

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ, І ГІДРОДИНАМІКИ У ВАКУУМ-АПАРАТАХ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА

*Узагальнені результати теоретичних і експериментальних досліджень робочих процесів при інтенсифікації уварювання утфелів; розглянуті питання практичного застосування способів інтенсифікації у вакуум-апаратах цукрового виробництва.*

**Ключові слова:** інтенсифікація, гідродинамічні і тепломасообмінні процеси, утфельні вакуум-апарати, циркуляція, конструкції, рішення.

Однією з основних проблем цукрового виробництва є отримання цукру високої якості в процесі його кристалізації у вакуум-апаратах. Проблему цю можливо розв'язати шляхом створення високоефективних вакуум-апаратів безперервної дії (ВАБД) для уварювання утфелів першої і подальшої кристалізації, а також шляхом інтенсифікації процесів тепломасообміну в існуючих конструкціях вакуум-апаратів періодичної дії.

Для вирішення задач оптимізації безперервної варки утфелю запропоновані багаточисельні і різноманітні конструкції ВАБД [1], проте наявний досвід промислової безперервної кристалізації не дозволяє визначитись з певною конструкцією ВАБД для впровадження їх у виробництво. Очевидно, що для різних продуктів, які відрізняються фізичними властивостями, необхідно шукати в майбутньому кілька самостійних рішень. Очевидно, також, є потреба в організації і проведенні широкого кола теоретичних і експериментальних досліджень для прискорення вирішення проблеми безперервної кристалізації цукру.

З метою удосконалення конструкцій вакуум-апаратів періодичної дії та інтенсифікації процесу уварювання утфелів групою науковців НУХТ проведені комплексні дослідження робочих процесів у вакуум-апаратах періодичної дії, а також в елементах (моделях) вакуум-апаратів безперервної дії на спеціальних експериментальних установках [2].

В лабораторіях кафедри промислової теплоенергетики НУХТ, на Ходорівському і Жабинковському (Білорусь) цукрозаводах на шести експериментальних

*Generalized results of theoretical and experimental analysis of working processes under intensification of massecuite; examined the points of practical use of methods intensification in sugar industry vacuum apparatus.*

**Key words:** intensification, hydrodynamics and heat mass transfer processes, massecuite vacuum pans, circulation, construction, decision

установках були виконані дослідження тепломасообміну і гідродинаміки потоків утфелю і його сумішей з повітрям (парою) під час руху (кипіння) їх у вертикальних трубах та у великому об'ємі в умовах природної конвекції. Досліджувались барботажи і напірні течії повітряно (паро)-утфельних сумішей, характерні для роботи промислових вакуум-апаратів. Як результат виконаних досліджень вперше були отримані дані з таких гідравлічних характеристик потоків утфелю і його сумішей з парою (повітрям), як втрати тиску на тертя по довжині труби, місцеві гідравлічні опори при вході утфелю в трубу і виході з неї, істинні характеристики (паро) повітряно-утфельних потоків при барботажі і напірній течії, істинні швидкості повітря (пари) і (газо) паровміст потоків в залежності від режиму руху, концентрації сухих речовин в утфелі та масового вмісту кристалів цукру в ньому.

Також вперше були отримані дані щодо зміни локальних параметрів тепломасообміну і гідродинаміки по довжині кип'ятильної труби для всіх гідродинамічних режимів течії утфелю та пароутфельної суміші.

В залежності від зміни значень теплового потоку, швидкості циркуляції, теплофізичних властивостей утфелю визначені оптимальні режими роботи утфельних вакуум-апаратів, запропоновані розрахункові залежності для здійснення теплового і гідродинамічного розрахунку вакуум-апаратів безперервної та періодичної дії, які звійшли складовою частиною до створеної методики теплового і гідродинамічного розрахунку вказаних апаратів з урахуванням даних щодо впливу просторово-часових і теплофізичних параметрів пароутворення на процес тепловіддачі до киплячих утфелів.

На підставі виконаних вищезазначених досліджень промисловості запропоновані нові конструкції модернізованих вакуум-апаратів періодичної дії. Здійснено обґрунтування і впровадження гідродинамічного методу інтенсифікації робочих процесів в утфельних вакуум-апаратах. Виявлено вплив різних чинників на інтенсифікацію уварювання утфелів гідродинамічним способом. Виконаний аналіз роботи вакуум-апаратів, обладнаних різноманітними пристроями для інтенсифікації процесів теплообміну і гідродинаміки в них, на підставі якого визначена економічна ефективність і пріоритетність гідродинамічного методу.

Далі розглядається сутність запропонованого гідродинамічного способу інтенсифікації роботи утфельних вакуум-апаратів.

Одним із найважливіших чинників, який суттєво впливає на режим роботи утфельного вакуум-апарата, є швидкість природної циркуляції утфеля. Оскільки гідродинамічна ситуація в періодично діючих вакуум-апаратах безперервно змінюється на протязі циклу уварювання, то швидкість циркуляції також помітно коливається і поступово зменшується в кінці варки утфелю до мінімуму. Дослідження на напівпромисловій моделі періодично діючого вакуум-апарата дозволили встановити основні чинники, які впливають на швидкість циркуляції. Отримана залежність для швидкості циркуляції має вигляд:

$$W_0 = K(f_{\text{св}}/f_{\text{па}})\Delta t \text{CP}_y^n \exp\{-b[\text{КР}/(1-\text{КР})]^p\}, \quad (1)$$

де  $K$  — коефіцієнт, що характеризує нерівномірність поля швидкостей в опускних трубах, і визначається як відношення середньої швидкості до максимальної;  $f_{\text{св}}/f_{\text{па}}$  — співвідношення площ живих перерізів опускних і підйомних труб вакуум-апарата;  $\Delta t$  — корисна різниця температур грійної пари  $t_{\text{гр.п}}$  і утфеля  $t_y$ , °C;  $\text{CP}_y$  — масовий вміст сухих речовин утфеля, % мас.;  $b$  — показник експоненти, залежний від  $\text{КР}$ .

Залежність (1) дозволяє охарактеризувати вплив окремих факторів на швидкість циркуляції утфеля. Коефіцієнт  $K$  збільшується з підвищенням концентрації сухих речовин утфеля від  $K = 0,7$  при  $\text{CP}_y = 60\%$  до  $K = 1$  при  $\text{CP}_y = 86\%$ . Показник степені  $n$  у рівнянні (1) залежить від співвідношення  $f_{\text{св}}/f_{\text{па}}$  і  $\Delta t$ . Мінімальне значення  $n = 0,94$  отримано для  $f_{\text{св}}/f_{\text{па}} = 1,1-1,2$  і  $\Delta t = 50$  °C, а при подальшому збільшенні чи зменшенні  $\Delta t$  і  $f_{\text{св}}/f_{\text{па}}$  його значення помітно зростає. Співмножник показника експоненти  $b$  з підвищенням  $\text{CP}_y$  також помітно зростає, а з підвищенням  $\text{КР}$  — суттєво зменшується. Збільшення співвідношення  $f_{\text{св}}/f_{\text{па}}$  веде до зниження  $W_0$ , що пояснюється зростанням гідравлічного опору опускних каналів. Зменшення співвідношення  $f_{\text{св}}/f_{\text{па}}$  нижче 1,1 супроводжується зростанням значень  $W_0$ .

Температурний напір  $\Delta t$  визначає інтенсивність пароутворення в кип'ятильних трубах вакуум-апарата і впливає на величину рушійного напору циркуляції. З підвищенням  $\Delta t$  швидкість циркуляції утфеля зростає. Теплофізичні властивості утфеля суттєво впливають на швидкість циркуляції. З підвищенням  $\text{CP}_y$  і  $\text{КР}$  величина  $W_0$  зменшується, що обумовлюється збільшенням в'язкості утфеля і зниженням інтенсивності пароутворення, особливо на завершальній стадії уварювання. Зниження інтенсивності пароутворення пов'язане зі зростанням фізико-хімічної депресії  $\Delta p_{\text{ф.х}}$ , зменшенням рухомості утфеля, а також зі зменшен-

ням довжини ділянки генерації пари в кип'ятильних трубах. Велі ці фактори приводять до зниження швидкості циркуляції утфеля.

У періодично діючих вакуум-апаратах підвищення концентрації сухих речовин утфеля супроводжується збільшенням об'єму і рівня утфеля в апараті, що пов'язано з підвищенням гідростатичної депресії  $\Delta p$  і відповідним зниженням інтенсивності пароутворення та зменшенням швидкості циркуляції. На рис. показано вплив глибини затоплення утфелем грійної (парової) камери вакуум-апарата на швидкість циркуляції.

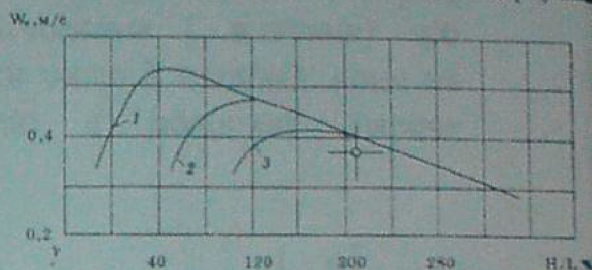


Рис. 1. Зміна швидкості циркуляції утфеля першої кристалізації в залежності від глибини затоплення поверхні нагріву для різкого вмісту кристалів (у %): 1 — 15; 2 — 30; 3 — 45.

Існують оптимальні значення глибини затоплення поверхні нагріву вакуум-апарата, які характеризуються максимальною інтенсивністю теплообміну і найвищою швидкістю циркуляції. Зі збільшенням концентрації утфеля оптимальні значення  $W$  зменшуються, а область їх існування зсувається до більших значень глибини затоплення  $H/L$ , де  $H$  — видимий рівень утфелю в апараті, м;  $L$  — довжина кип'ятильних труб, м. Суттєве зниження швидкості циркуляції у верхній стадії процесу уварювання утфелю є характерним для будь-яких вакуум-апаратів періодичної дії.

Для підсилення природної циркуляції утфеля періодично діючих вакуум-апаратах запропоновано [2,3] два методи: 1) за допомогою встановлюваного в центральній опускній трубі механічного циркулятора, котрий подібно насосу нагнітає утфель під нижню трубку решітки апарата; 2) шляхом адування газу (пари) під нижню трубку решітку. Стосовно першого методу слід відзначити, що чим вищим є тиск, створений циркулятором, тим більше зростає швидкість циркуляції утфеля. Однак, при цьому підвищується також тиск на вході у кип'ятильні труби вакуум-апарата, а, відповідно до цього збільшується недогрів утфеля до температури кипіння, збільшується довжина економайзерної ділянки кип'ятильних труб і зменшується паровміст в них та рушійний напір циркуляції.

Інтенсивність тепловіддачі на економайзерній ділянці кип'ятильної труби є нижчою, ніж на ділянці кипіння утфеля. Зі збільшенням швидкості руху утфеля інтенсивність теплообміну на економайзерній ділянці зростає, проте в меншій степені, ніж зменшується інтенсивність тепловіддачі із-за збільшення довжини економайзерної ділянки і зменшення довжини ділянки кипіння. Зростають також гідравлічні опори, оскільки у підтрубному просторі і в опускній трубі утфель здійснює обертовий рух, і це дещо знижує ефективність цього методу.

За другим методом при адуванні пари (газу) кип'ятильні труби підвищується (паро)газовміст, практично зникає економайзерна ділянка, кипіння утфеля

починається відразу ж на вході у кип'ятильні труби. Підвищення швидкості циркуляції утфеля при адуванні пари (газу) відбувається внаслідок збільшення середнього (паро) газовмісту в кип'ятильних трубах. При цьому зростає також і гідравлічний опір. Таким чином, збільшення швидкості циркуляції зі зростанням кількості пари (газу), що адується, буде тривати доти, доки збільшення рушійного тиску (напору) буде випереджати зростання гідравлічного опору. Природно, що кількість пари (газу), що адується, не повинна перевищувати значень, при яких на верхніх ділянках кип'ятильних труб замість пливки утфеля буде рухатись плівка пари (газу). Крім того, адувати великі кількості пари (газу) є економічно недоцільно.

Лабораторні дослідження, проведені для висококонцентрованих цукрових розчинів на однотрубному випарнику з адуванням повітря всередину кип'ятильної труби [2] підтвердили можливість інтенсифікації теплообміну на 15–20 % при адуванні повітря в кількості до 4 % від витрати грієвої пари. При збільшенні кількості повітря, що адується, більше 4 % інтенсивність теплообміну не збільшувалась, а навіть зменшувалась.

Виходячи з аналізу дослідних даних [2], запропонований новий спосіб гідродинамічної інтенсифікації уварювання утфелів шляхом адування газу (повітря) чи пари всередину кожної кип'ятильної труби апарату, який полягає в наступному:

адування газу (повітря) чи пари здійснюється струминями з такою швидкістю, яка дозволяє диспергувати газ (пару), змішуючи їх з утфелем, і винести лону снарядно-поршневої форми руху суміші ближче до виходу із кип'ятильної труби;

витрата пари (газу), що адується, підтримується в оптимальних значеннях для кожної стадії уварювання;

в розподільчій камері підтримується значно більший тиск пари (газу), що адується, ніж у вакуум-апараті, щоб коливання тиску в кип'ятильних трубах суттєво не впливали на рівномірність розподілу пари (газу), що адується;

розподільчий пристрій виконується таким чином, щоб не створювати додаткового гідравлічного опору циркулюючому утфелю і застійних зон;

напрямок руху струмин пари (газу), що адується, створюється таким, щоб їхня інжекційна дія створювала якомога більший додатковий рушійний напір.

Для реалізації цього способу були розроблені дві конструкції пристрою з розподільчою камерою і розподільчим колектором. На рис. 2 представлена схема пристрою для гідродинамічного підсилення циркуляції у вакуум-апаратах з розподільчою камерою, яка має поперечний переріз, ідентичний перерізу грієвої (парової) камери. Нижні кінці кип'ятильних труб є продовженням труб розподільчої камери, в них просвердлені отвори під кутом 15–30° до осі кип'ятильних труб. Через ці отвори пара (повітря), що адується, надходить із розподільчої камери всередину кип'ятильних труб.

Схема пристрою для гідродинамічного підсилення циркуляції у вакуум-апаратах з розподільчим колектором, який виготовлений із труб, прокладених між рядами кип'ятильних труб апарату до нижньої трубно-решітної апарату, представлена на рис. 3.

У колекторі є форсунок з отворами для адування пари (газу) всередину кожної кип'ятильної труби. Кут

нахилу осі отворів складає 15–30° до осі кип'ятильних труб. При товщині стінки кип'ятильної труби 2–3 мм такі отвори являють собою короткі патрубкові сопла, які формують вузький направлений потік пари (газу), що адується.

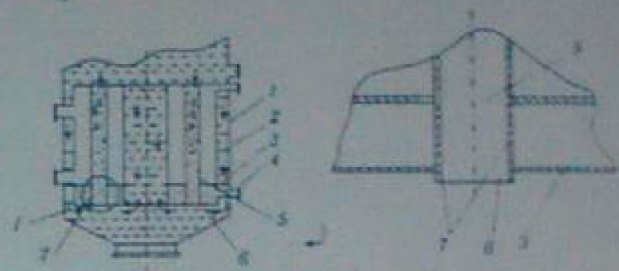


Рис. 2. Схема пристрою для гідродинамічного підсилення циркуляції: 1 — корпус; 2 — грієва (парова) камера; 3 — розподільча камера; 4 — патрубок для пари, що адується; 5 — кип'ятильні труби; 6 — нижні кінці кип'ятильних труб; 7 — отвори для адування пари.

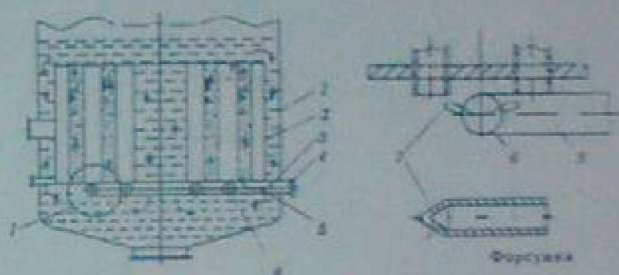


Рис. 3. Схема пристрою для гідродинамічного підсилення циркуляції колекторного типу: 1 — корпус; 2 — грієва (парова) камера; 3 — розподільчий колектор; 4 — патрубок для пари, що адується; 5 — кип'ятильні труби; 6 — форсунок; 7 — отвори для адування пари.

Для підтримання в розподільчій камері чи колекторі значно більшого тиску, ніж у вакуум-апараті, недостатньо використовувати для адування тільки пару (газ) відповідного тиску. Необхідно також, щоб сумарна площа перерізу усіх отворів для адування була значно меншою площі перерізу каналів, по яким пара (газ) підводиться до них, тобто, щоб гідравлічний опір отворів для адування був більшим від опору тракту підведення пари (газу). Таке конструктивне виконання пристрою для гідродинамічного підсилення циркуляції дозволяє використовувати потенційну енергію тиску пари (газу), що адується, на створення додаткового рушійного напору. Корисний перепад тиску пари (газу) не витрачається на подолання опору по тракту подачі, а перетворюється у кінетичну енергію струмин і при змішуванні передається утфелю, що рухається в кип'ятильній трубі. При цьому досягається більш рівномірний розподіл пари (газу), що адується, між кип'ятильними трубами, а також більш рівномірний циркуляції утфеля в апараті. При адуванні пари (газу) тонкими струминями з великою швидкістю відбувається достатньо тонка диспергування їх з утфелем, що знижує відносну швидкість пари (газу) і підвищує істинний паровміст в кип'ятильних трубах, а також зменшує можливість утворення снарядно-поршневої форми течії суміші утфелю + пара (газ). Ці особливості запропонованого способу і пристроїв для гідродинамічного підсилення циркуляції у вакуум-апаратах підвищують їх ефективність.

Виконані промислові випробування вакуум-апаратів з підсиленою гідродинамічним способом ци-

куляцією утфеля показали, що інтенсифікація тепло-масообміну при вдуванні пари збільшується на завершальній стадії уварювання утфелю. На рис. 4 представлені графіки зміни коефіцієнта теплопередачі  $K$  на всіх стадіях циклу уварювання утфелю.

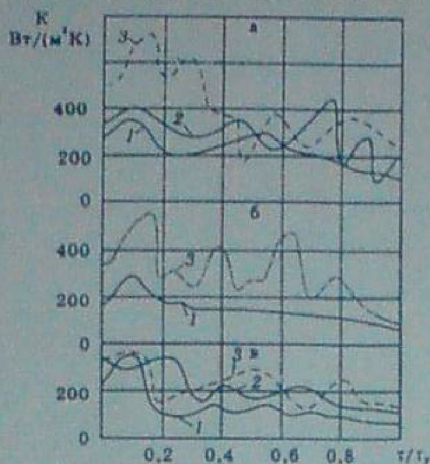


Рис. 4. Зміна коефіцієнта теплопередачі на всіх стадіях циклу уварювання утфелю: а — 2-ї кристалізації; б — 3-ї кристалізації бурякоцукрового виробництва; в — 4-ї кристалізації при переробці тростинного цукру-сирцю; 1 —  $G_{ад} = 0$ ; 2 —  $G_{ад} = 80$  кг/год; 3 —  $G_{ад} = 120$  кг/год.

Максимальні значення  $K$  на початку уварювання відповідають умовам уварювання рідких продуктів після чергових підкачок в апаратах. Мінімальні значення  $K$  відповідають уварюванню згущених (концентрованих) продуктів перед черговою підкачкою. На початковій стадії уварювання інтенсифікація теплообміну вдуванням пари має нерегулярний характер. Це пояснюється тим, що кипіння рідких продуктів здійснюється в близькому до оптимального режимі роботи кип'ятильних труб, коли по всій їх довжині спостерігається розвинуте кипіння. В цих умовах вдування додаткової пари є малоефективним. Ефективність інтенсифікації теплообміну зростає на завершальній стадії уварювання. При уварюванні кінцевих продуктів значення  $K$  на останній стадії при вдуванні пари значно більші, ніж без вдування. Зі збільшенням витрати пари, що вдувається, значення  $K$  зростають, хоч і не в однаковій ступені. Можливо, під час вдування пари підкачки свіжої патоки скоріше змішуються з утфелем в апараті, знижуючи його концентрацію і в'язкість, що веде до збільшення інтенсивності теплопередачі, в той час, коли без вдування таке перемішування є повільним або має локальний характер.

На завершальній стадії уварювання досягається також значна інтенсифікація процесу кристалізації (масообміну) шляхом вдування пари в кип'ятильні труби, що обумовлюється значною інтенсифікацією теплообміну. В умовах природної циркуляції утфелю інтенсивність теплообміну на цій стадії значно знижується із-за підвищення рівня утфеля в апараті, зростання концентрації кристалів і в'язкості. Часто кипіння утфелю в кип'ятильних трубах припиняється, утфель тут тільки перегрівається, а вскипання його відбувається в просторі над поверхнею нагріву. При вдуванні пари кипіння переноситься в кип'ятильні труби. Швидкість циркуляції і масової кристалізації утфелю зростають. Як показали дослідження, витрата пари (газу) для гідродинамічної інтенсифікації уварювання утфелю не повинна перевищувати 10-15% від витрати грійної пари.

Для зменшення витрати пари на утфельні вакуум-апарати при гідродинамічному способі інтенсифікації доцільно здійснювати перепуск неконденсованих газів із парових камер апаратів у пристрій для підсилення циркуляції. При цьому покращується дезерація парових камер і зменшується загальна витрата пари на вакуум-апарати.

Результати випробувань вакуум-апаратів типу Ж4-ПВА-40 з розподільчим камерним пристроєм для підсилення циркуляції при уварюванні утфелю в другій і третій кристалізації наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Показники	Кристалізація			
	2-га		3-тя	
	без вдування	з вдуванням	без вдування	з вдуванням
1	2	3	4	5
Початкова патока				
СР, %	77,46	77,75	82,75	79,8
Ч, од	81,8	86,3	82,15	76
Утфель				
СР, %	94,1	94,1	94,3	94,36
Ч, од	83,2	83,8	77,9	77,9
КР, %	30,3	44,6	27,9	33,9
Міжкристалічний розчин				
СР, %	88,1	88,15	90,5	89,5
Ч, од	78	70,1	69,7	65,8
Пара, що вдувається				
тиск, кПа	—	176,5	—	183
кватрата, кг/год	—	398	—	399
Активний час уварювання, год	4,69	3,34	8,47	6,02
Кількість випареної води, т	14,17	12,15	10,35	10,97
Кількість зв'язаного утфелю, т	39,83	40,9	41,85	41,93

Як видно із таблиці 1, активний час уварювання утфелю із застосуванням вдування пари зменшується на 30%, а чистота міжкристалічного розчину — до 8 одиниць.

Впровадження у виробництво модернізованих вакуум-апаратів типу А-2-ПВУ-40 і А-2-ПВУ-60 дозволило на 25-40% скоротити тривалість циклу уварювання утфелю у порівнянні з вакуум-апаратами без інтенсифікації робочих процесів.

**Висновки.**

Вперше отримані дослідні дані щодо інтенсифікації процесів теплообміну і гідродинаміки під час уварювання утфелю в вакуум-апаратах періодичної дії.

Розроблено і впроваджено гідродинамічний спосіб інтенсифікації процесу уварювання утфелю в вакуум-апаратах періодичної дії.

На підставі проведених досліджень процесів теплообміну і гідродинаміки в утфельних вакуум-апаратах промисловості запропоновані нові конструкції модернізованих вакуум-апаратів періодичної дії, оснащених пристроями для гідродинамічної інтенсифікації процесів.

Промисловими випробуваннями підтверджено доцільність і ефективність впровадження гідродинамічного способу інтенсифікації робочих процесів в утфельних вакуум-апаратах.

Обґрунтовано необхідність проведення спеціальних досліджень щодо інтенсифікації робочих процесів в утфельних вакуум-апаратах шляхом вдування

газів (повітря) в кип'ятильні труби апаратів з метою визначення кількісних і якісних характеристик процесу інтенсифікації уварювання утфелів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гульмй Н.С. Непрерывная варка и кристаллизация сахара. — М.: Пищевая пром-сть, 1976. — 267 с.

2. Гаряжа В.Т. и др. Интенсификация процесса уваривания утфелей. — М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1981. — 152 с.

3. Blaude I. Agitation mecanique dans les appareils a Cuire. — Sucrierie belge, 1969, an. 88, №6, P. 307-311.

Надійшла до редколегії 08.03.2009 р.