

А. Ю. Орлович, проф., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: [cntu.ets260@gmail.com](mailto:cntu.ets260@gmail.com)

## Оптимізація теплових режимів в кондитерських електропечах харчового виробництва

Існуючі методи регулювання теплового режиму в тунельних печах на підприємствах харчової промисловості є малоефективні і не враховують вплив всіх складових теплового потоку в процесі передачі тепла до заготовки що обробляється. Жоден з існуючих способів не стабілізує в повній мірі загальний тепловий потік, який отримує випікаємо заготовка при проходженні зони випікання. Процес випікання є однією зі стадій виробництва кондитерських продуктів, що визначає якість і вартість продукту, умови праці обслуговуючого персоналу, можливість створення поточних механізованих і автоматизованих виробів. Пропонується метод регулювання теплового режиму оснований на стабілізації всіх теплових потоків, що підводяться до обробляемого виробу.

**тепловий режим, тунельна піч, передача тепла, виріб**

**Постановка проблеми.** Процес випікання є однією зі стадій виробництва харчових продуктів, що визначає якість і вартість продукту, умови праці обслуговуючого персоналу, можливість створення поточних механізованих і автоматизованих виробів. Первопричиною всіх процесів і змін, які відбуваються при випічці харчового виробу, є прогрів випікаємої заготовки (ВЗ) в результаті теплообміну з елементами пекарської камери, що віддають тепло, і пароповітряною сумішшю, що заповнюють камеру.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теплота передається ВЗ випромінюванням, конвекцією і кондукцією (прямою теплопровідністю безпосередньо від поду печі. Відносна роль передачі теплоти ВЗ кожним із перерахованих способів залежить від конструктивних особливостей і режиму роботи пекарської камери. Більша частина теплоти передається випромінюванням. Найменшою є частка теплоти, що передається у процесі випікання ВЗ, конвективного теплообміну з газовим середовищем пекарної камери без навмисної циркуляції газів в пекарній камері [1]. Електричні тунельні печі, як правило, мають 3-4 незалежні теплові зони, котрі нагріваються трубчатими електронагрівачами (ТЕН). Тени розташовані зверху та знизу ВЗ. В деяких моделях печей для обігріву ВЗ зверху використовуються не ТЕНи, а інфрачервоні випромінювачі.

В печах, що експлуатуються і випускаються в нашій країні, застосовуються наступні засоби регулювання теплового режиму [2]:

1. Частина ТЕН, що складають 50-70% від загальної кількості, включаються в ручному режимі. Їх потужність може регулюватись за допомогою перемикачів в різні групи. Вмикання-вимикання ТЕН, що залишилися, виконується автоматично за заданою температурою в камері (печі ШБ-2П, БН, ХПС, ПИК-8).

2. Нагрівальні елементи кожної зони розбиті на три групи. Перша група може бути ввімкнена постійно, вимкнена, або ввімкнена до однієї з двох наступних груп, що керуються автоматично. При температурі нижче заданої автоматично вмикаються нагрівачі другої і третьої груп. При досягненні нижнього рівня заданої температури

вимикається друга група нагрівачів, а при досягненні верхнього рівня – третя група (Печі П-119, П-104).

3. Потужність верхніх і нижніх нагрівачів регулюються окремо і плавно по ПД алгоритму за допомогою симісторних регуляторів (печі ПКМ, І8-ПЕТ).

Слід зауважити, що жоден з зазначених способів не стабілізує в повній мірі загальний тепловий потік, що отримує ВЗ при проходженні зони випікання. Перші два способи направлені на стабілізацію температури в камері випікання шляхом сходявкової зміни потужності ТЕНу, останній спосіб в більшості регулює потужність ТЕНу в функції відхилення температури першого ступеню.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є вплив теплового режиму в тунельних електропечах на підприємствах харчової промисловості до заготівки, що обробляється.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо процес теплопередачі до ВЗ. Прийmemo, що промінепоглинаюча здібність пароповітряної суміші в камері рівна нулю. Температури поверхностей ВЗ, ТЕН, пода, своди – рівномірно розподілені і дорівнюють деяким середньозваженим величинам. Температура в камері також рівномірно розподілена по об'єму і рівна  $T_{кам}$ . Тоді сумарний тепловий потік, що отримує ВЗ при випіканні буде складатись з наступних складових:

- що отримується при конвекції від робочого середовища камери:

$$q_{к.к} = a_{кам-втз} (T_{кам} - T_{втз}), \quad (1)$$

де  $a_{кам-втз}$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від пароповітряного середовища до поверхні ВЗ,

$T_{кам}$  – температура пароповітряного середовища камери,

$T_{втз}$  – температура поверхні ВЗ;

- що отримується випромінюванням від поверхні нагрівального елемента:

$$q_{и.не} = C_{пр.не-втз} \left[ \left( \frac{T_{п.не}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{втз}}{100} \right)^4 \right], \quad (2)$$

де  $C_{пр.не-втз}$  – приведений коефіцієнт випромінювання системи нагрівальний елемент-ВЗ,

$T_{п.не}$  и  $T_{втз}$  – абсолютні температурні поверхні нагрівальних елементів і поверхні ВЗ,

- що отримується випромінюванням від поверхні своду:

$$q_{и.св} = C_{пр.св-втз} \left[ \left( \frac{T_{п.св}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{втз}}{100} \right)^4 \right]. \quad (3)$$

де  $C_{пр.св-втз}$  – приведений коефіцієнт випромінювання системи поверхня своду-ВЗ,

$T_{п.св}$  – абсолютна температура своду.

- що отримується кондукцією від пода печі:

$$q_{кнд} = \frac{1}{R} (T_{под} - T_{втз}), \quad (4)$$

де  $R$  – еквівалентний тепловий опір системи под-ВЗ;

$T_{под}$  – температура пода печі.

Для стабільного процесу випічки, загальний тепловий потік, що передається ВЗ від кожної теплової зони повинен бути постійним, тобто:

$$q_{к.к} + q_{i.не} + q_{i.св} + q_{кнд} = const. \quad (5)$$

Тоді при незмінній швидкості конвеєра кількість теплоти, що отримує кожна ВЗ при проходженні теплової зони, буде постійним, і відповідно, прогрів ВЗ буде стабільним.

При виконанні умови (5), необхідно контролювати температуру ВЗ, пароповітряної суміші в камері, поверхні ТЕНу, поверхні своду і поду. Слід зауважити, що всі температури контролювати важко і вартість такого контролю суттєво велика. Тому пропонується спростити систему і контролювати лише 2 важливі температури – температуру поду і температуру пароповітряної суміші середовища в камері.

Зауважимо, що теплові процеси пов'язані з подом печі достатньо інерційні. Якщо підтримувати температуру пода за допомогою звичайного ПД-регулятора, можна достатньо точно стабілізувати тепловий потік, що отримує ВЗ за допомогою кондукції. Тоді задача зводиться до стабілізації теплового потоку, що отримує ВЗ, через верхню поверхню.

Зробимо ще одне припущення. ТЕП в печі зазвичай має відбиваючий екран. Цей екран направляє більшу частину випромінювання на поверхню ВЗ. Поверхня своду обігривається у більшості за допомогою конвекції від пароповітряної суміші камери. Внаслідок чого температура своду мало відрізняється від її температури. Тому можемо прийняти:

$$T_{п.св} = T_{кам}. \quad (6)$$

Вираз 5 з урахуванням 6. матиме вигляд (7):

$$a_{кам-втз} (T_{кам} - T_{втз}) + C_{пр.не-втз} \left[ \left( \frac{T_{п.не}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{втз}}{100} \right)^4 \right] + C_{пр.св-втз} \left[ \left( \frac{T_{кам}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{втз}}{100} \right)^4 \right] = const$$

Покажемо температуру поверхні ТЕНу (7) через температуру камери і потужність ТЕНу.

Тепловий потік до ТЕНу складається з наступних складових:

$$q_{\Sigma тен} = \frac{P_{тен}}{S_{тен}} = q_{конв} + q_{випр} = q_{к.кам} + q_{i.кам} + q_{i.втз} + q_{i.под}, \quad (8)$$

У сучасних тунельних печах харчового виробництва для обігріву поверхні ВЗ використовуються нагрівальні елементи, котрі більшу частину теплоти віддають випромінюванням[3]. Для спрощення розрахунків конвективну складову врахуємо коефіцієнтом  $\beta_{к.тен}$ :

$$\frac{P_{тен}}{S_{тен}} = q_{конв} + q_{випр} = \beta_{к.тен} q_{i.кам} + q_{i.втз} + q_{i.под} \quad (9)$$

Розглянемо вираз (9) і зробимо деякі математичні перетворення отримаємо наступне (10):

$$\left(\frac{T_{п.не}}{100}\right)^4 = \frac{\frac{P_{тен}}{S_{тен}} + \beta_{к.тен} C_{не-кам} (0,01 \cdot T_{кам})^4 + C_{не-втз} (0,01 \cdot T_{втз})^4 + C_{не-под} (0,01 \cdot T_{под})^4}{\beta_{к.тен} (C_{не-кам} + C_{не-втз} + C_{не-под})}$$

Якщо врахувати, що результатом роботи системи буде стабілізація теплового потоку до ВЗ, тому середня температура поверхні ВЗ буде залишатись стабільної, температура поду також буде стабілізована незалежним регулятором. Вираз матиме вид:

$$a_{кам-втз} T_{кам} + \frac{C_{пр.не-втз} P_{тен}}{S_{тен} \beta_{к.тен} (C_{не-кам} + C_{не-втз} + C_{не-под})} + \frac{C_{пр.не-втз} \beta_{к.тен} C_{не-кам} (0,01 \cdot T_{кам})^4}{C_{не-кам} + C_{не-втз} + C_{не-под}} + C_{пр.св-втз} (0,01 \cdot T_{кам})^4 = const \quad (11)$$

Коефіцієнти при змінних  $P_{тен}$  та  $T_{кам}$  постійними у вузькому температурному діапазоні конкретного режиму випічки, тоді вираз (11) прийме вигляд:

$$P_{тен} + \varphi_1 T_{кам} + \varphi_2 T_{кам}^4 = const, \quad (12)$$

де  $T_{кам}$  – абсолютна температура у камері;

$\varphi_1$  та  $\varphi_2$  – коефіцієнти, що будуть залежать від конструкції камери, виду пекарського виробу, нагрівачів і т.д.

Таким чином, при відхиленні температури в камері на  $\Delta T_{кам}$ , необхідно провести корекцію потужності ТЕНу на величину:

$$\Delta P_{тен} = \varphi_2 (T_{кам}^4 - (T_{кам} + \Delta T_{кам})^4) + \varphi_1 \Delta T_{кам} \quad (13)$$

Корегувати потужність можна по відхиленню температури у четвертому ступеню. Легко виміряти температуру від ТЕНу і температуру в камері. Задача зводиться до виміру температури у двох встановлених режимах при випіканні конкретної продукції. Після чого вирішуємо систему рівнянь з двома невідомими  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$ . Далі, після визначення коефіцієнтів, переходимо в режим автоматичної компенсації відхилення температури.

Зауважимо, при відхиленні температури в камері – її компенсуємо корегуючи потужність ТЕНу. При цьому температура в камері не повернеться до першочергового значення, однак сумарний тепловий потік на ВЗ не зміниться.

### Висновки.

1. Існуючі способи регулювання теплового режиму в електричних тунельних печах не дозволяють якісно стабілізувати прогрів ВЗ в процесі випікання при коливаннях температури пароповітряного середовища камери.

2. Запропонований спосіб компенсації коливань температури всередині камери випікання базується на фізичних процесах теплопереносу і дозволяє стабілізувати кількість теплоти на ВЗ. При цьому, приріст температури ВЗ при проходженні зони випічки буде постійний, як наслідок – прогрівання ВЗ буде стабільним. Це дозволить зменшити брак продукції внаслідок дефектів випічки.

### Список літератури

1. Ауэрман Л.Я. Технология хлебопекарного производства / Под ред. Л.И. Пучковой. СПб.: Профессия, 2005. 416с.
2. Пашченко Л.П., Жаркова И.М. Технология хлебобулочных изделий. М.: КолосС, 2008. 389с.
3. Пашченко Л.П., Мазур П.Я. Физико-химические основы хлебопечения. Воронеж: ВГТА, 2001. 115с.

### References

1. Auerman, L.Ya. (2005). Technology of bakery production / L.I. Puchkova (Ed.). St. Petersburg: Profession [in Russian].
2. Pashchenko, L.P. & Zharkova, I.M. (2008). *Tehnologija hlebobulochnyh izdelij* [Technology of bakery products]. Moscow: KolosS [in Russian].
3. Pashchenko, L.P. & Mazur, P.Ya. (2001). *Fiziko-himicheskie osnovy hlebopechenija* [Physical and chemical bases of baking]. Voronezh: VGTA [in Russian].

**Anatoliy Orlovich**, Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Optimization of the Thermal Regime in Confectionery Electric Ovens for Food Production**

The article is devoted to the study of the thermal regime in tunnel kilns in the food industry. It is noted that the existing methods are inefficient and do not take into account the influence of all components of the heat flow in the process of heat transfer to the workpiece. It is noted in the article that none of the existing methods fully stabilizes the total heat flux received by the baked workpiece during the passage of the baking zone. The baking process is one of the stages of food production, which determines the quality and cost of the product, the working conditions of staff, the ability to create current mechanized and automated products.

The proposed method of regulating the thermal regime is based on the stabilization of all heat fluxes supplied to the workpiece.

The author of the article proposes a method of compensating for temperature fluctuations inside the baking chamber based on physical heat transfer processes and allows to stabilize the amount of heat on the baked workpiece. In this case, the increase in the temperature of the workpiece during the passage of the baking zone will be constant, as a consequence - the heating of the workpiece will be stable. This will reduce product shortages due to baking defects.

**thermal mode, tunnel oven, heat transfer, bakery product**

*Одержано (Received) 22.05.2022*

*Прорецензовано (Reviewed) 27.05.2022*

*Прийнято до друку (Approved) 30.05.2022*