

ISSN 2304-974X

**Ministry of Education and Science,
Youth and Sports of Ukraine**

**Міністерство освіти і науки,
молоді та спорту України**

**NATIONAL UNIVERSITY
OF FOOD TECHNOLOGIES**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

UKRAINIAN FOOD JOURNAL

№ 1

Kyiv

2012

Київ

ТЕОРЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ І ПРАКТИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛООБМІНУ В КОНВЕКТИВНИХ ХЛІБОПЕКАРСЬКИХ ПЕЧАХ

Логвінський Р.В., Доломакін Ю.Ю., Ковальов О.В., Федорів В.М.

***Анотація.** Подано теоретичні розрахунки і практичні вимірювання параметрів теплообміну в робочій камері конвективних хлібопекарських печей. Визначено характер розподілу швидкостей повітря по висоті пекарної камери. Отримано дані про кінетику перебігу процесів під час випікання.*

***Ключові слова:** теплообмін, конвективні хлібопекарські печі.*

Вступ. Нині при розширенні приватних, колективних підприємств широко використовують хлібопекарні малої потужності. Якість виробів на цих підприємствах значною мірою залежить від обладнання, а саме від конструкції, способу підведення теплоти до хлібопекарської печі. За кордоном використовують переважно ротатійні печі з конвективним підведенням теплоти. Процес випікання хліба в них здійснюється на багатоярусних вагонетках, які обертаються в потоці гарячого повітря.

Подібні печі зараз випускаються багатьма заводами і в Україні, але конструкція їх зроблена без урахування характеру тепловологообміну у робочій камері і не досліджено кінетику процесів, які відбуваються під час випікання.

Основна кількість теплоти в процесі випікання в ротатійних печах передається конвективно, в ході примусового обдування тістових заготовок гарячим повітрям. Тому інтенсифікація та пошук оптимальних режимів конвективного теплообміну в процесі випікання має велике значення.

Методи досліджень. Пошук оптимальних режимів конвективного теплообміну в процесі випікання.

Традиційна методика теплового розрахунку цього процесу в робочих камерах хлібопекарських печей має ряд суттєвих недоліків. Серед них – невизначеність вологообмінних складових тепловіддачі від гріючого середовища до тістової заготовки та теплопровідності в середині тіста-хліба, а також нерівномірності тепловіддачі по об'єму робочої камери.

Уточнений тепловий розрахунок процесу випікання ґрунтується на розв'язанні системи рівнянь взаємозв'язаної тепломасопровідності в граничних умовах третього роду відносно полів температури t та експериментального потенціалу вологості θ , а також потоків теплоти q та вологи j :

$$\begin{aligned} c_p \frac{\delta t}{\delta \tau} &= - \frac{\delta t}{\delta r} (q_r + q_m), \\ c_m \rho_o \frac{d\theta}{d\tau} &= - \frac{d\theta}{dr} (j_r + j_m) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{dt}{dr} \right)_{R,T} &= \alpha(t_n - t_n), \\ \left(\frac{d\theta}{dr} \right)_{R,T} &= \beta(\theta_n - \theta_n), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{де: } q_r = -\lambda \frac{dt}{dr}; \quad q_m = h_b(j_m + j_T); \quad j_\square = -\lambda_m \delta \frac{dt}{dr}; \quad j_T = -\lambda_T \frac{d\theta}{dr};$$

c – теплоємність; ρ – густина; τ – час; q_r, q_m – складові теплового потоку за рахунок теплопровідності та масопереносу; c_m – масоємність; ρ_o – густина сухого скелету вологого матеріалу; r – змінний радіус; j_m, j_T – складові потоку вологи за рахунок масопровідності та термодифузії; α – еквівалентний коефіцієнт тепловіддачі; t_n, t_n – температури теплоносія і поверхні тістової заготовки; β – коефіцієнт масовіддачі; λ – теплопровідність; h_b – ентальпія вологи; λ_m – масопровідність; δ – відносний коефіцієнт термодифузії;

Система рівнянь (1) може бути розв'язана при відомому характері змінення температури та потенціалу вологості в часі для локальної частини тіста-хліба. Цей характер задається технологічним регламентом, але температура і вологість теплоносія змінюються в процесі руху вздовж тіста-хліба через тепломасообмін. У разі подавання теплоносія з однієї сторони ці параметри змінюються по ширині робочої камери.

Розв'язання рівнянь (1) для локальних по висоті ділянок наведено в роботі [1].

Коефіцієнти тепло- і масовіддачі визначаються за формулами:

$$\alpha = \frac{q_r + q_m}{t_n - t_n} = \alpha_k + h_b \beta \frac{(\theta_n - \theta_n)}{(t_n - t_n)}; \quad \beta = \frac{j_m + j_T}{(\theta_n - \theta_n)},$$

де α_k – конвективна складова коефіцієнта тепловіддачі, що визначається за допомогою критеріальних рівнянь для вимушеного руху повітря крізь пучок виробів. Усі величини з індексом m – стосуються до масообміну. Рівняння (1) для локальних по висоті ділянок тістових заготовок можна розв'язувати аналітично за методикою і графіками роботи [2]. У цьому варіанті теплообмінні характеристики тістових заготовок вважаються постійними.

Точнішим є розв'язання рівнянь (1) методом скінченних різниць (2), який дає можливість врахувати залежність тепловологообмінних характеристик тіста-хліба від параметрів процесу і часу. Тіло тістової заготовки розбивається на коаксіальні шари завтовшки $(\Delta r)_n = r_n - r_{n+1}$ таким чином, щоб виконувалась умова $\ln = r_{n+1} / r_n = \text{const}$. Потім розраховуються потоки теплоти і вологи, а за ними – температур і потенціалів вологості для кожного шару від поверхні до центра послідовно для кожного моменту часу і від початку до досягнення центром хліба температури готовності. Параметри моменту часу залежать від зміни параметрів часу τ ;

$$\tau_1 = \tau + \Delta\tau.$$

У кожному новому розрахунку для наступного моменту часу маємо можливість змінити локальні по висоті камери та в часі граничні умови і тепловологообмінні характеристики з урахуванням визначених у попередньому розрахунку температур та

потенціалів вологості. В кожному розрахунку визначаються кількість теплоти, що підводиться до тістової заготовки за період часу, та кількість вологи, відведеної від нього, що в підсумку дає їх інтегральні значення.

Аналіз результатів розрахунку по висоті робочої камери показує, що зменшення температури теплоносія t_n залежить насамперед від геометричних характеристик тістових заготовок і швидкості теплоносія при додержанні постійного температурного режиму.

Основна кількість теплоти в процесі випікання в ротаційних печах передається конвективно внаслідок примусового обдування тістових заготовок гарячим повітрям. Тому встановлення режимів конвективного теплообміну в процесі випікання має вирішальне значення. Щільність теплового потоку в пекарській камері можна підвищити завдяки різниці температур Δt між теплоносієм і тістовою заготовкою або змінюючи коефіцієнт конвективної тепловіддачі α_k . Можливість інтенсифікації процесу випікання завдяки збільшенню різниці температур обмежена температурою, вище від якої починається підгоряння скоринки.

Коефіцієнт α_k функціонально залежить від швидкості руху повітря і характерного геометричного розміру – відстані між полицями, на яких розміщені тістові заготовки. Тобто реально можна підвищити коефіцієнт конвективної тепловіддачі, змінюючи швидкість повітря або щільність розміщення полиць на вагонетці.

У випадку примусової конвекції, коли повітря рухається над поверхнею хліба з великою швидкістю в турбулентному режимі, високого значення коефіцієнта α_k можна досягти при порівняно невисокій різниці температур.

Встановлено, що теплопередача до тістової заготовки під час випікання відбувається внаслідок:

- а) конвекції;
- б) теплопередачі від листа, на якому лежить заготовка, а він, в свою чергу, прогрівається також гарячим повітрям;
- в) випромінювання від вище розташованого листа – частина його поверхні, на якій немає заготовок, нагрівається за 0,1...0,3 тривалості процесу випікання; гаряча частина листа дорівнює приблизно 0,5 загальної площі.

Після прогрівання вагонетки, листів, стінок пекарської камери до температури гарячого повітря на тістову заготовку до кінця випікання впливає сумарний незмінний тепловий потік.

Були проведені дослідження швидкості руху повітря в різних місцях пекарської камери в ротаційній печі Г4-ХПЕ Шебекінського машинобудівного заводу. Розміри пекарської камери цієї печі, подача дутьового вентилятора та електрична потужність нагрівачів однакові з іншими вітчизняними печами. Подібні дослідження були проведені також для печі марки ROTOTHERM RE Німецької фірми WERNER&PFLEIDERER. Вимірювання швидкості середовища у пекарській камері відбувалися за допомогою термоанемометру ЕА-1М.

Характер розподілу швидкостей повітря по висоті пекарської камери обох печей показано на рис. 1.

Потік повітря, що виходить з вертикальних щілин, розміщених по всій висоті пекарської камери, і заміряний посередині печі, має різну швидкість – він зменшується біля дна та стелі камери. Цей ефект значно помітніший для вітчизняної печі. Зарубіжна піч дає потік повітря відносно рівномірний. Це має велике значення для рівномірного пропікання тістових заготовок по всій висоті вагонетки.

У конструкціях обох печей є спеціальні жалюзі для незначного регулювання швидкості та напрямку руху повітря по висоті камери. Проте основний потік формується в коробах, які підводять повітря до пекарської камери від нагрівачів і відводять до вентилятора. На рис. 2 показана залежність швидкості руху повітря від відстані до щілини.

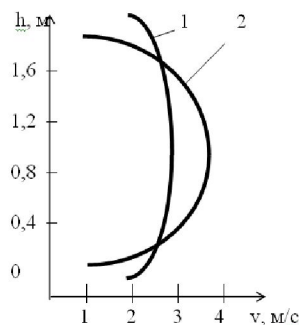


Рис. 1. Розподіл швидкості руху повітря по висоті пекарської камери печей: 1 – ROTOTHERM RE; 2 – Г4-ПКЕ

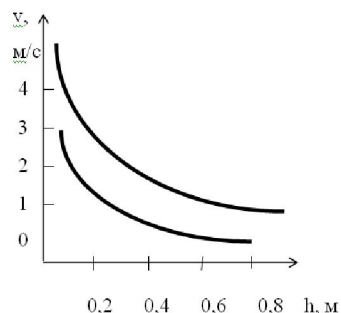


Рис. 2. Розподіл швидкості повітря по довжині пекарської камери япечей: 1 – ROTOTHERM RE; 2 – Г4-ПКЕ

Результати та обговорення.

Дослідження процесу випікання хліба з конвективним теплопідведенням показали, що якісна продукція виходить, коли швидкість повітря дорівнює приблизно біля 5 м/с. Максимальна швидкість для вітчизняної печі зафіксована безпосередньо напроти щілини і становить 2...3 м/с. Між щілинами та в кінці камери вона значно менша. Для печі ROTOTHERM RE початкова швидкість повітря становить навіть трохи більше ніж 5 м/с. В процесі обдування тістових заготовок по довжині вона так і залишається більшою.

Як показують аналізи дослідів, випікання хліба у перевірненій печі ROTOTHERM RE відбувається ефективніше: при високій швидкості повітря тепловіддача інтенсивніше, тому процес випікання проходить при нижчій температурі, дає додаткову економію енергії.

Розрахунки теплообміну, який відбувається за допомогою примусової конвекції, дали можливість установити зв'язок між коефіцієнтом тепловіддачі α і швидкістю грійних газів W :

$$\alpha = C Re^{0.8} \approx c' W^{0.8}$$

Використовуючи це рівняння, розраховували потужність, яка потрібна на привід вентилятора рециркуляції. Розрахунки показали, що існує оптимальна область роботи конвективної печі, тобто при деякій температурі залишкових газів $t_{\text{зал.і}}$ криві відносної потужності $(N/N_{\text{max}}) = f(t_{\text{зал.і}})$, які розраховані при різних температурах газів на вході у робочу камеру печі, мають мінімум $d(N/N_{\text{max}}) / dt_{\text{зал.і}}$ при $t_{\text{зал.і}} = t_{\text{зал.і}}$.

Зниження температури газів на вході у робочу камеру до певної межі, яка встановлена згідно з технологічним процесом, можна досягти, продукти згорання розбавити холодним повітрям.

Удосконалення конструкцій та роботи вітчизняних ротаційних печей стає можливим завдяки оптимізації форми повітропроводів та збільшенню потужності вентиляторів.

Висновки.

Вдосконалення робочих камер потребує вирівнювання умов теплового обміну. Одним із шляхів цього є реконструкція діючих печей з метою організації допоміжного піддуву теплоносія в міжряддя виробів, що випікаються. Отвори робляться за системою, яка забезпечує, наприклад, задані гідравлічні опори та потрібний розподіл потоку теплоносія між нижнім і боковим піддувом. Таким чином вирівнюються умови теплового обміну по висоті робочої камери. Одержані дані дають можливість проводити модернізацію конструкцій печей цієї групи.

Література.

1. *Сороколіт М.І., Пахомов В.М.* Математична модель процесу та вдосконалення термокамер для термічної обробки м'ясопродуктів // Наук. пр. УДУХТ. – 1993. – С. 136–143.
2. *Ковальов О.В., Миколів І.М., Махинько В.М., Ткачук А.М.* Рациональні режими роботи хлібопекарських печей з рециркуляцією продуктів згорання. // Наукові праці Національного університету харчових технологій, № 25, Ч.2, 2008, с. 104-106.
3. *Ковалёв А.В., Бурлака Е.Н., Мисечко Н.О., Федоров В.М.* Теплопоглощение тестовой заготовкой в процессе выпечки // Хлібопекарська і кондитерська промисловість України. № 5, - 2008, с. 36-37.
4. *Ковалев А.В., Таран В.М.* Интенсификация теплообмена в конвективных хлебопекарных печах. // Оборудование для пищевой промышленности, № 3, - 2008, с. 38-40.
5. *Ковалёв А.В., Бурлака Е.Н., Леметар С.Ю., Федоров В.М.* Теплопоглощение тестовой заготовкой в конвективных хлебопекарных печах // Хлебопекарское и кондитерское Дело, № 3, - 2008, с. 48 – 49.
6. *Ковальов О.В., Бурлака О.М., Бабко Є.М., Леметар С.Ю.* Ефективність роботи хлібопекарських печей та шляхи їх удосконалення // Хлебопекарское и кондитерское дело, № 2, - 2007, с. 30 – 31.

Авторська довідка

1. *Ковальов Олександр Володимирович*, к.т.н., доцент, кафедра машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв, Національний університет харчових технологій, e-mail: raif2006@ukr.net
2. *Доломакін Юрій Юрійович*, асистент, кафедра машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв, Національний університет харчових технологій.
3. *Федорів Віктор Михайлович*, к.т.н., доцент, Каменець-Подільський коледж харчової промисловості.
4. *Логвінський Руслан Валерійович*, студент, кафедра машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв, Національний університет харчових технологій.