

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЕКОНОМІКИ І ТОРГІВЛІ  
імені Михайла Туган-Барановського

ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ  
ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

*Тематичний збірник наукових праць*

Випуск 29

Том 2

ДонНУЕТ  
Донецьк  
2012

## ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В МІЖТРУБНОМУ ПРОСТОРІ НАГРІВАЛЬНОЇ КАМЕРИ ВАКУУМ-АПАРАТА ВАЦМ-60

*У статті наведено результати чисельного дослідження температурного поля в міжтрубному просторі нагрівальної камери вакуум-апарата. Виявлено основну причину наявності поля температур у поперечному перерізі вакуум-апарата.*

**Ключові слова:** чисельне дослідження, температурне поле, вакуум-апарат, програмний комплекс FlowVision, рівняння Нав'є-Стокса, поле швидкостей.

Одним з основних завдань цукрового виробництва залишається отримання високоякісного цукру в процесі кристалізації у вакуум-апаратах із мінімальними фінансовими, матеріальними й енергетичними витратами. Конструкція вакуум-апарата, у першу чергу, має бути спрямована на забезпечення в усьому об'ємі апарата інтенсивної кристалізації.

Дослідження температурного поля у вакуум-апаратах [1] показали, що це поле є нерівномірним як за висотою, так і за поперечним перерізом апарата. Перебування елементарних комірок кристалізуючої суспензії в зоні перегрівання викликає розчинення кристалів, а у випадку кристалізації сахарози, – ще й збільшує її втрати від термічного розкладу. Поле температури біля поверхонь теплообміну визначає зростання парових бульбашок, їх розміри під час відриві, кількість діючих центрів пароутворення на поверхні нагрівання, а також частоту відриву бульбашок, тобто інтенсивність процесу кипіння і, як наслідок, – кристалізації. Наявність поля температури зумовлює різні значення коефіцієнтів розчинності та пересичення, що призводить до нерівномірного зростання кристалів, виникнення конгломератів і генерації вторинних кристалів. Із цих точок зору необхідно зменшувати нерівномірність температурного поля. Якщо нерівномірність за висотою апарата зумовлена наявністю гідродинамічної депресії, то нерівномірність за поперечним перерізом пояснюють перегріванням кристалізуючої маси біля стінок поверхонь теплообміну [1].

Проте, процес теплопередачі являє собою теплообмін між двома середовищами, що розділені між собою твердою перегородкою. Тому очевидним є той факт, що на нерівномірність поля температур у робочому об'ємі вакуум-апарата впливатиме також і нерівномірність поля температур по іншій бік стінки нагрівальної камери, тобто в міжтрубному просторі.

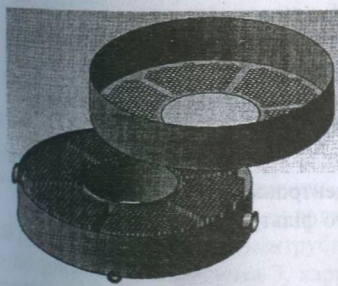
Метою статі є чисельне дослідження температурного поля в міжтрубному просторі нагрівальної камери вакуум-апарата та виявлення причини наявності цього поля.



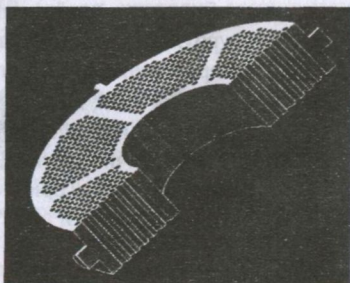
Чисельне дослідження базується на використанні математичної моделі. Фізична суть процесу, що моделюється, полягає в наступному: вакуум-апарат періодичної дії з трубчатою поверхнею нагрівання заповнюється цукровим сиропом, який потрапляє до кип'ятильної трубки нагрівальної камери, у міжтрубний простір якої подається волога насичена пара зі швидкістю на вході 35 м/с і температурою  $t_{\text{пари}} \approx 120^\circ\text{C}$ . За рахунок теплопередачі в об'ємі апарата відбувається кипіння сиропу за середньої температури  $68^\circ\text{C}$  і тиску 0,02 МПа. Оскільки йде процес конденсації нагрівної пари, то температура кип'ятильних трубок за висотою буде різною, тому що, конденсат стікає по трубках зверху до низу. Отже, температура трубки з боку пари за висотою знижується від  $t_{\text{пари}} \approx 120^\circ\text{C}$  (температура насиченої пари) до температури конденсату. Метою математичного моделювання є визначення температури нагрівальної пари в кожній точці міжтрубного простору парової камери в певний момент часу за умови, що температура стінок кип'ятильних трубок і циркулювальної труби дорівнює температурі кипіння сиропу, тобто  $-68^\circ\text{C}$ , а зовнішня обичайка приймається теплоізолюваною.

Поставлене завдання математично описується диференціальними рівняннями руху рідини в частинних похідних (Нав'є-Стокса) та рівнянням збереження енергії. Ураховуючи складність геометрії області розрахунку, а також те, що розв'язати рівняння Нав'є-Стокса аналітичним шляхом надзвичайно важко, для розв'язання системи названих рівнянь застосували чисельні методи. Із цією метою використали програмний комплекс FlowVision, в основу якого покладено чисельні методи [2].

За допомогою програм КОМПАС-3D V10 і Autodesk Inventor 2009 було створено тривимірне зображення нагрівальної камери вакуум-апарата ВАЦМ-60 (рисунок 1, а) і на його основі побудовано модель міжтрубного простору для розрахунку в програмному комплексі FlowVision (рисунок 2, б). Використання названих програмних продуктів надає можливості забезпечити під час моделювання геометричну подібність, часову подібність, подібність фізичних величин, а також подібність початкових і граничних умов.



а



б

Рисунок 1 – Тривимірне зображення нагрівальної камери вакуум апарата ВАЦМ-60 (а) та модель міжтрубного простору для розрахунку в ПК FlowVision (б)

Методика математичного моделювання за допомогою ПК FlowVision полягає в наступному:

– обираємо модель для розрахунку температури нагрівальної пари в кожній точці міжтрубного простору парової камери. Ураховуючи особливості руху нагрівальної пари приймаємо модель «несжимаемая жидкость» (термінологія ПК Flow Vision), яка призначена для моделювання течії газу за великих чисел Рейнольдса і малих числах Маха.

Дана модель являє собою систему рівнянь Нав'є-Стокса та збереження енергії:

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial t} + \nabla(V \otimes V) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla \left( (\mu + \mu_t)(\nabla V + (\nabla V)^T) \right) + S, \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(Vh) = \frac{1}{\rho} \nabla \left( \left( \frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho}, \end{cases} \quad (1)$$

де джерело  $S$  обчислюється за наступною формулою:

$$S = \left( 1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho} \right) g + B + \frac{R}{\rho}, \quad (2)$$

де  $\nabla$  – оператор Лапласа;

$h$  – питома ентальпія, Дж/кг;

$t$  – час, с;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

$V$  – вектор відносної швидкості, м/с;

$\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;

$C_p$  – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

$\mu_t$  – турбулентна в'язкість, кг/(м·с);

$Pr_t$  – турбулентне число Прандтля;

•  $Q$  – джерело тепла анізотропного фільтру опору, Вт/м<sup>3</sup>;

$P$  – відносний тиск, Па;

$\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;

$\rho_{hyd}$  – гідростатична густина, кг/м<sup>3</sup>;

$B$  – сили обертання (Коріоліса і відцентрова), м/с<sup>2</sup>;

$R$  – сили ізотропного й анізотропного фільтра опору, кг/(м<sup>2</sup>·с<sup>2</sup>);

– задаємо початкові і граничні умови;

– задаємо фізико-хімічні властивості для нагрівальної пари;

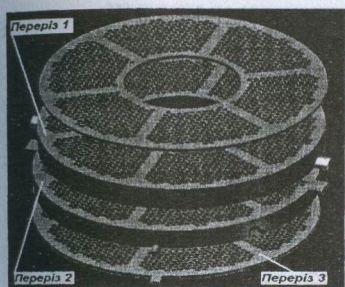
– розбиваємо область розрахунку на комірки, загальна кількість яких даного розрахунку становить 21308;

– позначаємо перерізи, в яких будемо спостерігати за розподіленням температури (рисунок 2, а);

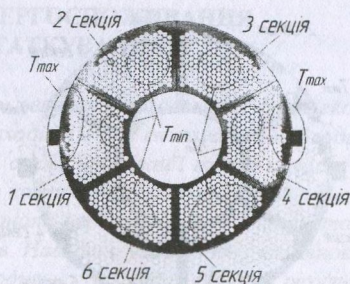
– виконуємо розрахунок.



У результаті моделювання отримано наступний розподіл температури в міжтрубному просторі нагрівальної камери вакуум-апарата ВАЦМ-60 уздовж виділеного поперечного перерізу (рисунок 2, б). Аналіз результату, що отримали, показує, що найменша температура спостерігається в середніх зонах кожної секції, а найбільша температура – в зоні надходження перегрітої пари в нагрівальну камеру. Розглядаючи розрахунковий поперечний переріз як коло, утворене з шести секцій, то півколо, утворене півсекціями 1, 4 і секціями 2 та 3, має більшу середню температуру, у порівнянні з півколом, утвореним півсекціями 1, 4 і секціями 5 та 6. Таким чином, маємо перепад температур між півколами. У результаті такого перепаду температур рушійна сила процесу теплопередачі від нагрівальної пари до сиропу в двох півколах буде відрізнятися. До вище названих наслідків наявності поля температур додамо, що це призведе до різного істинного газовмісту (кількість утворених парових бульбашок) у кип'ятильних трубках в обох півколах і, як наслідок, вплине на рухомий напір природної циркуляції сиропу (утфелю).



а



б

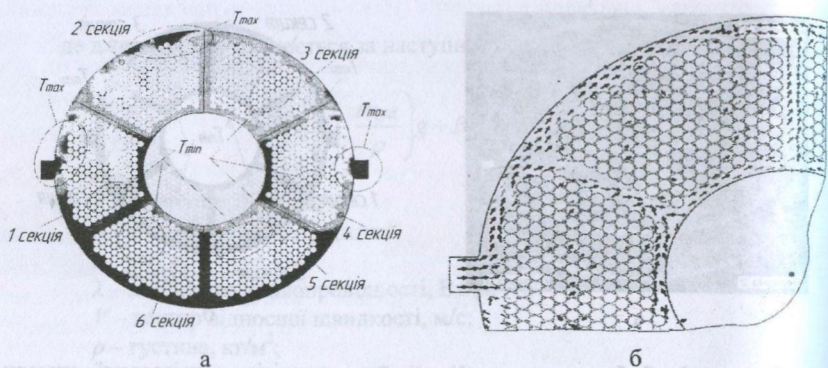
Рисунок 2 – Зображення розрахункових перерізів нагрівальної камери вакуум-апарата ВАЦМ-60 (а) та розподіл температури в розрахунковому перерізі 2 (б)

Пояснити наявність поля температури через тиск є неможливим, оскільки згідно із законом Шарля, який є частинним випадком закону стану ідеального газу, між тиском і температурою за постійного об'єму існує пряма залежність, тому необхідно пояснити причини, які викликають наявність цих полів.

Для пояснення наявності поля температури розглянемо розподіл швидкостей руху перегрітої пари в міжтрубному просторі нагрівальної камери. Відповідно до рисунка 2 та рисунка 3, характер розподілу температури є подібним до характеру розподілу швидкостей руху пари. На основі цього робимо висновок, що причина наявності поля температури обумовлюється наявністю поля швидкостей, а завдання зі зменшення перепаду температур в перерізі апарата потрібно розглядати як завдання із забезпечення рівномірного розподілу швидкостей руху пари в міжтрубному просторі нагрівальної камери. Зауважимо, що необхідно прагнути до збільшення швидкості руху пари, оскільки процес теплооб-

міну між фазами прискорюється, коли прискорюється оновлення поверхні контакту фаз, адже при цьому у безпосередній контакт вступають свіжі елементи середовища, рушійна сила процесу при цьому збільшується і процес теплообміну прискорюється.

Проаналізуємо отриманий розподіл швидкості руху пари вздовж розрахункового перерізу 2 (рисунок 3, а): найменша швидкість руху пари – в середніх зонах кожної секції, за винятком секції 2; найбільша швидкість в зонах надходження і виходу перегрітої пари. Півколо, утворене півсекціями 1, 4 і секціями 5 та 6, має більшу середню швидкість, порівняно з протилежним півколом. Різниця між цими півколами полягає в тому, що півколо, утворене півсекціями 1, 4 і секціями 2 та 3, можна розглядати як півколо утворене двома протилежно розташованими входами пари й одним виходом. Між входами і виходом виникає різниця потенціалів, що і сприяє спрямованому руху пари з підвищеною швидкістю. За розподілом напрямку руху нагрівальної пари маємо можливість спостерігати на рисунку 2 (б).



а – у формі заливки; б – у векторній формі.

Рисунок 3 – Розподіл швидкості в міжтрубному просторі нагрівальної камери вакуум-апарата ВАЦМ-60 в розрахунковому перерізі 2

У результаті чисельного дослідження визначено розподіл температур нагрівальної пари в кожній точці міжтрубного простору парової камери в будь-який момент часу; з'ясовано, що пара в міжтрубному просторі розподіляється нерівномірно і цей фактор викликає наявність поля швидкостей, яке і буде основною причиною наявності поля температури вздовж діаметра апарата.

Перспективою подальших досліджень є визначення раціонального розташування вхідних патрубків і їх кількості для забезпечення більш рівномірного розподілу швидкостей руху пари в міжтрубному просторі нагрівальної камери. На основі результатів, що отримали, провести модернізацію нагрівальної камери вакуум-апаратів.



## Література

1. Бажал И.Г. Переконденсация в дисперсных системах / И.Г. Бажал, О.Д. Куриленко. – К.: Наук. думка, 1975. – 216 с.
2. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Версия 2.2. Руководство пользователя. – М.: Тесис, 2005. – 304 с.
3. Попов В.Д. Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарозы / В.Д. Попов. – М.: Пищ. Пром-сть, 1973. – 316 с.
4. Горяжа В.Т. Интенсификация процесса уваривания утфелей / В.Т. Горяжа. – М.: Лёг. и пищ. Пром-сть, 1981. – 152 с.