{м_к} Н_{ц_{м_к}}, \quad (3)$$

по сухим речовинам:
$$G_y CP_y = G_{M_n} CP_{M_n} + G_{крк} = G_{M_k} CP_{M_k} + G_{крк}, \quad (4)$$

по воді:
$$G_y W_y = G_{M_n} W_{M_n} = G_{M_k} W_{M_k}, \quad (5)$$

де G_y , $G_{крн}$, $G_{крк}$, G_{M_n} , G_{M_k} – маса утфелю, маси кристалів в утфелі та міжкристального розчину відповідно на початку та в кінці процесу кристалізації охолодженням, кг; $Цк_y$, $Цк_{M_n}$, $Цк_{M_k}$, $Hу_y$, $Hу_{M_n}$, $Hу_{M_k}$, CP_y , CP_{M_n} , CP_{M_k} , W_y , W_{M_n} , W_{M_k} – масові частки сахарози, нецукрів, сухих речовин та води в утфелі та у міжкристальному розчині відповідно на початку та в кінці процесу, %.

При математичному описі кристалізації сахарози охолодженням необхідно визначити кількість сахарози у міжкристальному розчині. Її визначають із формули

$$\frac{G_M Цк_M}{100\%} = W_y H_0(t, Ч_M) K_{пер}, \quad (6)$$

тоді:

$$Цк_M = \frac{W_y H_0(t, Ч_M) K_{пер}}{G_M} 100\%, \quad (7)$$

де G_M – маса міжкристального розчину, кг; $Цк_M$ – масова частка сахарози в міжкристальному розчині, %; W_y – маса води в утфелі; $H_0(t)$ – коефіцієнт розчинності сахарози, як функція температури, $K_{пер}$ – коефіцієнт пересичення утфелю.

Залежність коефіцієнту розчинності сахарози від температури та чистоти розчину визначаємо за рівнянням регресії третього порядку, отриманим нами методом найменших квадратів

$$\begin{aligned} H_0(t, Ч) = & 1,0502 + 0,1903t - 0,01827Ч + \\ & + 6,084 \cdot 10^{-5} t^2 + 6,926 \cdot 10^{-3} Ч^2 - 4,1505 \cdot 10^{-3} tЧ + \\ & + 6,429 \cdot 10^{-6} t^3 - 5,244 \cdot 10^{-6} Ч^3 - \\ & - 8,317 \cdot 10^{-6} t^2Ч + 2,821 \cdot 10^{-5} tЧ^2 \end{aligned}, \quad (8)$$

де t – температура продукту, °С; $Ч$ – чистота цукрового розчину.

Вважаємо, що в процесі кристалізації охолодженням вміст нецукрів та

води в міжкристальному розчині залишається незмінним. Тоді для будь-якої температури утфелю в процесі охолодження $t_i = t_n \mathbf{K} t_k$:

$$\text{маса міжкристального розчину} \quad G_{M_i} = W_y H_0(t_i, \mathcal{U}_{M_i}) K_{nep} + \frac{G_y H u_y}{100\%} + \frac{G_y W_y}{100\%}, \quad (9)$$

$$\text{маса кристалів} \quad G_{kp_i} = G_y - G_{M_i}, \quad (10)$$

$$\text{вміст кристалів} \quad Kp_i = \frac{G_{kp_i}}{G_y} 100\%, \quad (11)$$

а масові частки сахарози, нецукрів, сухих речовин та води в міжкристальному розчині, а також його чистоту визначаємо за рівняннями:

$$\mathcal{U}_{K_{M_i}} = \frac{W_y H_0(t_i, \mathcal{U}_{M_i}) K_{nep}}{G_{M_i}} 100\% \quad (12)$$

$$Hu_{M_i} = \frac{G_y H u_y}{G_{M_i}} 100\% \quad (13)$$

$$CP_{M_i} = \frac{W_y H_0(t_i, \mathcal{U}_{M_i}) K_{nep} + G_y H u_y}{G_{M_i}} 100\% \quad (14)$$

$$W_{M_i} = \frac{G_y W_y}{G_{M_i}} 100\% \quad (15)$$

$$\mathcal{U}_{M_i} = \frac{\mathcal{U}_{K_{M_i}}}{CP_{M_i}} 100\% \quad (16)$$

Кількість води чи міжкристального розчину для розкачування моделюють за формулою

$$G_p = \frac{G_y (CP - CP_y)}{CP_p - CP}, \quad (17)$$

де G_p , G_y – маса води чи цукрового розчину на розкачку; CP_p , CP_y , CP – сухі речовини цукрового розчину на розкачку, утфелю на початку кристалізації та в кінці відповідно; $CP_p = 0$ при розкачці водою.

Залежності (9)–(17) являють собою математичний опис моделі процесу

кристалізації сахарози охолодженням.

Для встановлення адекватності побудованої моделі реальному процесу нами проведено ряд лабораторних досліджень на розробленій нами лабораторній установці. Методикою проведення досліджень передбачено темп охолодження утфелю від 73 °С до 41 °С, після чого здійснювали нагрівання утфелю до 46 °С і продовжували охолоджувати до 40 °С. Корисна різниця температури в процесі охолодження складала 10–12 °С, що відповідає встановленому нами [3] та прийнятому показнику за типовим режимом [1]. Результати лабораторних досліджень наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Дані промисловості та лабораторних експериментів

Показник	Одиниця вимірювання	Початок кристалізації	Перед розкачкою, чи проміжним нагрівом	Кінець кристалізації
1	2	3	4	5
Дані промисловості при розкачуванні водою				
Утфель:				
СР	%	90,2	–	89,6
Ц	%	72,2	–	77,2
Чистота	%	85,6	–	86,2
Міжкристальний розчин:				
СР	%	80,4	–	80,00
Ц	%	58,8	–	54,20
Чистота	%	73,1	–	67,75
Дані лабораторних експериментів				
Утфель:				
СР	%	91,10	91,10	91,10
Ц	%	72,79	72,78	72,77
Чистота	%	79,90	79,89	79,88
Міжкристальний розчин:				
З розкачуванням водою				
СР	%	80,40	79,80	79,80
Ц	%	58,00	55,05	54,41
Чистота	%	72,14	68,98	68,18
З розкачуванням мелясою				
СР	%	80,40	80,40	80,40
Ц	%	58,00	53,96	53,80
Чистота	%	72,14	67,12	66,90
З проміжним підігрівом				
СР	%	80,40	79,60	79,20
Ц	%	58,00	51,82	50,60
Чистота	%	72,14	65,10	63,89

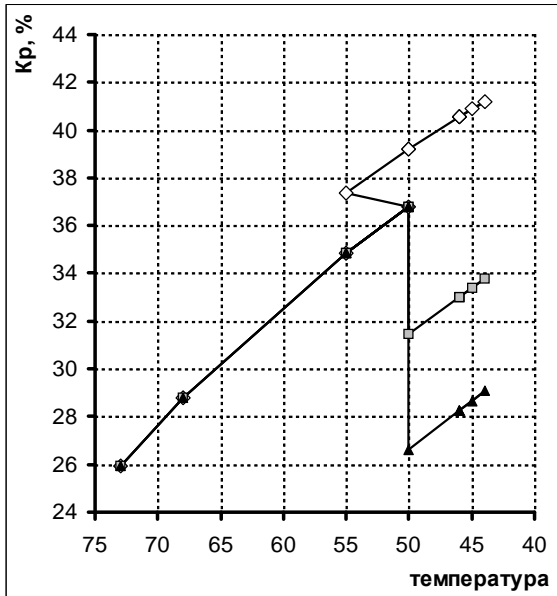
За побудованою моделлю (9)–(17) також проведено ряд обчислювальних експериментів, результати яких представлено у вигляді таблиці 2 та графіків на рисунку 2.

Таблиця 2 – Дані обчислювальних експериментів

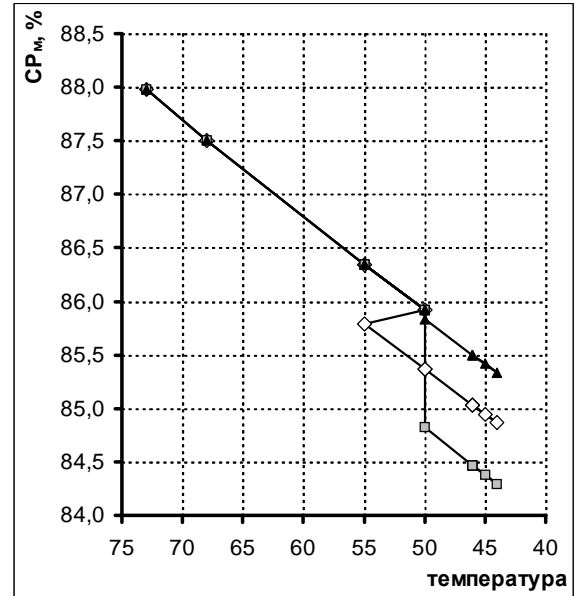
Показник	Одиниця вимірювання	Початок кристалізації	Перед розкачкою	Кінець кристалізації
1	2	3	4	5
З розкачуванням водою				
Утфель				
СР	%	91,10	91,10	89,6
Ц	%	72,79	72,79	71,59
Чистота	%	79,90	79,90	79,90
Міжкристальний розчин				
СР	%	87,98	86,34	84,29
Ц	%	63,26	58,24	57,10
Чистота	%	71,90	67,45	67,73
З розкачуванням мелясою				
Утфель				
СР	%	91,10	91,10	89,6
Ц	%	72,79	72,79	68,20
Чистота	%	79,90	79,90	76,12
Міжкристальний розчин				
СР	%	87,98	86,34	85,34
Ц	%	63,26	58,24	55,70
Чистота	%	71,90	67,45	64,65
З проміжним підігрівом				
Утфель				
СР	%	91,10	91,10	91,10
Ц	%	72,79	72,79	72,79
Чистота	%	79,90	79,90	79,90
Міжкристальний розчин				
СР	%	87,98	86,34	85,03
Ц	%	63,26	58,24	54,23
Чистота	%	71,90	67,45	63,78

Очевидно, що при проведенні розкачування водою, не тільки зменшується вміст кристалів в утфелі в кінці кристалізації, але і збільшується чистота міжкристального розчину.

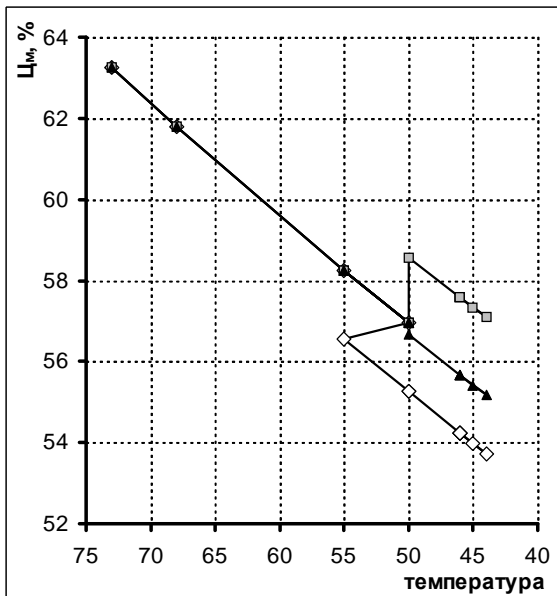
Для доведення утфелю до заданої масової частки сухих речовин на розкачування необхідно набагато більше меляси ніж води. Саме цим можна пояснити найменший вміст кристалів в утфелі після розкачування та в кінці кристалізації за схемою з розкачуванням мелясою. Крім того, зниження чистоти міжкристального розчину в цьому випадку досягається не за рахунок його знецукрення, а за рахунок підвищеного вмісту нецукрів, внесених розкачкою.



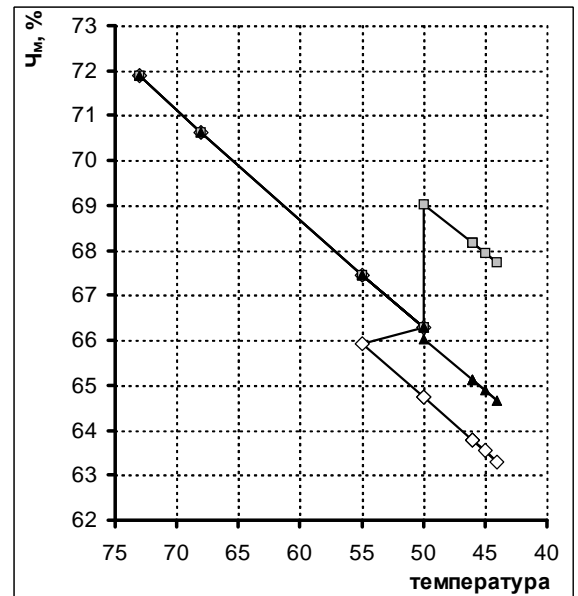
а



б



в



г

- – з рокачуванням водою;
- ▲ – з розкачуванням м'ясою;
- ◇ – з проміжним підігрівом;
- а – вміст кристалів в утфелі;
- б – масова частка сухих речовин міжкристального розчину;
- в – масова частка сахарози міжкристального розчину;
- г – чистота міжкристального розчину

Рисунок 2 – Зміна технологічних характеристик утфелю в процесі кристалізації охолодженням.

Виключення розкачування утфелю водою чи міжкристальним розчином

та заміна їх проміжним підігрівом зменшує вихід меляси та вміст розчиненої сахарози в наслідок того, що мелясоутворюючий коефіцієнт води становить 2,3–2,7, а також збільшує вміст кристалів. При застосуванні проміжного підігріву ефект кристалізації складає 8,13–8,25 % в порівнянні з розкачуванням водою, де він складає 3,74–3,96 %, та розкачуванням цукровим розчином – 5,24–6,7 %.

Крім того, спостерігається суттєве покращення гранулометричного складу кристалів при застосуванні проміжного нагрівання утфелю в бік значного зростання долі кристалів фракції 0,63–1,0 мм і >1,0 мм. При цьому важливу роль в покращенні гранулометричного складу цукру відіграє рекристалізація [5], тобто розчинення дрібних кристалів цукру та перенесення відповідної кількості сахарози з розчину на поверхню існуючих кристалів.

Висновки

Побудована нами імітаційна модель процесу кристалізації сахарози охолодженням з високою точністю описує процес повністю відображає характер перебігу процесу кристалізації сахарози охолодженням і може бути використана в практиці цукрового виробництва.

Використання проміжного нагрівання утфелю останнього продукту взамін розкачок його водою чи цукровими розчинами зводить до мінімуму вторинне кристалоутворення, створює сприятливі умови для інтенсивної рекристалізації та підвищує ефект кристалізації в перемішувачах-кристалізаторах.

Література

1. Технологічний процес виробництва цукру з цукрових буряків. Правила усталеної практики 15.83–37–106:2007. // Ярчук М.М., Калінченко М.Ф., Чупахіна В.Н. – К.: Цукор України. 2007,– 420 с.
2. Мирончук В.Г., Єщенко О.А. Методика моделювання процесу промислової кристалізації цукрози. // Харчова промисловість – К.: НУХТ, 2009 – № 8, с. 87-90.
3. Мирончук В.Г. Кристалізація цукру у вертикальних кристалізаторах з подовженим терміном охолодження // Наукові праці НУХТ, №4, 1998.– с.66-67.
4. Попов В.Д. Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарозы. – М.: Пищевая пром-сть, 1973. –320 с.
5. Бажал І.Г., Куриленко О.Д. Перекондинсація в дисперсних системах. – К.: Наукова думка. 1975.– 216 с.