

Є.М. Бабко, к-т техн. наук
 В.Г. Мирончук, д-р техн. наук
 С.Ю. Лементар, к-т техн. наук

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ВВЕДЕНОЇ ЗОВНІ ВОДЯНОЇ ПАРИ НА ПРОЦЕС УВАРЮВАННЯ ЦУКРОВИХ УТФЕЛІВ

Для того щоб визначити особливості впливу зовнішньої водяної пари на процес уварювання цукрових утфелів, використовували лабораторну установку (рис. 1), в процесі розроблення якої

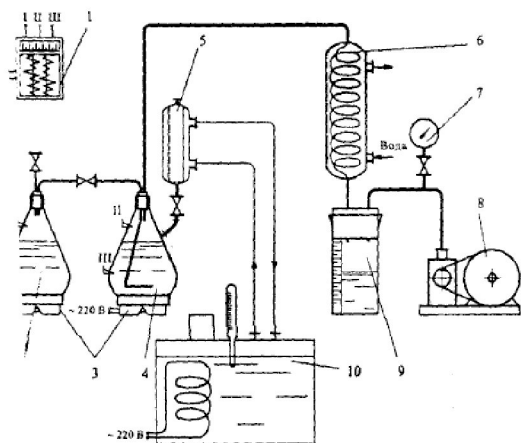


Рис. 1. Схема лабораторної дослідної установки:
 1 — потенціометр КСМ-2; 2 — парогенератор; 3 — нагрівальні елементи ЛТМ2000; 4 — реактор з барботером; 5 — теплообмінник;
 6 — конденсатор; 7 — вакууметр; 8 — вакуум-насос;
 9 — вимірник конденсату; 10 — термостат U10

Бабко, В.Г. Мирончук, С.Ю. Лементар, 2003

було враховано фізичну та кінетичну подібність [1]. Фізична подібність забезпечувалась постійними початковими фізичними властивостями цукрового утфелю, а кінетична — тим, що швидкість елементарних актів взаємодії парової бульбашки з елементарними комірками утфелю не залежить від масштабу апарата при постійності технологічних та фізичних параметрів.

Проведено експериментальні дослідження з визначення впливу введеної зовнішньої водяної пари на інтенсивність процесу кристалізації цукрового утфелю в умовах кипіння та при наявності вакууму в системі.

Методика досліджень передбачала однакові початкові умови дослідів: концентрація чистого цукрового розчину в реакторі $CP = 75\%$, тиск у вакуумній системі $4,2 \cdot 10^4$ Па, об'єм цукрового розчину 650 мл.

Вплив введеної зовнішньої водяної пари на характеристики цього утфелю визначали за інтенсивністю випарювання води з утфелю за умов кипіння при вакуумі, при введенні зовнішньої штучної (модельної) цукрової утфелю водяної пари та без її введення.

Суть моделювання утфелю полягала в тому, що готували утфель, подібний до природного. Розрізняють моделювання математичне і фізичне. В цій роботі ми застосували принцип фізичного моделювання, зберігши фізичну природу речовини, що досліджується, — цукрового утфелю. При цьому, завдяки трьом теоремам подібності, спостерігаються: часова подібність, подібності фізичних величин, початкових умов, граничних умов.

Подібність початкової умови полягала в тому, що ми додержували однакових початкових умов процесу кристалізації (температура, тиск у реакторі, ізогідричний перебіг процесу і под.).

Виходячи із фізико-хімічних властивостей цукрових утфелів, режимів процесу варіння і кристалізації, а також принципів моделювання застосували розмір кристалів $d_{cp} = (0,18 \pm 0,02)$ мм, відсотковий вміст яких в утфелі становив 30 %. Вибір 30 % вмісту кристалів зумовлений структурно-реологічними властивостями цукрових утфелів.

Під час дослідів заміряли та реєстрували такі характеристики:

1. Якість сиропу початкового набору і сиропу, що підкачується.
2. Якість утфелю, починаючи з моменту першої підкачки і до кінця уварювання.
3. Гранулометричний склад кристалів цукру.
4. Кількість цукрового розчину початкового набору та підкачок.
5. Температури введеної ззовні водяної пари, підкачок, вторинної пари.
6. Кількість випареної води.
7. Абсолютний тиск у реакторі.
8. Час початку набору в реактор цукрового розчину, час введення водяної пари в цукровий утфель, початок і кінець кожної підкачки, початок і кінець введення пари, час випуску утфелю із реактора.

Технологічні характеристики утфелю визначали за допомогою його проб, використовуючи методи хіміко-технологічного контролю цукрубарякового виробництва [2]. Визначали вміст сухих речовин і цукрози в утфелі за допомогою кристалічного розчину.

Гранулометричний склад цукру визначали за допомогою ситового аналізу цукру, що отриманий після центрифугування утфелю першого продукту на спеціальній лабораторній центрифугі типу Janetzki TZ2 (модель 1) з частотою обертання 2800 хв^{-1} . Фракційний склад отриманого кристалічного цукру виконували на спеціальній машині з набором стандартних сит.

Методика досліджень побудована таким чином, що результати дослідів дали можливість кількісно оцінити вплив введеної водяної пари на якісні характеристики першого продукту, на питомі втрати нагрівної пари та на швидкість рекристалізації.

Результати проведених лабораторних досліджень показали, що гранулометричний склад цукру у разі введення ззовні водяної пари в киплячий цукровий розчин у кількості 2...3 % сприяє збільшенню розмірів кристалів цукру (рис. 2) та скороченню тривалості варіння на 15...25 %.

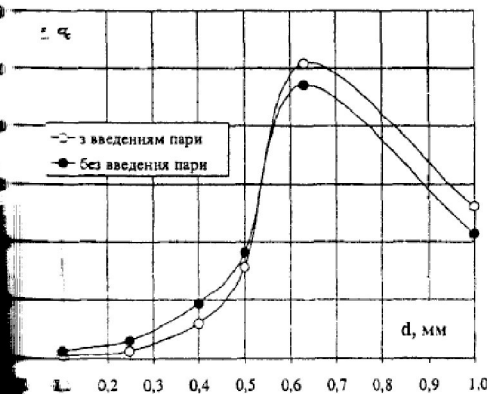


Рис. 2. Розподіл кристалів цукру за розмірами (лабораторні дані)

Щоб визначити оптимальну кількість введеної ззовні в киплячий цукровий утфель водяної пари під час уварювання, ми проаналізували дані роботи [3]. В результаті отримали залежності швидкості кристалізації цукрози dG/dt впродовж часу уварювання при різній кількості введеної ззовні в киплячий цукровий утфель водяної пари (рис. 3). Кількість її введення при цьому змінювали в

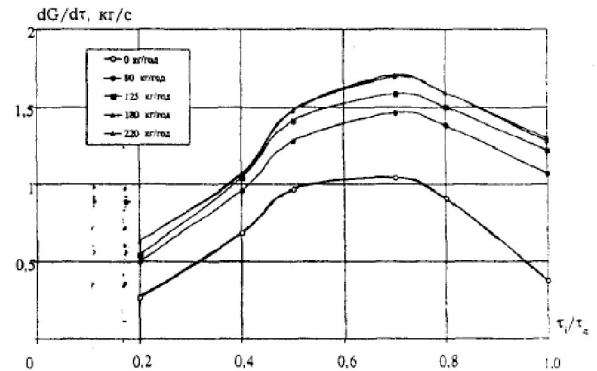


Рис. 3. Залежність швидкості кристалізації цукрози утфелю III від тривалості варіння при додатковому введенні пари (промислові дані)

інтервалі 80...220 кг/год, що відповідає 1,28...3,52 % кількості введеної ззовні водяної пари від загальних витрат пари на повний цикл роботи вакуум-апарата. Аналіз показує, що введення ззовні водяної пари понад 3,5 % вже не дає суттєвої інтенсифікації процесу кристалізації.

Оптимальну кількість введеної ззовні водяної пари в киплячий цукровий розчин останнього продукту ми визначали методом математичного моделювання результатів експерименту. Щоб побудувати план другого порядку і створити квадратичну математичну модель, застосовували матрицю оптимального планування Бокса (B_d) [4]. Цей метод належить до D-оптимальних методів, які гарантують отримання максимальної кількості достовірної інформації при проведенні мінімальної кількості експериментів.

Факторами впливу були вибрані: кількість додатково введеної ззовні в киплячий цукровий розчин водяної пари Q , % від загальних витрат пари на повний цикл роботи вакуум-апарата, та відносна тривалість уварювання τ_1/τ_0 .

Швидкість кристалізації цукру останнього продукту розглядалася як змінна стану.

Була проведена нормалізація незалежних факторів за допомогою безрозмірних змінних, рівні варіювання яких наведено в табл. 1, де $X1 = (Q - Q_0) / \Delta Q$; $X2 = (\tau_1/\tau_0 - \tau_1/\tau_0) / (\Delta \tau_1/\tau_0)$.

Таблиця 1

Рівень	Рівні факторів плану B_d		
	Код	X1	X2
Нижній	-1	0	0,2
Верхній	+1	3,52	1,0
Нульовий	0	1,76	0,6
Інтервал варіювання		1,76	0,4

Згідно з проведеними дослідями ми склали матрицю планування (табл. 2).

Таблиця 2

Матриця планування і результати експерименту

План			dG/dt, кг/год	
X1	X2	X3	Експериментальне значення	Розраховане за моделлю
-1	+1	+1	1,283	1,310
-1	+1	+1	0,633	0,605
-1	-1	+1	0,380	0,416
-1	-1	+1	0,283	0,264
+1	+1	-1	1,283	1,310
-1	+1	-1	0,633	0,605
+1	-1	-1	0,380	0,416
-1	-1	-1	0,283	0,264
+1	0	0	1,170	1,044
-1	0	0	0,520	0,615
0	+1	0	1,630	1,633
0	-1	0	1,050	1,016
0	0	+1	1,490	1,505
0	0	-1	1,490	1,505
0	0	0	1,465	1,505
0	0	0	1,485	1,505
0	0	0	1,490	1,505
0	0	0	1,470	1,505
0	0	0	1,475	1,505
0	0	0	1,480	1,505

$$F_{\text{розрах}} = S_{\text{ад}}^2 / S_{\text{вигр}}^2 \quad (7)$$

де $S_{\text{ад}}^2$ — дисперсія адекватності, яка характеризує відхилення результатів експерименту відносно лінії регресії; $S_{\text{вигр}}^2$ — дисперсія відтворюваності, яка характеризує похибку дослідів при незмінних значеннях факторів.

Визначаючи дисперсії відтворюваності, використовували результати досліджень у центрі плану.

Розрахунковий критерій Фішера для цієї моделі $F_{\text{розрах}} = 0,147$, що менше табличного його значення $F_{\text{табл}} = 3,050$, визначеного для рівня значимості 5 %.

Після підтвердження адекватності математичної моделі рівняння (6) переводили із кодового вигляду в натуральний і для практичних розрахунків використовували формулу

$$G = -0,62 + 5,26\tau - 4,225\tau^2 - 0,181Q^2/2,56 + 0,138\tau Q/0,64 + 0,29Q \quad (8)$$

Пошук мінімуму поверхні відклику проводили із застосуванням градієнтного методу. Отримали найбільше значення швидкості кристалізації цукру при оптимальному значенні кількості введеної ззовні водяної пари в утфельну масу $Q = 1,96$ % від загальних витрат пари на повний цикл роботи вакуум-апарата.

Висновки.

1. Введення ззовні водяної пари в киплячий утфель підвищує швидкість його циркуляції і, відповідно, частоту обміну утфельної маси біля поверхні нагрівання, що, завдяки рекристалізації, поліпшує якісні характеристики цукру та інтенсифікує приріст масової частки кристалів в утфелі.

2. Створено математичну модель для визначення оптимальної кількості введеної ззовні в киплячий цукровий утфель водяної пари для інтенсифікації процесу кристалізації цукрози у вакуум-апаратах.

3. Встановлено, що для інтенсифікації процесу масової кристалізації цукрози у вакуум-апаратах оптимальна кількість додатково введеної водяної пари в утфельну масу становить 2...3 % від загальних витрат пари на повний цикл роботи вакуум-апарата.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гухман А.Л. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. — М.: Выш. шк., 1974. — 326 с.
2. Бугаенко К.Ф. Специальные технологические расчеты сахарного производства. — М.: Агропромиздат, 1996. — 136 с.
3. Mironchuk W.G., Guliy I.S. Mass sugar crystallization features under effect of a water vapour // Proceedings of the 21st General Assembly CITS. — Berlin. — "Bartens" — Zuckerindustrie. — 1999. — P. 319-325.
4. Бондарь А.Г., Статюха Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии. — К.: Вища шк., 1976. — 183 с.

Надійшла до редколегії 25.08.2000 р.

значення коефіцієнтів у рівнянні регресії

$$b_0 = \bar{y} - \sum_{i=1}^n b_i + \sum_{i=1}^n (b_{ii} x_i) + \sum_{i=1}^n (b_{iii} x_i^2) \quad (1)$$

формулами:

$$b_0 = A \sum_{g=1}^N y_g - B \sum_{i=1}^n \sum_{g=1}^N (x_{ig}^2 y_g); \quad (2)$$

$$b_i = 0,5 \sum_{g=1}^N (x_{ig}^2 x_{ig}) - B \sum_{g=1}^N y_g - C \sum_{i=1}^n \sum_{g=1}^N (y_{ig}^2 y_g); \quad (3)$$

$$b_i = D \sum_{g=1}^N x_{ig} y_g; \quad (4)$$

$$b_{ij} = E \sum_{g=1}^N (x_{ig} x_{jg} y_g), \quad (5)$$

— комплекси, розраховані для оптимальних кількостей незалежних факторів [4]; n — кількість факторів; N — кількість експериментів; y_g — значення змінної стану.

— незалежність швидкості кристалізації продукту від кількості введеної ззовні водяної пари процесу уварювання:

$$G = -0,214X1 + 0,309X2 - 0,676X1^2 + 0,138X1X2 - 0,181X2^2 \quad (6)$$

— значення одержаної математичної моделі критерієм Фішера