



## **Теплообмін в вакуум-апаратах**

*Штангеев К.О., к.т.н., доцент,  
зав. кафедрою ІПДО НУХТ*

Вакуум-апарати відносяться до технологічного обладнання, але в той же час це найбільші споживачі пари із випарної установки. На цукрових заводах України використовуються виключно вакуум-апарати періодичної дії більшість із яких з природною циркуляцією, але в останній час активно впроваджуються вакуум-апарати з механічними циркуляторами.

Існують також вакуум-апарати безперервної дії в яких всі ці процеси відбуваються по довжині або висоті апарату. Але вакуум-апарати періодичної дії дозволяють отримувати більш якісний цукор, але вони мають дуже нерівномірне споживання пари протягом циклу варки, що має негативний вплив на роботу випарної установки та всієї теплової схеми цукрового заводу.

Конструкція вакуум-апарата – це питання оптимізації двох функцій випаровування води із розчину та кристалізації цукру з досягненням бажаної якості продукції, тобто розміру та вмісту кристалів цукру і чистоти утфелю.

Для вакуум-апаратів оптимальної конструкції, мають бути виконані наступні основні вимоги [1]:

- Мінімальний обсяг первинного набору (приблизно до 25% від загального обсягу варі), щоб забезпечити можливість отримати необхідний розмір кристалів цукру протягом циклу варки.
- Змінна в широкому інтервалі інтенсивність випаровування для підтримки



необхідного рівня пересичення (при малому пересиченні зтягується тривалість варки утфелю, при надто великому пересиченні починається спонтанне утворення центрів кристалізації – так звана «мука», що значно погіршує кристалоструктуру звареного утфелю).

- Циркуляція утфелю повинна бути інтенсивною протягом всієї варі, особливо під час заведення кристалів та одразу після цього в цілях запобігання утворення конгломератів.

- Слід дотримуватися мінімальної різниці температур гріючої пари та киплячого утфелю.

- Для регулювання процесу варки потрібне правильне розташування датчиків для вимірювання температури, рівня, пересичення, густини, в'язкості і т. д. таким чином, щоб вони представили реальні умови процесу в вакуум-апараті. Це обов'язкова умова для правильного управління процесом.

Сумарний процес кристалізації визначається масообміном сахарози із розчину до кристалів цукру та теплопередачу в гріючій камері.

Теплообмін в вакуум-апаратах має схожі риси з теплообміном у випарних апаратах з природною циркуляцією, але й має значні відмінності, пов'язані із роботою з висококонцентрованими цукровими розчинами під розрідженням та періодичним характером роботи. В вакуум-апаратах періодичної дії, в першому періоді роботи іде процес згущення сиропу після випарної установки. Оскільки вакуум-апарати працюють при високих теплоперепадах, в цей період відбувається інтенсивне бульбашкове кипіння.

Теплопередача в вакуум-апаратах складається із тепловіддачі від пари, що конденсується, теплопровідності через стінку теплообмінної труби та тепловіддачі до цукрового розчину. При правильній організації відведення конденсату та неконденсуючих газів із парової камери, термічний опір тепловіддачі при конденсації пари мало впливає на загальну величину термічного опору теплопередачі в вакуум-апаратах будь-якої конструкції. Це ж відноситься і до впливу термічного опору теплообмінної труби за відсутності інкрустацій.

Фактично інтенсивність теплообміну в вакуум-апаратах визначається тепловіддачею до цукрового розчину. Причому такі фактори як гідростатична та фізико-хімічна температурні депресії при уварювання утфелів мають набагато більші значення та вплив, аніж для випарних апаратів [2]. Так фізико-хімічна депресія може досягати величини в 10...15 °С, а гідростатична в кінцевих стадіях варки досягає 25...33 °С на нижніх кінцях теплообмінних труб.

При уварюванні утфелю в вакуум-апаратах мають місце два види теплообміну: бульбашкове кипіння (зони II, рис.1) та конвективний теплообмін в однофазній рідині (зона I, рис. 1).

Основними факторами, що впливають на величину інтенсивності теплопередачі в вакуум-апараті цукрового заводу є густина цукрового розчину, що уварюється (СР утфелю) та фактичний температурний перепад. Чим вища концентрація розчину,



тим більша його в'язкість і, відповідно, зменшується величина коефіцієнту теплопередачі.

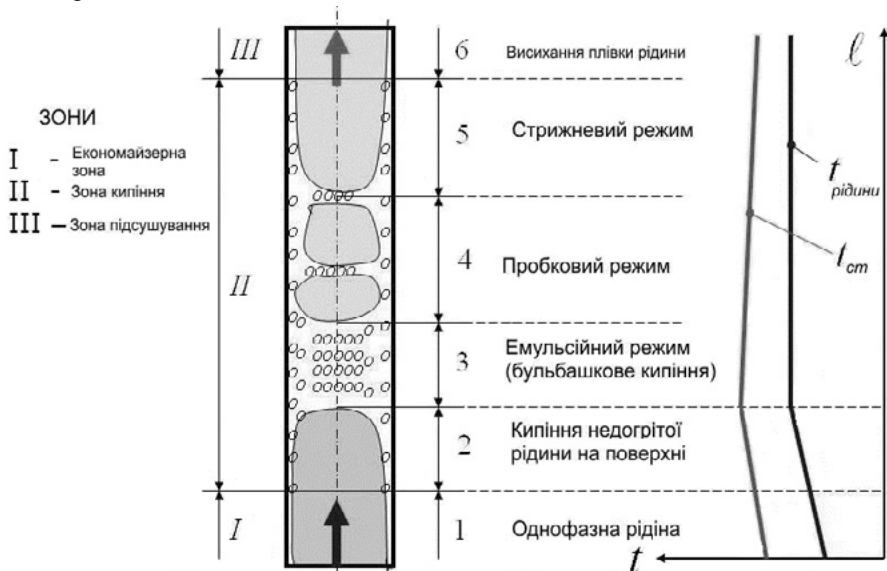


Рис. 1. Принципова схема режимів течії та теплообміну при кипінні рідини в вертикальній трубі.

Для більш детального визначення умов теплопередачі на різних стадіях роботи вакуум-апарату було виконано розрахунки з застосуванням позонного методу. Він полягає в тому, що вся поверхня теплообміну поділяється на окремі зони, для яких умови теплообміну  $\epsilon$ , практично, незмінними. В даному випадку вертикальна теплообмінна труба поділялася на окремі зони висотою 0,05 м. Для них розраховувалися теплофізичні параметри та інтенсивність теплообміну послідовно від нижньої зони до верху труби. Для кожної зони розраховувалася величина нагріву розчину і температура та інші параметри на вході в наступну зону. В разі, якщо для даної зони розрахункова інтенсивність конвективного теплообміну перевищує інтенсивність теплообміну при бульбашкового кипіння, то має місце лише конвективний теплообмін. Якщо тепловий потік при кипінні вище конвективного теплового потоку то відбувається кипіння рідини.

Розрахунки було виконано для трьох основних робочих режимів уварювання утфелю: початкове згущення розчину до заводки кристалів (1), теплообмін після заводки кристалів (2), уварювання утфелю та нарощування кристалів цукру (3-5) і остаточне згущення утфелю перед спуском (6). В якості основи було вибрано вакуум-апарат з механічними циркуляторами типу ВАЦМ фірми ТМА.

Результати розрахунків різних зон зведено в таблицю:



Показники	1	2	3	4	5	6
Тепловий потік, Вт/(м <sup>2</sup> × °С)	27500	4800	4920	4020	3790	1350
Вагове навантаження, кг/(м <sup>2</sup> × год)	42,3	7,4	7,6	6,2	5,8	2,1
Концентрація утфелю, %	70	82,5	82,9	84,9	88,8	91,8
Концентрація міжкристального розчину, %	70	82,5	81,5	82,2	82,8	83
Вміст кристалів, %	0	0,0	5	15	35	52
Висота економайзерної зони, %	10	80	70	100	100	100
Фізико-хімічна депресія, °С	4,9	11,1	10,6	11,5	12,3	14,6
Гідростатична депресія внизу труб, °С	11,3	13,5	17,2	21,4	24,9	28,8
Середня по трубі гідростатична депресія, °С	6,9	8,4	12,7	17,4	21,2	21,8
Швидкість розчину на вході в трубу, м/с	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Висота над трубною решіткою, м	0,1	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0

Якщо порівняти отримані результати із усередненими виробничими теплотехнічними характеристиками вакуум-апаратами з природною циркуляцією то мається явна подібність процесів (див. рис. 2):

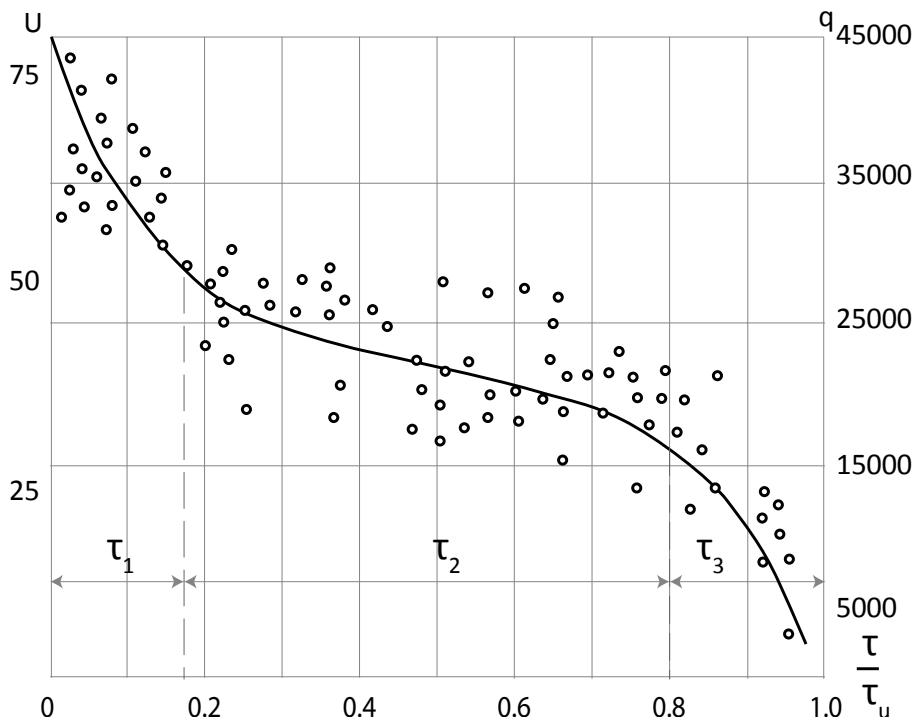


Рис.2. Зміна теплового потоку  $q$ , ккал/(м<sup>2</sup> год) і вагового навантаження  $u$ , кг/(м<sup>2</sup> год) при уварюванні утфелю І кристалізації [ 3 ].



Після включення вакуум-апарату в роботу починається інтенсивне кипіння, причому економайзерна зона займає лише незначну частину висоти теплообмінної труби. Інтенсивність випаровування досягає  $35-75 \text{ кг}/(\text{м}^2 \times \text{год})$  в залежності від густини сиропу та величини корисної різниці температур. На початковій стадії величина фізико-хімічної та гідростатичної депресій відносно мало впливають на інтенсивність теплообміну.

Для цих умов вакуум-апарат з поверхнею теплообміну  $300 \text{ м}^2$  (ВАМЦ-60) дає в вакуумну систему  $10,5-22,5$  тон пари на годину на протязі приблизно  $25-35$  хвилин. Це призводить до перевантаження вакуумної системи, конденсаторів, а також призводить до тимчасового перерозподілу паровідборів на випарній установці.

Вакуум-апарати з природною циркуляцією для цього режиму можуть мати навіть більш високі інтенсивності теплообміну аніж апарати з циркуляторами. Пояснюється це роботою на більш рідких сиропих та більшими величинами корисної різниці температур, що для умов бульбашкового кипіння має вирішальне значення.

Однак така інтенсивність теплообміну короткотермінова. Із згущенням розчину вона досить швидко зменшується, а висота економайзерної зони зростає, і з певного моменту уварювання утфелів займає всю висоту теплообмінної труби. Настає режим однофазного конвективного теплообміну. В цьому разі значно зростає вага швидкості течії утфелю і ефективність примусової циркуляції. В теплообмінній трубі відбувається нагрівання утфелю без зміни агрегатного стану, а потім він, піднімаючись над трубною решіткою, вискіпає і згущується. На цих стадіях варки переваги вакуум-апаратів із примусовою циркуляцією беззаперечні як з точки зору теплотехніки оскільки дає можливість застосовувати пару більш низького потенціалу, так і по технологічним показникам, перш за все, по рівномірності та розмірам кристалів цукру.

## Список використаної літератури

1. Sugar Technology. Beet and Cane Sugar Manufacture// [P.W van der Poel, H. Schiweck, T. Shwartz ets all.].– Berlin: Bartens KG, 1998.–1102 s.
2. Штангеев К.О. Втрати температурного напору у випарних установках цукрового заводу /К.О. Штангеев//Вісник харчової промисловості. Цукрова галузь.- 2016.- № 8.- С.4-6.
3. Попов В.Д. Тепловий розрахунок утфельних вакуум-апаратів (фізичні основи і методика)/В.Д. Попов// К.: Держ. в-во технічної літератури.-1958.-328 С.