УДК 664.1.054

МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕПЛООБМІННОЇ КАМЕРИ ВАКУУМ-АПАРАТА ВАЦМ-60 З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ТА ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ

Мирончук В. Г., Погорілий Т. М., Дмитренко І. М.

MODERNIZATION OF THE VACUUM PAN VACM-60 HEATING CHAMBER TO REDUCE THE TEMPERATURE FIELD UNEVEN AND TO INTENSIFY HEAT TRANSFER

Mironchuk V., Pogoriliy T., Dmitrenko I.

В даній статті було запропоновано спосіб модернізації теплообмінної камери вакуум-апарату періодичної дії ВАЦМ-60 шляхом застосування розподілюючого пристрою, що встановлюється в середині камери, з метою зменшення нерівномірності температурного поля в робочому об'ємі апарата. Подані результати чисельного розрахунку щодо підтвердження ефективності запропонованої модернізації.

Ключові слова: *температурне поле, вакуум-апарат періодичної дії ВАЦМ-60, теплообмін в режимі плівкової конденсації, програмний комплекс FlowVision.*

Постановка проблеми. Перш ніж сприяти інтенсифікації процесів під час уварювання цукрових утфелів в робочому об'ємі вакуум-апарата, необхідно мінімізувати негативний вплив зовнішніх факторів на даний процес.

Одним з основних негативних факторів вважається нерівномірність температурного поля в робочому об'ємі вакуум-апарата, оскільки він спричиняє суттєві негативні наслідки [1].

Перебування елементарних комірок кристалізуючої суспензії в зоні перегрівання викликає розчинення кристалів, а у випадку кристалізації сахарози, — ще й збільшує її втрати від термічного розкладу, що призводить до зниження якості кінцевого продукту – цукру [2].

У перегрітих зонах міжкристальний розчин знаходиться в ненасиченому стані, що призводить до включення його у западини і тріщини кристалів, які згодом заростають, потрапляючи в менш перегріті і більш пересичені області, що негативно впливає на якість кристалічного цукру [1].

Поле температури біля поверхонь теплообміну визначає інтенсивність процесу кипіння. У свою чергу процес кипіння впливає на найважливіші гідродинамічні характеристики кип'ятильних труб, такі як істинний газовміст та істинна швидкість течії фаз. В залежності від газовмісту в промислових вакуум-апаратах спостерігається снарядна або поршнева форма течії паро-утфельних потоків, від якої залежить головна складова загального опору циркуляційного контуру – гідравлічний опір в кип'ятильних трубках [3].

Зниження інтенсивності пароутворення супроводжується збільшенням довжини економайзерної ділянки та зменшенням довжини ділянки генерації пари кип'ятильних трубок, підвищенням термічного опору, а також безпосередньо впливає на рушійний напір природної циркуляції утфелю. Зменшення швидкості циркуляції супроводжується зниженням інтенсивності теплообміну, зменшенням величини питомого теплового потоку і, як наслідок, погіршенням умов кристалізації. Отже, значна нерівномірність температурного поля, впливаючи на процес кипіння, викликає різне значення газовмісту в кип'ятильних трубках і відповідно нерівномірну циркуляцію маси, що кристалізується [2].

Додамо, що нерівномірний гранулометричний склад цукру призводить до збільшення витрат води на промивання утфелю і значно погіршує умови роботи центрифуг.

Мета. Основною метою статі є розробка та обґрунтування способів щодо зменшення нерівномірності температурного поля в робочому об'ємі вакуум-апараті періодичної дії та інтенсифікація теплообміну за рахунок збільшення коефіцієнту тепловіддачі від пересиченої пари до стінки кип'ятильної трубки.

Викладення основних матеріалів. На основі визначеної нами математичної залежності між вектором густини теплового потоку та швидкістю руху пересиченої пари в міжтрубному просторі теплообмінної камери (1), було зроблено висновок, що задачу по зменшенню нерівномірності температурного поля в робочому об'ємі апарата можна звести до задачі, що спрямована на забезпечення більш рівномірного розподілу швидкості руху пересиченої пари в міжтрубному просторі.

$$q = \frac{\lambda_к}{\sqrt[3]{\dfrac{3 \cdot D \cdot \rho_п \cdot \mu_к}{g \cdot \rho_к^2 \cdot d_{тр}} \int_0^H U(h)dh}} \cdot (T_{нас} - T_{ст}) \qquad (1)$$

де $\lambda_к$ – коефіцієнт теплопровідності конденсату (води), *Вт/(м·К)*;

q – густина теплового потоку, *Дж/(с·м²)*;

$T_{нас}$ – температура насичення водяної пари при даному тиску, *К*;

$T_{ст}$ – температура стінки кип'ятильної трубки, *К*.

$\mu_к$ – коефіцієнт динамічної в'язкості конденсату, *Па·с*;

$\rho_п$ – густина пари, *кг/м*^{3};

g – прискорення вільного падіння, *м/с*^{2};

$\rho_к$ – густина конденсату (води), *кг/м*^{3};

$d_{тр}$ – зовнішній діаметр трубки теплообмінної камери, *м*;

U(h) – швидкість надходження пари в об'єм міжтрубного простору в залежності від висоти кип'ятильної трубки, *м/с*;

D – діаметр циліндричного об'єму міжтрубного простору, що оточує одну трубку, *м*.

Застосуємо дане положення для модернізації теплообмінної камери вакуум-апарату періодичної дії ВАЦМ-60 [4]. Дана модернізація спрямована на забезпечення більш рівномірного температурного поля у робочому об'ємі апарата, який заповнюється цукровим сиропом, що поступає в кип'ятильні трубки теплообмінної камери, в міжтрубний простір якої подається перегріта пара зі швидкістю на вході 35 м/с і температурою $T_{пари}$=120°С. За рахунок теплопередачі в об'ємі апарата відбувається кипіння сиропу при середній температурі 68°С і тиску 0,02 МПа.

Модернізація теплообмінної камери вакуум-апарата ВАЦМ-60 полягатиме у застосуванні розподілюючого пристрою (рис. 1).

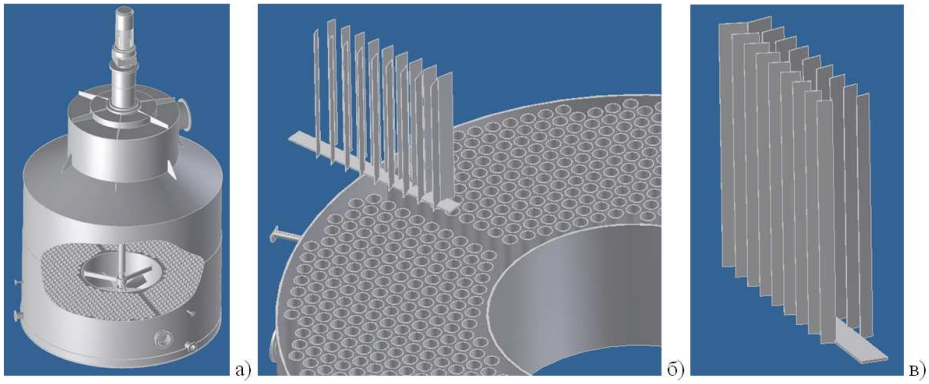

Рис. 1. а) вакуум-апарат ВАЦМ-60; б) теплообмінна камера вакуум-апарата ВАЦМ-60; в) розподілюючий пристрій.

Методика визначення ефективності модернізації полягає в наступному:

- визначаємо розподіл швидкості пересиченої пари в міжтрубному просторі теплообмінної камери;
- виділяємо по висоті теплообмінної камери 10 поперечних перерізів на однаковій відстані між собою і приймаємо, що вздовж висоти отриманого елементарного об'єму швидкість пари постійна, а змінюються лише в поперечній площині;
- для кожного елементарного об'єму в поперечній площині виділяємо 5 зон, яким відповідатиме певне усереднене значення швидкості руху пари;
- визначаємо площі виділених зон за допомогою програмного продукту Photoshop CS3;
- для оцінки нерівномірності температурного поля в поперечному перерізі кожного елементарного об'єму застосуємо такий показник, як середньоквадратичне відхилення швидкості руху пересиченої пари від середнього значення:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{S_{заг}} \cdot \sum_{i=1}^{n} U_i^2 \cdot S_i - \left(\frac{1}{S_{заг}} \cdot \sum_{i=1}^{n} U_i \cdot S_i \right)^2} \qquad (2)$$

де U_i – швидкість руху пересиченої пари в виділених зонах, *м/с*.

S_i – площі виділених зон, *м*^{2}.

$S_{заг}$ – загальна площа поперечного перерізу міжтрубного простору теплообмінної камери вакуум-апарата ВАЦМ-60, *м*^{2}.

Ефективність модернізації полягає у досягненні більш низького середньоквадратичного відхилення по висоті модернізованої теплообмінної камери в порівнянні з початковим варіантом.

Для визначення швидкості руху пересиченої пари в міжтрубному просторі теплообмінної камери необхідно розв'язати систему диференціальних рівнянь в частинних похідних, що описують рух реальної рідини, а саме рівняння Нав'є-Стокса і нерозривності течії рідини при певних умовах однозначності.

Враховуючи складність геометрії області розрахунку, а також те, що розв'язати рівняння Нав'є-Стокса аналітичним шляхом надзвичайно важко, для розв'язку системи названих рівнянь застосували програмний комплекс FlowVision, в основу якого покладено чисельні методи розрахунку диференціальних рівнянь в частинних похідних [5].

За допомогою програм КОМПАС-3D V10 і Autodesk Inventor 2009 було створено трьохвимірні зображення теплообмінних камер без розподілюючого пристрою і з ним, і на їх основі побудовано моделі міжтрубного простору для розрахунку в програмному комплексі FlowVision. Використання названих програмних продуктів дає

можливість забезпечити при моделюванні геометричну подібність, часову подібність, подібність фізичних величин, а також подібність початкових і граничних умов.

В результаті розрахунку в П К FlowVision, відповідно до методики [6], було визначено розподіл швидкості пересиченої пари в кожному з виділених поперечних перерізів теплообмінної камери при розташуванні розподілюючого пристрою і без нього (рис. 2).

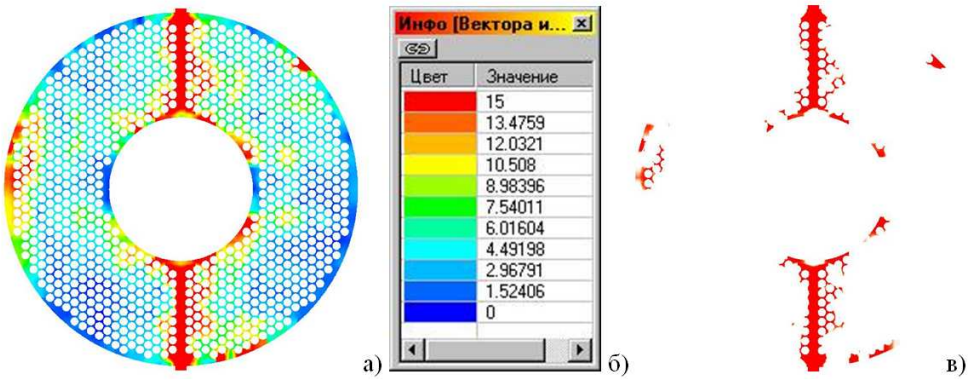

Рис. 2. а) розподіл швидкості руху пари в поперечному перерізі; б) чисельні значення швидкості руху пари в різних зонах; в) виділення червоної зони за допомогою Photoshop CS3.

Виділяємо 5 зон з характерними для них усередненими значеннями швидкості руху пари:

- Червона – 14,24 м/с;
- Жовта – 11,24 м/с;
- Зелена – 8,26 м/с;
- Блакитна – 4,49 м/с;
- Синя – 0,76 м/с.

Результати чисельних досліджень. В результаті проведення чисельних розрахунків було побудовано графік зміни середньоквадратичного відхилення σ по висоті теплообмінної камери при умові відсутності (рис. 3, крива I) і наявності (рис. 3, крива II) розподілюючого пристрою.

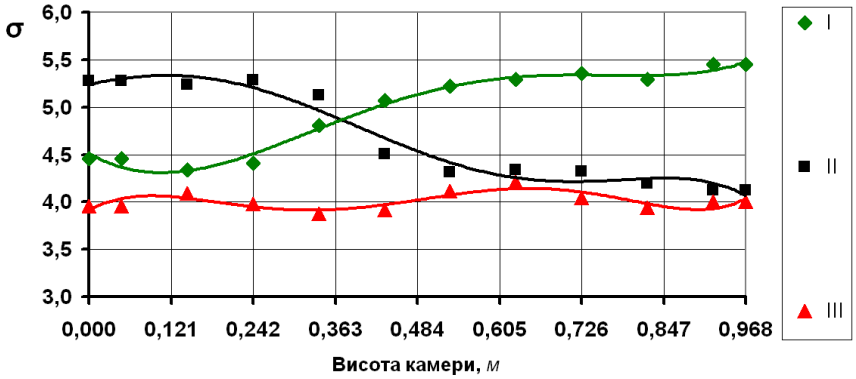

Рис. 3. Графік зміни середньоквадратичного відхилення σ по висоті теплообмінної камери:
I – при відсутності розподілюючого пристрою;
II – при наявності розподілюючого пристрою;
III – при наявності розподілюючого пристрою висотою 0,43 м.

Аналіз отриманих залежностей показує, що, починаючи з висоти 0,43 м, σ зменшується при умові відсутності розподілюючого пристрою. При умові наявності даного пристрою, починаючи з тієї ж позначки, σ збільшується.

Виходячи з аналізу отриманих результатів було запропоновано встановити розподілюючий пристрій висотою 0,43 м, що повинно забезпечити переваги кожного з розрахованих випадків.

По аналогії з попередніми варіантами провели розрахунок поля швидкостей в теплообмінній камері при встановленні розподілюючого пристрою висотою 0,43 м. Визначили зміну середньоквадратичного відхилення σ по висоті теплообмінної камери (рис. 3, крива III). Аналіз отриманої залежності показує, що даний випадок забезпечує більш низьке значення σ по всій висоті теплообмінної камери.

Застосування розподілюючого пристрою забезпечує більш рівномірне поле швидкостей в міжтрубному просторі теплообмінної камери вакуум-апарата ВАЦМ-60. Згідно до залежності (3), швидкість пересиченої пари в міжтрубному просторі впливає на товщину плівки конденсату, що утворюється на поверхні кип’ятильної трубки, і відповідно на інтенсивність процесу теплообміну в режимі плівкової конденсації.

$$\delta_к = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot D \cdot \rho_п \cdot \mu_к}{g \cdot \rho_к^2 \cdot d_{тр}} \int_0^H U(h)dh}\,. \qquad (3)$$

В якості параметру, що характеризуватиме інтенсивність теплообміну в режимі плівкової конденсації, приймаємо коефіцієнт тепловіддачі α_1 від пересиченої пари до поверхні кип'ятильної трубки, який визначатиметься згідно до рівняння (4).

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_к}{\sqrt[3]{\frac{3 \cdot D \cdot \rho_п \cdot \mu_к}{g \cdot \rho_к^2 \cdot d_{тр}} \int_0^H U(h)dh}} \qquad (4)$$

Як бачимо з рівняння (3), невідомою є залежність швидкості руху пари в міжтрубному просторі від висоти кип'ятильної трубки U(h). Маючи отриманий за допомогою ПК FlowVision розподіл швидкості руху пари в кожних з 10-ти виділених по висоті поперечних перерізів, визначаємо середню швидкість руху пари $U_{ср}$ в кожному з цих перерізів за наступною формулою:

$$U_{ср} = \frac{U_1 \cdot S_1 + U_2 \cdot S_2 + U_3 \cdot S_3 + U_4 \cdot S_4 + U_5 \cdot S_5}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5} \qquad (5)$$

де U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 – швидкість руху пересиченої пари в кожній з п'яти виділених зон, *м/с*;
S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 – площі виділених зон, *м*^{2}.

На (рис. 4) приведені результати, отримані за рівнянням (5) при відповідних умовах.

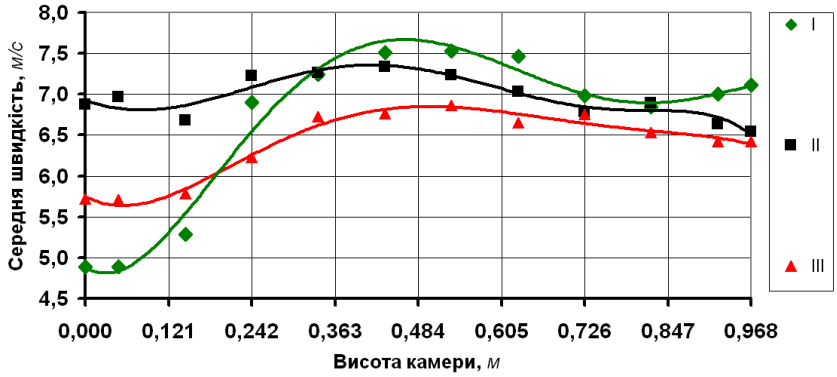

Рис. 4. Графік зміни середньої швидкості руху пари в міжтрубному просторі по висоті кип'ятильної трубки $U_{ср}$=f(h):
I – при відсутності розподілюючого пристрою;
II – при наявності розподілюючого пристрою;
III – при наявності розподілюючого пристрою висотою 0,43 м.

Побудова графіків (рис. 4) дала можливість отримати регресійні моделі, що описують залежність середньої швидкості руху пересиченої пари вздовж висоти теплообмінної камери $U_{ср}$= f(h):

I: $$U_{ср} = -91{,}91 \cdot h^5 + 268{,}03 \cdot h^4 - 269{,}02 \cdot h^3 + 100{,}30 \cdot h^2 - 5{,}12 \cdot h + 4{,}88 \qquad (6)$$

II: $$U_{ср} = -95{,}14 \cdot h^6 + 219{,}52 \cdot h^5 - 150{,}09 \cdot h^4 + 9{,}05 \cdot h^3 + 18{,}95 \cdot h^2 - 3{,}00 \cdot h + 6{,}93 \qquad (7)$$

III: $$U_{ср} = -43{,}65 \cdot h^5 + 125{,}27 \cdot h^4 - 128{,}22 \cdot h^3 + 51{,}69 \cdot h^2 - 4{,}52 \cdot h + 5{,}75 \qquad (8)$$

Підставляючи отримані залежності (6), (7), (8) в рівняння (3) будуємо графік зміни середньої вздовж поперечного перерізу товщини плівки конденсату по висоті теплообмінної камери $\delta к_{ср}$= f(h) (рис. 5) при відповідних умовах.

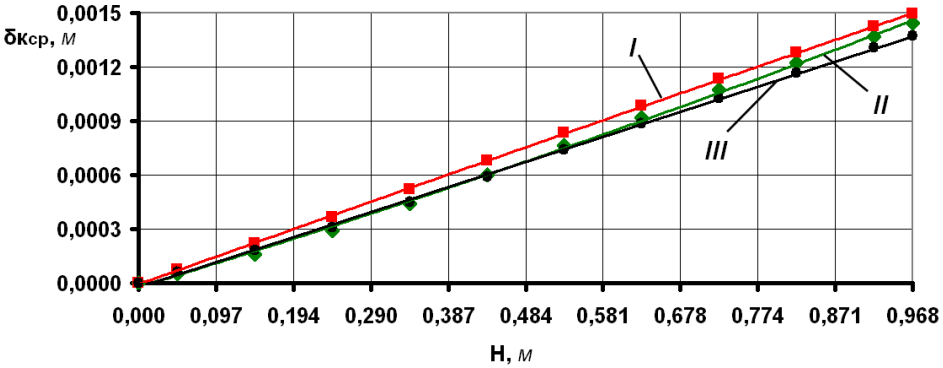

Рис. 5. Графік зміни середньої вздовж поперечного перерізу товщини плівки конденсату по висоті теплообмінної камери $\delta к_{ср}$= f(h):
I – при відсутності розподілюючого пристрою;
II – при наявності розподілюючого пристрою;
III – при наявності розподілюючого пристрою висотою 0,43 м.

Підставляючи отримані залежності (6), (7), (8) в рівняння (4) будуємо графік зміни середнього вздовж поперечного перерізу коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_{1ср}$ від пересиченої пари до поверхні кип'ятильної трубки по висоті теплообмінної камери $\alpha_{1ср}$= f(h) (рис. 6) при відповідних умовах.

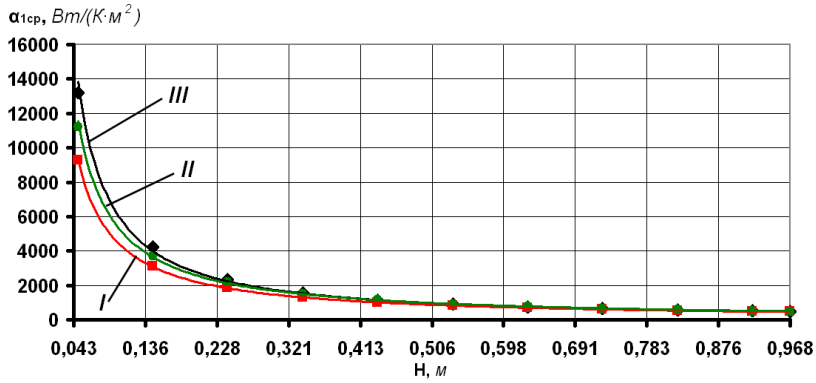

Рис. 6. Графік зміни середнього вздовж поперечного перерізу коефіцієнта тепловіддачі від пересиченої пари до поверхні кип'ятильної трубки по висоті теплообмінної камери $\alpha_{1ср}$= f(h):
I – при відсутності розподілюючого пристрою;
II – при наявності розподілюючого пристрою;
III – при наявності розподілюючого пристрою висотою 0,43 м.

Визначаємо середній по висоті і вздовж поперечного перерізу теплообмінної камери коефіцієнт тепловіддачі $\alpha'_{1ср}$ від пересиченої пари до поверхні кип'ятильної трубки за наступною формулою:

$$\alpha'_{1ср} = \frac{1}{H} \cdot \int_0^H \alpha_{1ср}(h)dh \qquad (9)$$

Середній по висоті і вздовж поперечного перерізу теплообмінної камери коефіцієнт тепловіддачі $\alpha'_{1ср}$ від пересиченої пари до поверхні кип'ятильної трубки чисельно дорівнює:

- при умові відсутності розподілюючого пристрою – $\alpha'_{1ср}$= 478,57 *Вт/(К·м²)*;
- при умові наявності розподілюючого пристрою – $\alpha'_{1ср}$= 537,49 *Вт/(К·м²)*;
- при умові наявності розподілюючого пристрою висотою 0,4 м – $\alpha'_{1ср}$= 552,51 *Вт/(К·м²)*.

Збільшення середнього по висоті і вздовж поперечного перерізу теплообмінної камери коефіцієнта тепловіддачі $\alpha'_{1ср}$ від пересиченої пари до поверхні кип'ятильної трубки, при умові наявності розподілюючого пристрою висотою 0,4 м, складає ***15%*** в порівнянні з початковим варіантом.

Висновки. На основі теоретичних аспектів, було запропоновано провести модернізацію теплообмінної камери вакуум-апарату періодичної дії ВАЦМ-60 шляхом застосування розподілюючого пристрою, що встановлюється в середині камери.

Чисельні розрахунки, проведені за допомогою програмного комплексу FlowVision, підтвердили ефективність модернізації шляхом застосування розподілюючого пристрою висотою 0,43 м, що забезпечує найменше значення запропонованого показника нерівномірності температурного поля – середньоквадратичного відхилення σ швидкості руху пересиченої пари від середнього значення.

Крім того, запропонована модернізація сприяє інтенсифікації процесу теплообміну в режимі плівкової конденсації, оскільки середній по висоті і вздовж поперечного перерізу теплообмінної камери коефіцієнт тепловіддачі $\alpha'_{1ср}$ від пересиченої пари до поверхні кип'ятильної трубки збільшується на ***15%.***

Л і т е р а т у р а

1. Бажал И. Г., Куриленко О. Д. Переконденсация в дисперсных системах. – К.: Наукова думка, 1975. – 216 с.
2. Гаряжа В. Т. Интенсификация процесса уваривания утфелей. – М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1981. – 152 с.
3. Попов В. Д. Основы теории тепло - и масообмена при кристаллизации сахарозы. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 316с.
4. Кухар В. Н., Лысюк П. И. Вакуум-аппарат с циркулятором: оптимизация теплопотребления, улучшение качества готовой продукции.// Сахар – 2006 – № 7 – с. 48-52
5. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Версия 2.2. Руководство пользователя. – М.: Тесис, 2005. – 304 с.
6. Мирончук В. Г., Погорілий Т. М., Дмитренко І. М. Чисельне дослідження температурного поля в міжтрубному просторі гріючої камери вакуум–апарата ВАЦМ-60 // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. / Голов. Ред.. О. О. Шубін; Донец. нац ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. – 2012 – Вип. № 29, т. 2. – с. 84-89

R e f e r e n c e s

1. Bazhal I. G., Kurilenko O. D. Perekondensacija v dispersnyh sistemah. – K.: Naukova dumka, 1975. – 216 s.
2. Garjazha V. T. Intensifikacija processa uvarivanija utfelej. – M.: Ljogkaja i pishhevaja promyshlennost', 1981. – 152 s.
3. Popov V. D. Osnovy teorii teplo - i masoobmena pri kristallizacii saharozy. – M.: Pishhevaja promyshlennost', 1973. – 316s.
4. Kuhar V. N., Lysjuk P. I. Vakuum-apparat s cirkuljatorom: optimizacija teplopotreblenija, uluchshenie kachestva gotovoj produkcii.// Sahar – 2006 – № 7 – s. 48-52
5. Sistema modelirovanija dvizhenija zhidkosti i gaza FlowVision. Versija 2.2. Rukovodstvo pol'zovatelja. – M.: Tesis, 2005. – 304 s.
6. Mironchuk V. G., Pogorilij T. M., Dmitrenko I. M. Chisel'ne doslidzhennja temperaturnogo polja v mizhtrubnomu prostori grijuchoї kameri vakuum-aparata VACM-60 // Obladnannja ta tehnologiї harchovih virobnictv: temat. zb. nauk. pr. / Golov. Red.. O. O. Shubin; Donec. nac un-t ekonomiki i torgivli im. M. Tugan-Baranovs'kogo. – 2012 – Vip. № 29, t. 2. – s. 84-89

Мирончук В. Г., Погорелый Т. М., Дмитренко И. М. Модернизация теплообменной камеры вакуум-аппарата ВАЦМ-60 с целью уменьшения неравномерности температурного поля и интенсификации теплообмена

В данной статье предложен способ модернизации теплообменной камеры вакуум-аппарата периодического действия ВАЦМ-60 путём использования распределяющего устройства, которое устанавливается в середине камеры, с целью уменьшения неравномерности температурного поля в рабочем объёме аппарата. Приведены результаты численного расчёта касательно подтверждения эффективности предложенной модернизации.

Ключевые слова: *температурное поле, вакуум-апарат периодического действия ВАЦМ-60, теплообмен в режиме плёночной конденсации, програмный комплекс FlowVision.*

Mironchuk V., Pogoriliy T., Dmitrenko I. Modernization of the vacuum pan VACM-60 heating chamber to reduce the temperature field uneven and to intensify heat transfer

The article deals with a modernization method of the vacuum pan VACM-60 heating chamber using the distributing device installed into chamber to reduce the temperature field uneven into vacuum pan working volume.

It is adduced investigation calculation results to confirm the effectiveness of the proposed modernization.

Keywords: *temperature field uneven, vacuum pan VACM-60, heat transfer in pellicle condensation mode, the software FlowVision.*

Мирончук В. Г. – зав. каф. ТОКТП, д.т.н., проф., Національного університету харчових технологій,
Погорілий Т. М. – к.т.н., доц. каф. ТОКТП, Національного університету харчових технологій,
Дмитренко І. М. – аспірант каф. ТОКТП, Національного університету харчових технологій.