

**УДК 664.126.4.054**

**В.Г. МИРОНЧУК**, доктор технічних наук

**О.А. ЄЩЕНКО**, кандидат технічних наук

*Національний університет харчових технологій*

## **МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОМИСЛОВОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЦУКРОЗИ**

*Процес багатоступеневої кристалізації цукрози розглянуто як об'єкт технології, до якого можна застосовувати математичний рівень абстрагування. Проаналізовано зв'язки між об'єктами та наведено математичний опис передаточних функцій окремих об'єктів.*

**Ключові слова:** *багатоступенева кристалізація цукрози, об'єкт технології, параметри об'єкту технології, послідовний зв'язок, зворотний зв'язок.*

*Процесс многоступенчатой кристаллизации сахарозы рассмотрен как объект технологии, к которому можно применить математический уровень абстрагирования. Проанализированы связи между объектами и приведено описание передаточных функций отдельных объектов.*

**Ключевые слова:** *многоступенчатая кристаллизация сахарозы, объект технологии, параметры объекта технологии, последовательная связь, обратная связь.*

Процес промислової кристалізації цукрози відбувається за кілька етапів, отже, відноситься до багатоступневих задач. Процес багатоступеневої кристалізації цукрози, що відбувається в певному апараті визначеної конструкції та технологічного призначення умовимося називати простим об'єктом технології. Цей же процес, що відбувається в кількох апаратах продуктового відділення, багатоступенево, слід віднести до складних об'єктів. Обидва об'єкти технології знаходяться під впливом цілого ряду вхідних факторів, а реакції на їх виході визначаються вихідними параметрами. Між факторами впливу та параметрами на виході існує взаємозв'язок, що і характеризує перебіг процесу в об'єкті [1]. Крім того, об'єкт може зазнавати

збудження і для його компенсації використовується певна керуюча дія (керування). Вхідні параметри можуть зазнавати зміни. До таких змін можна віднести кількість та якість початкових продуктів. Керуючі параметри змінюють у відповідності до визначеного регламенту технологічного процесу кристалізації. До них відносяться вміст сухих речовин, температура, кількість продуктів і т.п. Серед загальних властивостей вхідних та керуючих параметрів важливо те, що вони не залежать від процесу, що протікає в об'єкті, і тому відносяться до зовнішніх параметрів. До збуджуючих відносимо параметри, значення яких змінюється ймовірним чином протягом часу (рис. 1).

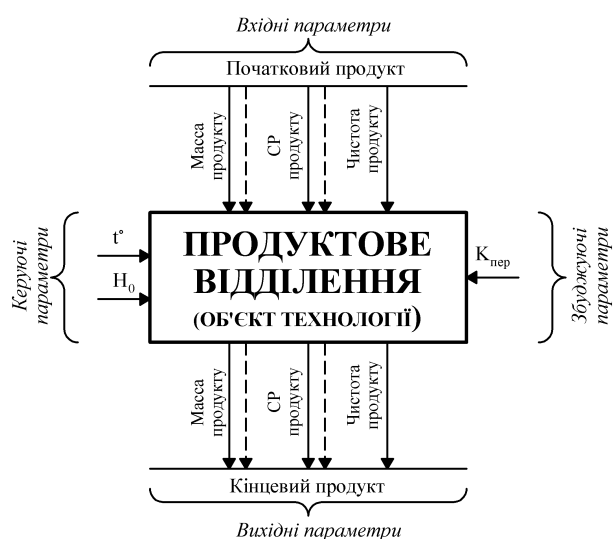


Рис. 1. Загальний вигляд об'єкту технології

Вихідні параметри визначаються режимом процесу і характеризують його стан. Вони виникають як результат взаємодії вхідних, збуджуючих та керуючих параметрів. Для здійснення моделювання нами прийняті певні обмеження у виборі цих параметрів, а саме: для вакуум-апаратів – кількісні та якісні показники утфелю, центрифуг – кількісні та якісні показники цукру та відтоків, для а

для процесу в цілому – товарного цукру та меляси.

Вхідні та вихідні параметри пов'язані між собою залежностями (передаточною функцією)  $Y_i = F_i(X_i)$ , що визначають перебіг процесу в об'єкті.

Апаратно-технологічні схеми продуктивних відділень цукрових заводів складаються з декількох елементів, що взаємопов'язані між собою. При моделюванні таких складних об'єктів доцільно розділяти їх на ряд ланок і потім складати з них структурні схеми. В продуктивних відділеннях цукрозаводу можна виділити ділянки, які повторюються в процесі або в апараті, відрізняються від інших ділянок типом процесу, технологічно або

конструктивно є самостійними частинами установки або технологічної лінії. Нами як окремі складні об'єкти, виділено станції кристалізації, які в свою чергу вміщують в собі об'єкти “вакуум-апарати”, “центрифуги” тощо.

Об'єкти технології в багатоступеневій кристалізації цукру пов'язані між собою паралельним, послідовним та зворотним ходом продуктових потоків (рис. 2) [2].

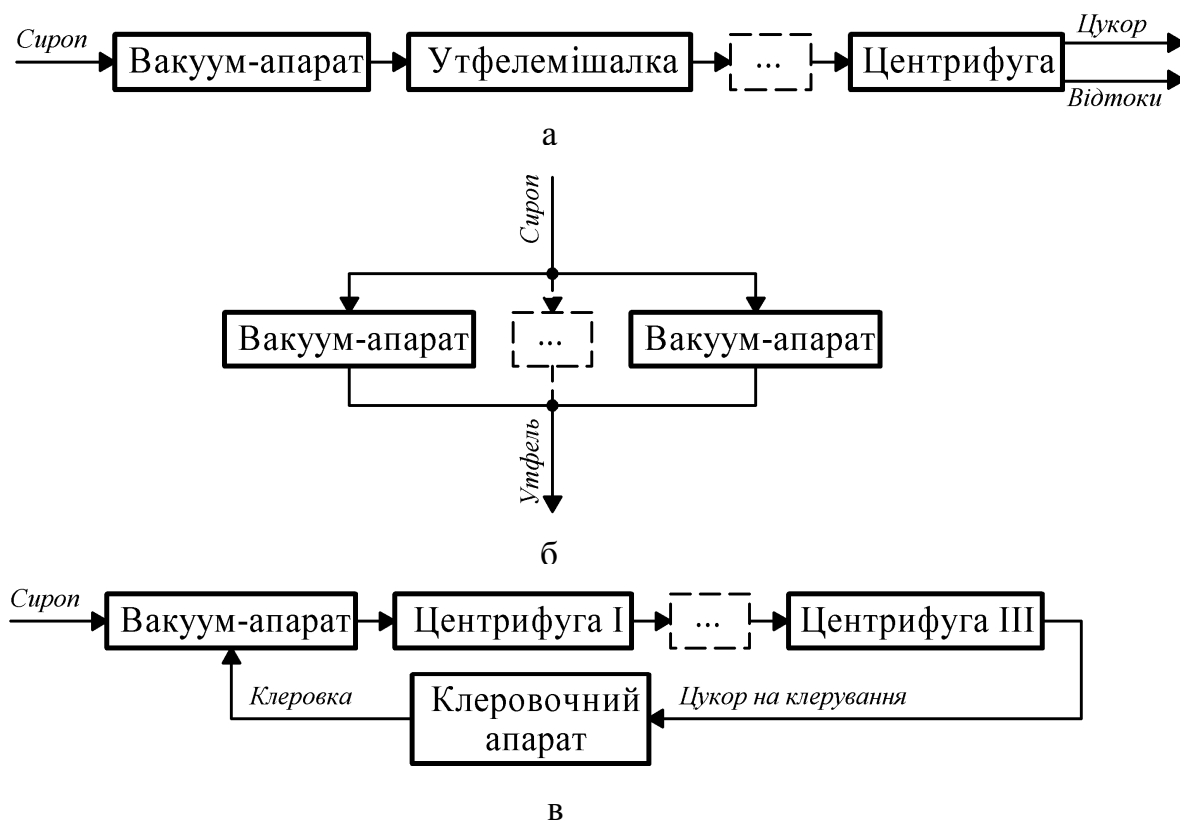


Рис. 2. З'єднання елементів: а – послідовне; б – паралельне;  
в – зворотний зв'язок

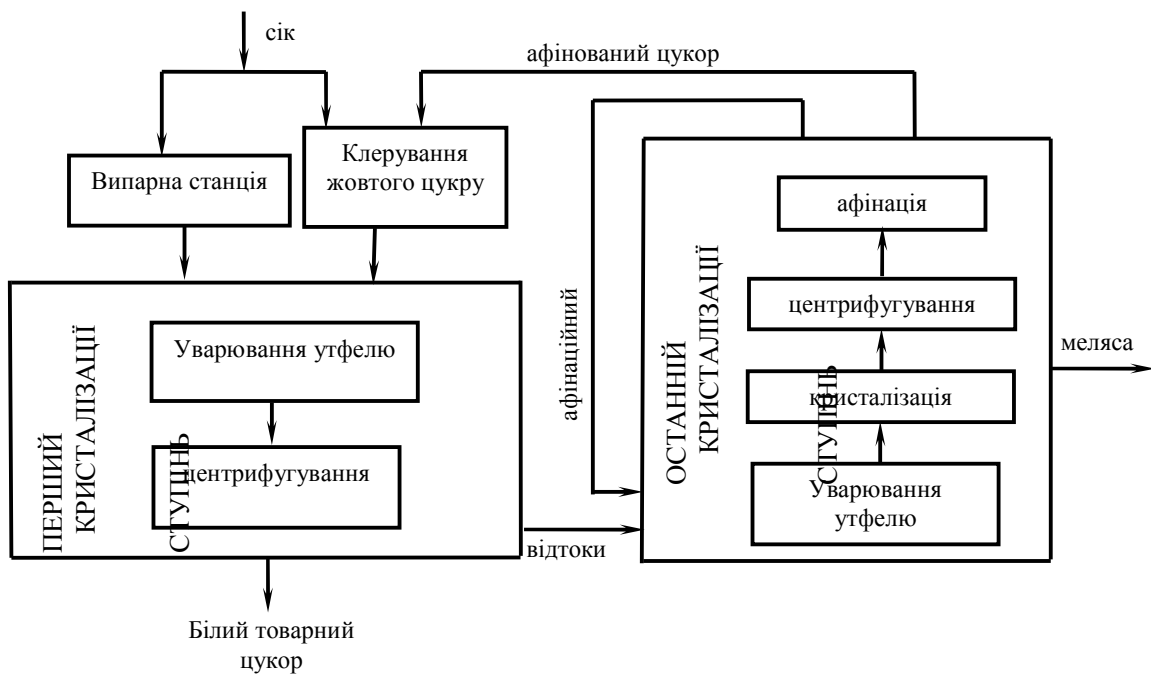
Зворотний зв'язок проявляється у відображеному впливі на процес його власної дії. Основна ідея зворотного зв'язку полягає в тому, щоб використовувати відхилення та проміжні виходи об'єкту для формування керування об'єктом та його стабілізації. Зворотний зв'язок може мати позитивний чи негативний вплив на об'єкт дослідження. Це необхідно з'ясувати в кожному конкретному випадку встановлення зворотного зв'язку в системі. Зворотний зв'язок може бути як місцевим, охоплюючи одну або кілька ланок, так і загальним, охоплюючи всю систему в цілому.

Отже, для побудови моделі промислової багатоступеневої кристалізації цукрози останню розглядаємо як складний об'єкт технології, який складається з кількох об'єктів, що подібні між собою – ступенів кристалізації. Кожний об'єкт “ступінь кристалізації” також є складним, і до кожного з них входять об'єкти, які у відповідності до обраного нами рівня абстрагування, вважаємо простими: “уварювання утфелю”, “центрифугування утфелю”, “пробілювання утфелю в центрифугах”, “афінація” тощо [3].

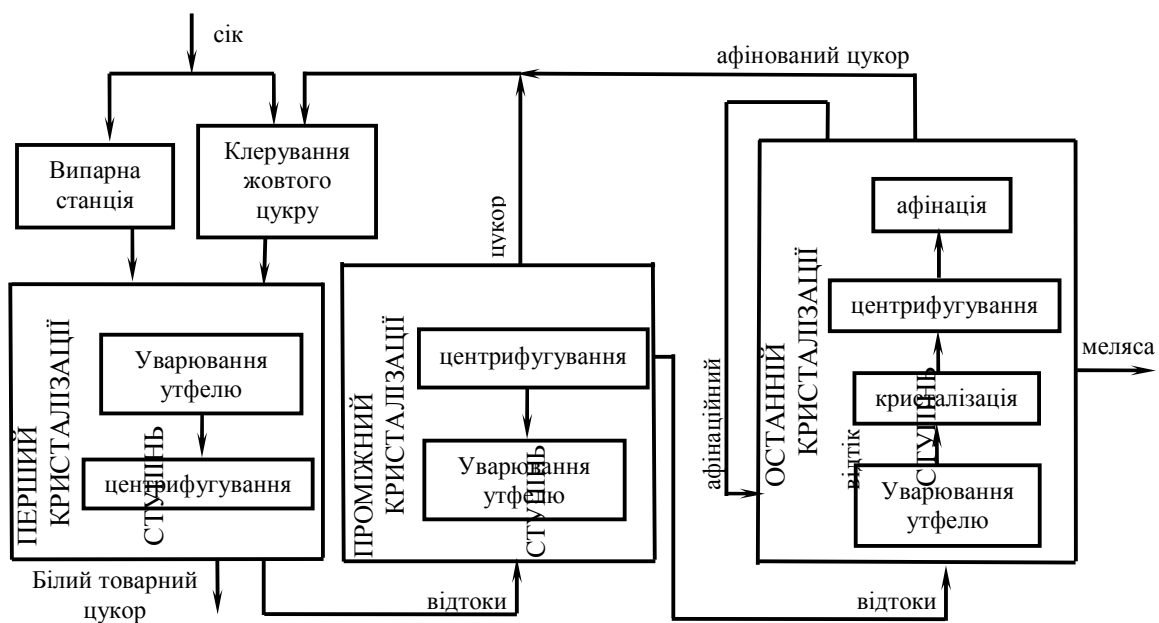
Всі введені об'єкти технології пов'язані між собою у відповідності до обраної апаратурно-технологічної схеми. При цьому частина виходів попереднього об'єкта є входами наступного.

Якщо з'єднати послідовними зв'язками кілька об'єктів “станція кристалізації”, то отримаємо послідовну модель багатоступеневої кристалізації цукрози. Теоретично така модель є нескінченою. В умовах кристалізації цукрози вона є кінцевою, що обумовлено неможливістю кристалізації цукрових розчинів нижньої межі чистоти. Крім того, реальний промисловий процес багатоступеневої кристалізації цукрози здійснюється з поверненням частини продуктів, тобто є рециркуляційним. З точки зору моделювання, продукти, що рециркулюють, є як вихідними так і вхідними параметрами процесу кристалізації, тобто рециркуляція проявляється у впливі на процес його власної дії. Це властивість зворотного зв'язку. Отже, процес промислової кристалізації цукру слід розглядати як такий, що має зворотні зв'язки. Вони можуть бути місцевими (наприклад, рециркуляція других відтоків “на себе”) та загальними (наприклад, повернення клеровки цукрів проміжної та останньої кристалізацій).

Модель двопродуктової схеми містить два об'єкти “ступінь кристалізації” (рис. 3 а), які пов'язані між собою послідовним зв'язком “перший ступінь” → “останній ступінь” та зворотним зв'язком “останній ступінь” → “перший ступінь”. Послідовним зв'язком передаються параметри відтоків першої кристалізації на вхід останньої кристалізації, а зворотним – параметри афінованого цукру останньої кристалізації на клерування та клеровки на уварювання першого продукту. Основними вхідними параметрами такої моделі



а



б

Рис. 3. Об'єкти технології типових схем та зв'язки між ними:  
 а – двопродуктова схема; б – трипродуктова схема

є характеристики початкового сиропу, а основними виходами – характеристики товарного цукру та меляси.

Для побудови моделі трипродуктової схеми введемо в модель двопродуктової схеми додатковий об'єкт “проміжний ступінь кристалізації”, що моделює проміжний продукт. Новий об'єкт (рис. 3 б) пов'язується з уже існуючими в моделі об'єктами як послідовними, так і зворотним зв'язком.

Структурно модель трипродуктової схеми є більш повною та гнучкішою за двопродуктову. На основі трипродуктової схеми можна легко побудувати модель двопродуктової схеми, а також замінити моделювання афінації моделюванням пробілювання цукру останньої кристалізації водою в центрифугах. В такій гнучкості моделі також проявляється її подібність до трипродуктової схеми. Зв'язки між блоками (простими об'єктами) структурної схеми доцільно задавати у вигляді графа, вершинами якого є об'єкти, а ребра позначають передачу управління між ними (продуктові потоки) [4]. Математичний опис структурної схеми моделі еквівалентний математичному опису об'єкта технології [5].

Для математичного опису передаточних функцій окремих об'єктів та встановлених у моделі зв'язків доцільно використовувати балансові рівняння та фізичні залежності (рис. 4). Основою для математичного опису промислового процесу кристалізації цукрози буде матеріальний баланс процесу [6, 7].



Рис.4. Склад математичного опису процесу промислової кристалізації цукрози

Рівняння матеріального балансу процесу кристалізації по всій речовині:

$$G_n = G_m + G_{кр} + W,$$

по цукрозі:

$$G_n Цк_n = G_m Цк_m + G_{кр},$$

по нецукрам:

$$G_n Нц_n = G_m Нц_m,$$

по сухим речовинам:

$$G_n CP_n = G_m CP_m + G_{кр},$$

по воді:

$$G_n W_n = G_m W_m + W,$$

де  $G_n$ ,  $G_{кр}$ ,  $G_m$  – маси початкового розчину, кристалів, що утворилися та міжкристалевого розчину відповідно, кг;  $Цк_n$ ,  $Цк_m$  – масові частки цукрози відповідно у початковому розчині та міжкристальному розчині, %;  $Нц_n$ ,  $Нц_m$  – масові частки нецукрів відповідно у початковому розчині та міжкристальному розчині, %;  $CP_n$ ,  $CP_m$  – масові частки сухих речовин відповідно у початковому розчині та міжкристальному розчині, %;  $W_n$ ,  $W_m$  – масові частки води відповідно у початковому розчині та міжкристальному розчині, %;  $W$  – маса випареної води, кг.

Для об'єкту “уварювання утфелю” початковим продуктом є сироп, що поступає на уварювання, а вихідними продуктами – готовий утфель та випарена вода. Матеріальний баланс всієї речовини на об'єкті “уварювання утфелю” описується рівнянням

$$G_c = G_y + W, \quad (1)$$

а рівняння балансу сухих речовин

$$G_c CP_c = G_y CP_y,$$

де  $G_c$ ,  $G_y$  – маси початкового сиропу та готового утфелю відповідно, кг;  $CP_c$ ,  $CP_y$  – масова частка сухих речовин відповідно в початковому сиропі та готовому утфелі, %.

Тоді масу випареної води визначаємо за формулою

$$W = G_c \frac{CP_y - CP_c}{CP_y},$$

а масу готового утфелю легко знайти з (1).

Для об'єкту “центрифугування” вхідним параметром є готовий утфель, а вихідними – цукор та відтік. Загальний матеріальний баланс центрифугування

$$G_y = G_m + G_{кр},$$

баланс по воді –

$$W_y = W_m,$$

баланс по цукрози –

$$G_y Цк_y = G_m Цк_m + G_{кр},$$

де  $W_y$ ,  $W_m$  – вміст води відповідно в утфелі і міжкристальному розчині, кг.

Цукроза, розчинена в міжкристальному розчині визначається за формулою  $Цк_m = H_0(t)W_m$ , яку остаточно запусуємо у вигляді

$$G_m Цк_m = W_y H_0(t) K_{пер},$$

де  $H_0(t)$  – коефіцієнт розчинності цукрози,  $K_{пер}$  – коефіцієнт пересичення утфелю.

Наведені рівняння матеріальних балансів математично описують відповідні їм об'єкти, отже, є їхніми математичними моделями.

### Висновки

Запропонована нами методика моделювання процесу промислової кристалізації цукрози дає можливість в умовах обчислювального експерименту з високою точністю прослідкувати в розвитку динаміки процесу хід кристалізації і отримувати оперативну інформацію про стан роботи продуктового відділення і його результати. Змінюючи об'єкти технології зв'язки між ними, вхідні, керуючі і збуджуючі параметри процесу можливо моделювати роботу будь-якої схеми кристалізації цукрового заводу з високим ступенем точності.

## Література

1. *Бондарь А.Г.* Математическое моделирование в химической технологии. – К.: Вища школа, 1973. – 280 с.
2. *Энциклопедия кибернетики.* – К.: Главная редакция украинской советской энциклопедии, 1975. – Т. 2. – 624 с.
3. *Мирончук В.Г., Ещенко О.А.* Имитационное моделирование: экспертная оценка и оптимизация работы продуктового отделения сахарного завода // Сахар, №1. – 2004. – С. 44–46
4. *Зыков А.А.* Теория конечных графов. –Т. 1 – Новосибирск: 1969. – 542 с.
5. *Мирончук В.Г., Єщенко О.А.* Оптимізація роботи продуктового відділення за допомогою імітаційного моделювання // Цукор України. – №3. – 2003. – С. 13–15.
6. *Процеси і апарати харчових виробництв: підручник за ред. проф. І.Ф. Малежика.* – К.: НУХТ, 2003. – 400 с.
7. *Каганов И.Н., Михатова Т.М.* Химико-технические расчеты и учет в сахарном производстве. — М.: Пищевая промышленность, 1964. — 232 с.