

**В. Г. Мирончук**, д-р техн. наук

**Т. М. Погорілий**, канд. техн. наук

**І. М. Дмитренко**, аспірант

**V. Mironchuk**, Sc.D

**T. Pogoriliy**, Sc.D

**I. Dmitrenko**

Національний університет харчових технологій, м. Київ

*taras22@mail.ru*

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІНУ В ПРОЦЕСІ РЕКРИСТАЛІЗАЦІЇ  
САХАРОЗИ ПРИ УВАРЮВАННІ ЦУКРОВОГО УТФЕЛЮ.**

**MODELING OF HEAT EXCHANGE OF SUCROSE RECRYSTALLIZATION  
DURING BOILING OF SUGAR MASSECUITE.**

*В даній статі змодельовано процес теплообміну між комірками міжкристального розчину сахарози різних розмірів за умови їх одночасного контакту між собою та з паровою бульбашкою, утвореної під час кипіння, за допомогою програмного комплексу FlowVision.*

*На основі моделювання поглиблено теорію процесу рекристалізації за коливальним механізмом.*

**Ключові слова:** моделювання, програмний комплекс FlowVision, рекристалізація.

*The article deals with heat exchange process between cells of sucrose mother liquor of different sizes contacting with each other and with a steam bubble formed during boiling modelled by the software FlowVision.*

*It is improved recrystallization process theory for vibrational mechanism on the basis of modelling.*

**Keywords:** modelling, the software FlowVision, recrystallization.

В цукровому виробництві кристалізація цукру являється

завершаючим етапом, на якому з цукрового розчину видаляють практично чисту сахарозу. Процес кристалізації цукру складається з декількох етапів, а саме: утворення пересиченого розчину, виникнення зародків, ріст кристалів і рекристалізація. Зупинимось детальніше на процесі рекристалізації.

Рекристалізація має велике практичне значення тому що сприяє отриманню крупніших та рівномірніших кристалів завдяки розчиненню дрібних частинок дисперсної системи.

На наш час існують декілька механізмів, які пояснюють протікання процесу рекристалізації. Найбільш прогресивною є теорія процесу рекристалізації за коливальним механізмом [1], яка базується на результатах досліджень по перевірці можливості рекристалізації при постійній температурі, але при механічному перемішуванні (шляхом встряхування) і подібному дослідженні в умовах кипіння. Результати досліджень показали, що на відмінно від першого випадку, в якому не відбувається збільшення кристалів дисперсної системи, в другому випадку через 2 – 3 години середній розмір кристалів збільшився від декількох мікрон до декілька міліметрів, тобто спостерігався інтенсивний процес рекристалізації [1]. Виходячи з цього, ключове положення даної теорії полягає в тому, що однією з необхідних умов процесу рекристалізації являється періодичне коливання температури або концентрації дисперсного середовища, а механізм рекристалізації зводиться до асиметричного впливу лінійного розміру (маси) кристалів на лінійну (масову) швидкість їх росту і розчинення: в умовах масової кристалізації відносна швидкість розчинення кристалів більше ніж відносна швидкість росту кристалів [1]. В даній теорії розглядається комірчаста модель колективного росту і розчинення частин дисперсної фази [1], згідно до якої в дисперсній системі, де частинки розміщуються по її об'єму, дисперсне середовище не являється загальним для будь-якої частинки, а розподіляється між ними пропорційно до їх розміру,

створюючи з частинками комірки, з яких і відбувається їх ріст і розчинення.

Періодичне коливання температури має місце в промислових кристалізаторах, які мають поверхню теплообміну. Дослідження температурного поля таких кристалізаторів показують [6], що це поле являється нерівномірним по висоті кристалізатора, оскільки коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_2$  від стінки поверхні нагрівання до киплячої суспензії значно менше коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_1$  від пари до стінки. Тепло, перенесене від пари через гріючу поверхню до киплячої суспензії, не встигає відводитись і рівномірно розподіляється по всій масі і тому біля поверхні нагрівання суспензія значно перегрівается. Зміна температури по висоті киплячої маси відбувається не лише із-за перегрівання суспензії біля поверхні нагрівання, але і внаслідок гідродинамічної депресії. Перегрівання суспензії при кипінні в значній мірі залежить від гідродинамічних умов і організації циркуляції киплячої маси [1].

Теорія рекристалізації за коливальним механізмом пояснює явище покращення гранулометричного складу кристалів з одночасним зменшенням їх кількості, що має місце в процесі отримання цукрових утфелів в робочому просторі вакуум-апарату, оскільки в них спостерігається значна нерівномірність температури утфельної маси, що спричиняє відповідну зміну коефіцієнту пересичення міжкристального розчину.

В даній роботі за мету було поставлено на базі теоретичного та експериментального матеріалу [1-4], використовуючи сучасні комп'ютерні технології, змодельовати процес теплообміну між комірками міжкристального розчину сахарози різних розмірів за умови їх одночасного контакту між собою та з паровою бульбашкою, утвореної під час кипіння, виходячи з комірчастої моделі колективного росту і розчинення частин дисперсної фази, для двох та трьох **двовимірних**

**областей**, що контактують між собою за ідеальним законом теплообміну за допомогою програмного комплексу FlowVision.

Програмний комплекс FlowVision, який заснований на чисельних методах (а саме кінцево-об'ємному методі вирішення рівнянь гідродинаміки), призначений для моделювання гідродинаміки, теплообміну, масообміну речовин в технічних і природних об'єктах, а також візуалізації цих процесів методами комп'ютерної графіки.

Теплообмін в даному програмному комплексі моделюється шляхом використання моделі «**твердий матеріал**», в якій розраховується рівняння збереження енергії

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(Vh) = \frac{1}{\rho} \nabla \left( \left( \frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho}$$

За основу моделювання, взято наступну фізичну сторону задачі [3, 5]: в вакуум-апараті під час процесу уварювання утфелю відбувається контакт парової бульбашки одночасно з  $i$ -ю та  $j$ -ю комірками міжкристального розчину сахарози різного розміру, які в свою чергу контактують між собою. Припускаємо, що в початковий момент часу контакту  $T = 0$  температури  $i$ -ї та  $j$ -ї комірок цукрового розчину рівні між собою, і дорівнюють  $T_i|_{t=0} = T_{0i} = 80^\circ C$ ,  $T_j|_{t=0} = T_{0j} = 80^\circ C$  (при середньому робочому тиску у вакуум-апараті  $p = 2,0 \cdot 10^4$  Па). Початкова температура парової фази, що утворюється на поверхні гріючої камери при робочому тиску  $p = 2,0 \cdot 10^4$  Па, дорівнює  $T_{\text{пар}}|_{t=0} = T_{0\text{пар}} = 60^\circ C$ . Задаємось розмірами кристалів  $r_{\text{кри}i} = 2,5 \cdot 10^{-4}$  м та  $r_{\text{кри}j} = 1,25 \cdot 10^{-4}$  м, розміром парової бульбашки  $r_{\text{пар}} = 4,0 \cdot 10^{-3}$  м, та початковою товщиною шару міжкристального розчину сахарози  $r_{\delta 0} = 2,0 \cdot 10^{-4}$  м (товщина шару розчину, що оточував би кожен з кристалів після їх заведення).

### **Методика створення трьохвимірної моделі**

Визначаємо геометричні розміри комірок міжкристального розчину сахарози, що оточують кристали різної величини (рис. 1).

Створюємо 3D-модель теплообміну між паровою бульбашкою, що одночасно контактує з  $i$  та  $j$  комірками міжкристального розчину сахарози за допомогою програми для 3D проектування: Autodesk Inventor (рис. 2).

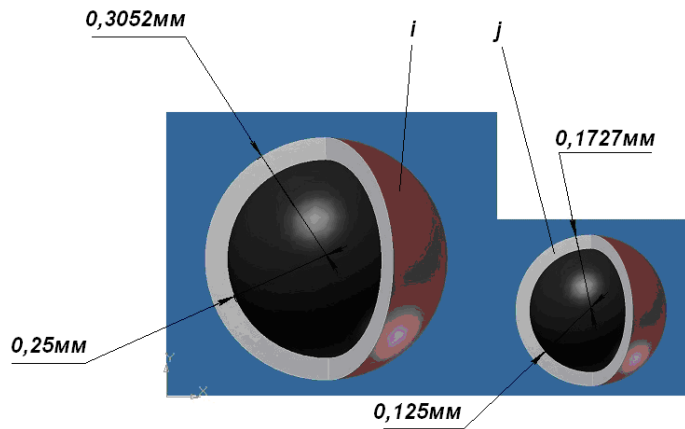


Рис. 1. Геометричні розміри кристалів та оточуючого їх шару міжкристального розчину сахарози



Рис. 2. 3D-модель теплообміну між паровою бульбашкою, що одночасно контактує з більшою і меншою комірками міжкристального розчину сахарози (1-парова бульбашка; 2-міжкристальний розчин сахарози меншої комірки; 3-кристал сахарози; 4- міжкристальний розчин сахарози більшої комірки)

При умові масової кристалізації сахарози в теплообміні між паровою бульбашкою одночасно з  $i$ -ю та  $j$ -ю комірками будуть приймати участь лише просторові сектори комірок.

Виділяємо просторові сектори в паровій бульбашці, які приймають участь в одночасному теплообміні з більшою та меншою комірками

міжкристального розчину сахарози в умовах масової кристалізації (рис. 3 а).

Виділяємо просторові сектори шару міжкристального розчину сахарози в комірках, які одночасно приймають участь в теплообміні з паровою бульбашкою і між собою (рис. 3 б).

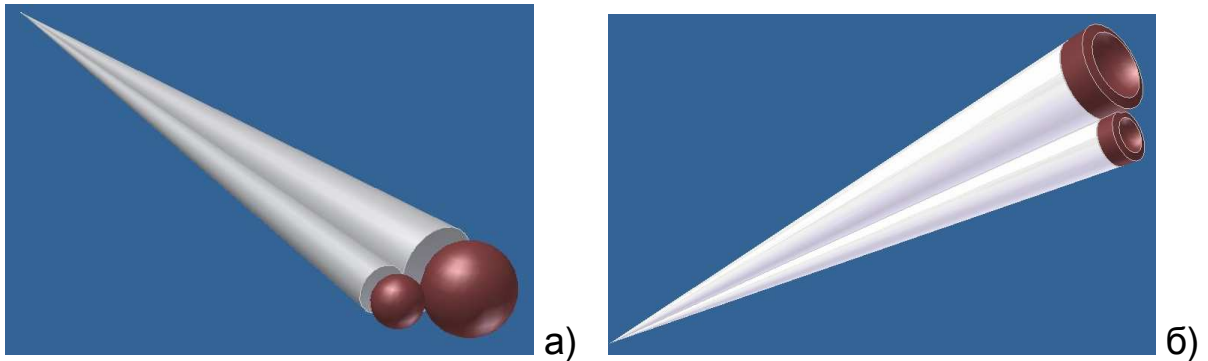


Рис. 3. Виділення областей, що приймають участь в теплообміні за умови масової кристалізації сахарози

- а) просторові сектори в паровій бульбашці, що одночасно контактують з більшою та меншою комірками міжкристального розчину;
- б) просторові сектори шару міжкристального розчину сахарози, що одночасно контактують з паровою бульбашкою і між собою.

Визначаємо об'єми:

- сектора парової бульбашки, який контактує з  $j$ -ю коміркою міжкристального розчину сахарози;
- сектора парової бульбашки, який контактує з  $i$ -ю коміркою міжкристального розчину сахарози;
- сектора шару міжкристального розчину сахарози  $j$ -ї комірки, який контактує з меншим сектором парової бульбашки;
- сектора шару міжкристального розчину сахарози  $i$ -ї комірки, який контактує з більшим сектором парової бульбашки.

Визначаємо поверхню теплообміну:

- між сектором шару міжкристального розчину сахарози  $j$ -ї комірки і меншим сектором парової бульбашки;

- між сектором шару міжкристального розчину сахарози  $i$ -ї комірки і більшим сектором парової бульбашки.

Переходимо до створення моделі для розрахунку в програмному комплексі Flow Vision.

Передбачаємо розмежування фаз шарів міжкристального розчину сахарози і водяної пари (даний програмний комплекс дає можливість позначити поверхні, між якими відбувається контакт). Це дає змогу призначити для комірок міжкристального розчину сахарози фізико-хімічні властивості, характерні міжкристальному розчину сахарози, а для парової бульбашки – властивості, які характерні для водяної пари. Завдяки чому, маємо модель для розрахунку в програмному комплексі Flow Vision (рис. 4), яка цілком відповідає моделі, що описує фізичну суть процесу теплообміну між паровою бульбашкою, що одночасно контактує з більшою і меншою комірками міжкристального розчину сахарози, під час уварювання цукрового утфелю (рис. 3 б).

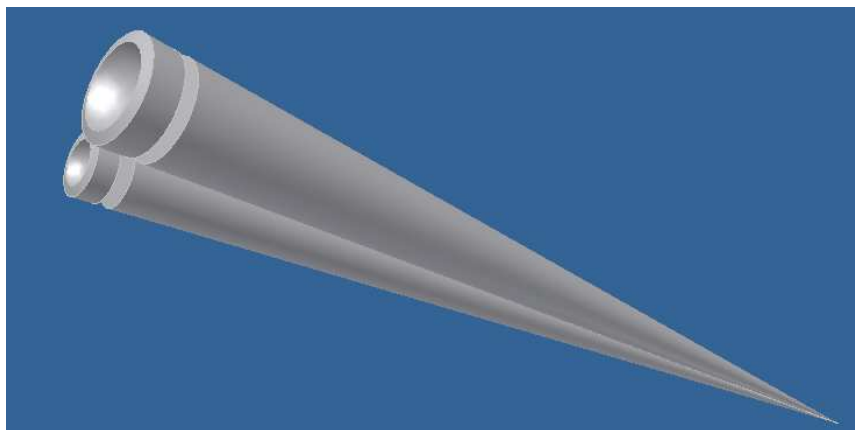


Рис. 4. Модель для розрахунку в програмному комплексі Flow Vision

В результаті моделювання отримаємо розподіл температур між паровою бульбашкою і двома секторами комірок міжкристального розчину сахарози (рис. 5 а); розподіл температур між секторами комірок міжкристального розчину сахарози (рис. 5 б), під час уварювання цукрового утфелю і побудовано графіки зміни температури  $T$  в  $i$ -й комірці (рис. 6 а) і  $j$ -й комірці (рис. 6 б) міжкристального розчину сахарози

протягом часу контакту  $\tau$  з паровою бульбашкою.

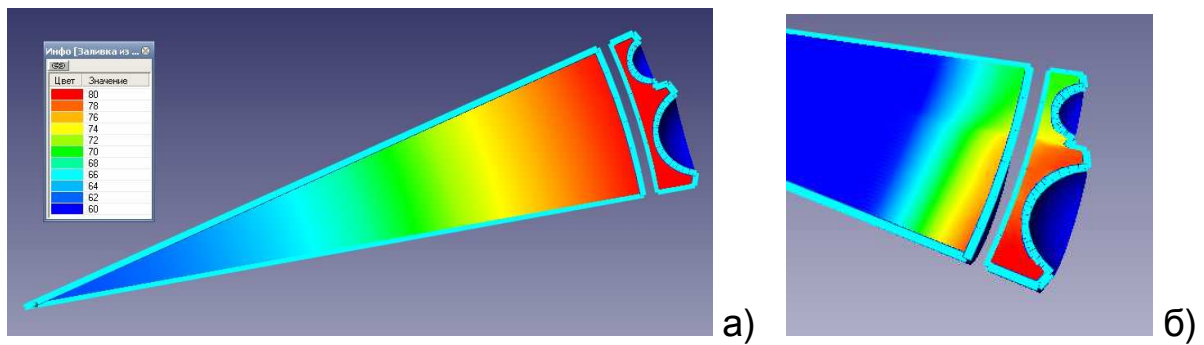


Рис. 5. Розподіл температур

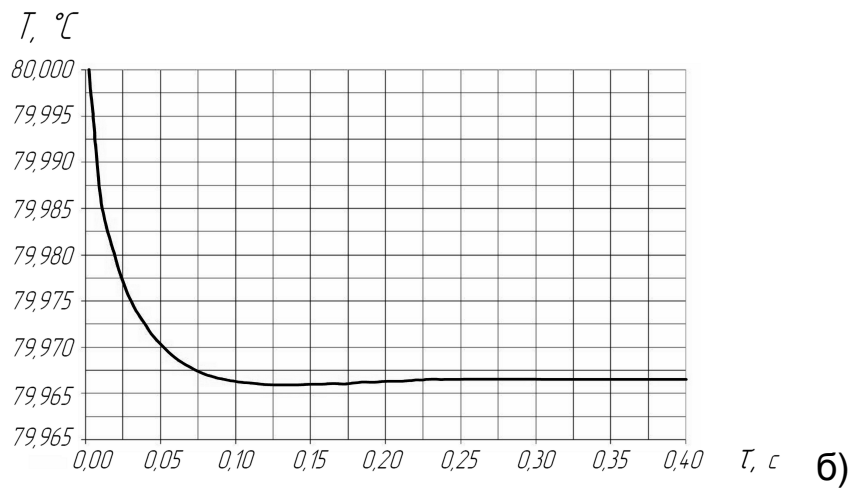
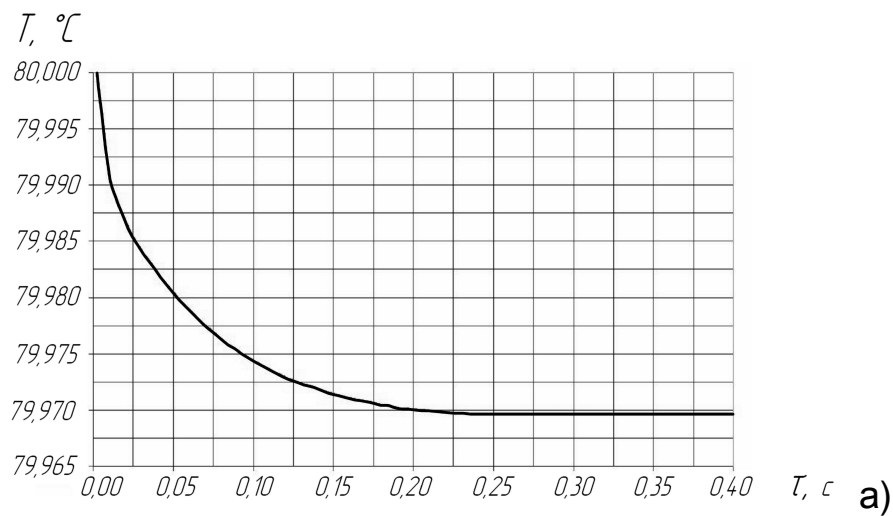


Рис. 6. Графіки залежності: а) температури  $i$ -ї комірки міжкристального розчину сахарози від часу контакту з паровою бульбашкою  $T_i = f(\tau)$ ; б) температури  $j$ -ї комірки міжкристального розчину сахарози від часу контакту з паровою бульбашкою  $T_j = f(\tau)$ ;

Результати моделювання показують (рис. 5), що при однакових початкових умовах, в яких перебувають комірки міжкристального розчину сахарози (температури  $i$ -ї та  $j$ -ї комірок цукрового розчину рівні між собою, і дорівнюють  $T_i|_{t=0} = T_{0i} = 80^\circ\text{C}$ ,  $T_j|_{t=0} = T_{0j} = 80^\circ\text{C}$ ), в момент контакту комірок між собою і одночасно з паровою бульбашкою, комірка міжкристального розчину сахарози меншого розміру віддасть бульбашці більшу відносну кількість теплоти (відношення кількості теплоти, яку віддала комірка, до розміру комірки) і, як наслідок, охолodиться на більшу температуру по відношенню до комірки міжкристального розчину сахарози більшого розміру, при однаковому часу контакту. При охолодженні комірок збільшується пересичення шару міжкристального розчину сахарози, який оточує кристал (відповідно до комірчастої моделі колективного росту і розчинення частин дисперсної фази [1]) і відбудеться викристалізування молекул сахарози з цього шару, причому, пересичення шару міжкристального розчину сахарози, який відповідає комірці меншого розміру, буде більше в порівнянні з коміркою меншого розміру. Таким чином маємо різницю концентрацій шарів міжкристального розчину сахарози, які оточують кристали різних розмірів, що є необхідною і достатньою умовою масообміну, в результаті якого, частина молекул сахарози почне переходити у напрямку комірки більшого розміру і вбудовуватися до кристалічної решітки більшого кристалу. Процес масообміну відбуватиметься одночасно з ростом обох кристалів (але кристал з більшим розміром буде рости ще і за рахунок комірки меншого розміру) до тих пір, доки міжкристальний розчин сахарози шарів, що оточують кристали, не зменшить рівень пересичення до насиченого розчину при даній температурі (пом'ятаємо що температури обох комірок внаслідок контакту різні), оскільки система *шар міжкристального розчину сахарози – кристал сахарози* прагне до рівноваги, яка настає коли розчин, що оточує кристал, є насиченим.

**Висновки:** Положення теорії рекристалізації за коливальним

механізмом, щодо асиметричного впливу лінійного розміру (маси) кристалів на лінійну (масову) швидкість їх росту і розчинення, має більш суттєве підґрунтя, а саме: кристал сахарози більшого розміру збільшується в розмірі інтенсивніше, ніж кристал меншого розміру, за рахунок кількості викристалізуваної речовини з шару міжкристального розчину сахарози, що оточує менший кристал, що обумовлюється здатністю комірки міжкристального розчину сахарози меншого розміру більш інтенсивніше віддавати кількість тепла.

### Література

1. Бажал И. Г., Куриленко О. Д. Переконденсация в дисперсных системах. — К.: Наукова думка, 1975. — 216 с.

2. Мирончук В.Г. Влияние паровой фазы на процесс кристаллизации веществ из растворов // Промышленная теплоэнергетика. — 1998. — № 1. — С. 31-35.

3. Мирончук В. Г., Гулий І. С., Погорілий Т. М. Взаємодія парової фази і дисперсної системи при масовій кристалізації цукру // Наукові праці УДУХТ. — Київ: — 1998. — Ч. I, №4. — С. 68-70.

4. Мирончук В. Г. Механизм влияния пузырей пара на массообмен при кристаллизации суспензий // Промышленная теплоэнергетика. — 1998. — №6. — С. 13-15.

5. Мирончук В. Г., Погорілий Т. М., Лементар С. Ю. Дослідження умов некомутативності за часом при змішуванні двох речовин у нестационарній задачі теплопровідності // Наукові праці НУХТ. — К.: 2005. — № 16. — С. 154–156.

6. Матусевич Л. Н. Кристаллизация из растворов в химической промышленности — М.: Химия, 1968

7. Попов В. Д. Основы теории тепло - и массообмена при кристаллизации сахарозы. — М.: Пищевая промышленность, 1973. — 316с.