

Теплообмін тістових заготовок з подом печі у зоні гігротермічного оброблення

Дудко С.Д.

*Інститут післядипломної освіти
Національного університету харчових технологій*

Гігротермічне оброблення тістових заготовок хлібобулочних виробів триває не більше 3 – 4 хв на початку процесу випікання, однак справляє великий вплив на його енергетичні показники і якість готової продукції. Прогрівання тістової заготовки, що випікається (ТЗВ) відбувається по різному з боку відкритої і контактної поверхонь. Відкрита поверхня зазнає впливу теплоти внаслідок конденсації технологічної пари, випромінювання від огорожень пекарної камери і за рахунок конвективних потоків. Опорна поверхня, через яку відбувається контакт з нагрітим подом отримує теплоту за рахунок теплопровідності (кондуктивний теплообмін).

На сьогоднішній день картина процесів теплової природи, що мають перебіг в тісті-хлібі біля опорної поверхні є достатньо вивченою, однак важко оцінити її кількісну сторону. Ця інформація є важливою, оскільки на її основі можливо спроектувати і налагодити систему обігріву печі (насамперед, нижнього нагрівного каналу першої зони обігріву), яка б задовольняла умовам раціонального режиму випікання.

На початковій стадії випікання ТЗВ можливо представити як напівобмежене масивне тіло у контакті з нагрітою поверхнею. З погляду математики задача прогрівання ТЗВ з боку опорної поверхні описується 3D рівнянням нестационарної теплопровідності:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left[\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \right], \quad (1)$$

де t – температура $^{\circ}\text{C}$;

a – коефіцієнт температуропровідності тіста-хліба, $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$;

τ – час, с;

x, y, z – координати.

У першому наближенні можливо знехтувати нерівномірністю температурного поля заготовки у горизонтальній площині, тобто вважати задачу лінійною, тоді вираз спроститься:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \right) \quad (2)$$

Попри удавану простоту математичного виразу розв'язання рівняння (2) є достатньо складним завданням. Навіть за суттєвих спрощень, зокрема, приймаючи $a = \text{const}$, аналітичні розв'язки рівняння отримані лише для найпростіших за формою тіл: кулі, циліндра, пластини.

Зазвичай, при розгляді теплообміну ТЗВ з подом до рівняння нестационарної теплопровідності застосовують граничні умови IV роду, які передбачають тісний

контакт тіл, в результаті чого припускають, що температура в місці контакту для тіла і опорної поверхні однакова (початок координат знаходиться у місці контакту, а вісь x спрямована вглиб ТЗВ):

$$-\lambda_{m-x} \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=+0} = -\lambda_n \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=-0}, \quad (3)$$

де λ_{m-x} , λ_n – коефіцієнти теплопровідності тіста-хліба і матеріалу поду відповідно, Вт м⁻¹К⁻¹.

Однак це припущення надміру спрощує задачу, що ставить під сумнів адекватність такої математичної моделі. Можна прийняти, що вся кількість теплоти, яка продукується нижнім каналом, повністю передається поду з розміщеними на ньому ТЗВ. Конвеєрний під у сучасних хлібопекарських печах являє собою плетену металеву сітку. Деякі вироби випікають на металевих листах або у металевих формах. Такі проміжні металеві поверхні (стрічкові поди, листи тощо) мають малу теплову інерцію і тому їх можна розглядати як тонкі тіла. Тоді умови теплообміну можна описати як для тіла, що має хороший контакт з іншим тонким тілом з високим коефіцієнтом теплопровідності і суттєвою питомою теплоємністю. Якщо на поверхні цього тіла заданий тепловий потік, тоді згідно з класифікацією [1] така схема належить до граничних умов V роду і математично записується так:

$$-\lambda_{m-x} \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=+0} = q - c' \rho' h' \frac{\partial t}{\partial \tau} \Big|_{x=-0}, \quad (4)$$

де c' , ρ' – відповідно питома теплоємність, кДж кг⁻¹ К⁻¹, і густина металу, кг/м³;

q – тепловий потік від горизонтальної стінки каналу, Вт м⁻²;

h' – товщина конвеєрного поду, м.

Візьмемо до уваги закон зміни температури нижньої поверхні ТЗВ за раціонального режиму випікання, отриманий О. Лісовенком [2] для круглого подового хліба з пшеничного борошна II сорту (автор зазначає, що формула дає невелику похибку і в застосуванні для інших сортів подового хліба):

$$t(\tau) = t_0 + 17,2 \ln \tau \quad (5)$$

де t_0 – початкова температура тіста, °С.

Похідна цієї функції:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{17,2}{\tau}$$

Якщо підставити значення похідної і середні значення теплофізичних характеристик матеріалу поду до рівняння граничних умов (4), воно набуде вигляду:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=+0} = q - \frac{125}{\tau} \quad (6)$$

В лівій частині рівняння – тепловий потік, сприйнятий ТЗВ, у правій – значення q – це тепловий потік з поверхні каналу.

Одним із традиційних шляхів розрахунку складових теплообміну, який передбачає уникнення розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь, зокрема,

(1), є застосування методів теорії подібності. Нами було використане критеріальне рівняння, отримане О. Лісовенком [2] експериментальним шляхом для визначення температури в місці контакту з подом хліба з пшеничного борошна за «раціонального режиму» випікання:

$$t^* = 5,33Fo_m^{0,041}Kq^{0,057}, \quad (7)$$

де Fo_m – масообмінне число Фур'є:

$$Fo_m = a_m \tau / (h / 2)^2;$$

a_m – коефіцієнт дифузії вологи в тісті-хлібі, м²/с;

h – висота ТЗВ, м;

t^* – безрозмірна температура в місці контакту, віднесена до початкової температури тістової заготовки перед посадкою в піч (у наших розрахунках прийнято $t^* = t/30$);

Kq – критерій випікання, що чисельно дорівнює відношенню кількості поглинутої ТЗВ теплоти на певній ділянці до загальної кількості поглинутої теплоти упродовж всього процесу випікання. Загальна кількість поглинутої теплоти за підрахунками Лісовенка ([2], с. 113) складає 224 кДж/кг для круглого подового пшеничного хліба масою 1 кг.

Коефіцієнт дифузії вологи в тісті-хлібі, що входить до складу числа Фур'є, залежать, насамперед, від температури, пористості і вологості тіста-хліба. Існує велика кількість математичних моделей, що враховують зазначені залежності, однак отримані різними дослідниками дані різняться між собою іноді в рази, а іноді на порядок і більше. Зокрема, залежність коефіцієнта дифузії від умов випікання автори [3] представляють у вигляді: $a_m = (-9,75 + 0,15u + 0,14t)10^{-11}$, м²/с. Автори [4] наводять значення коефіцієнта дифузії $1,3 \cdot 10^{-10}$ м²/с для температури 15 °С і вологості 0,2 (по сухому залишку) і 10^{-9} для 203 °С і 0,6 відповідно; уводять поправку на вологість тіста-хліба u (якщо $u > 0,43$): $a_m = 10^{-9}u / 0,43$. Нами для розрахунку використана формула [5] для визначення ефективного коефіцієнта дифузії залежно від пористості ε і температури, T , К: $a_m = 29,6\varepsilon \exp(-8020,5 / T)$. Ця залежність видається нам достатньо обґрунтованою, оскільки дослідження базується на сучасних методах дослідження, враховує основні чинники впливу – температуру і пористість і близьке до нашої задачі значення вологовмісту.

Ця формула використана нами у такому вигляді:

$$a_m = 29,6k\varepsilon \exp(-8020,5 / T), \quad (8)$$

де $k=1,858$ – поправочний коефіцієнт, числове значення якого відповідає реперній точці – кількості теплоти, спожитої нижньою половиною ТЗВ за час 240 с, яке згідно з експериментальними даними Лісовенка ([2], с.153) становить 55 кДж/кг.

З рівнянь (5 – 8) можна визначити кількість поглинутої теплоти нижньою половиною тістової заготовки Q_i на кожному етапі перебування її в зоні ГТО. Для цього загальну тривалість поділили на 14 часових відрізків 1, 5, 10, 20, 40 с

і далі з кроком 20 с. Значення поглинутого теплового потоку розраховували як середню величину за відповідний відрізок часу з урахуванням зміни площі опорної поверхні:

$$\bar{q}_i = \frac{Q_{i+1} - Q_i}{F_i(\tau_{i+1} - \tau_i)}, \quad (9)$$

де $i=1, 2, \dots, 14$.

Необхідну тепловіддачу від нижнього нагрівного каналу розраховували згідно з рівнянням (6). Графіки зміни теплових потоків, переданого нижнім каналом і поглинутого ТЗВ, за яких реалізується раціональний режим випікання, починаючи з 10-ї секунди, а також графік різниці між цими потоками наведені на рис. 1.

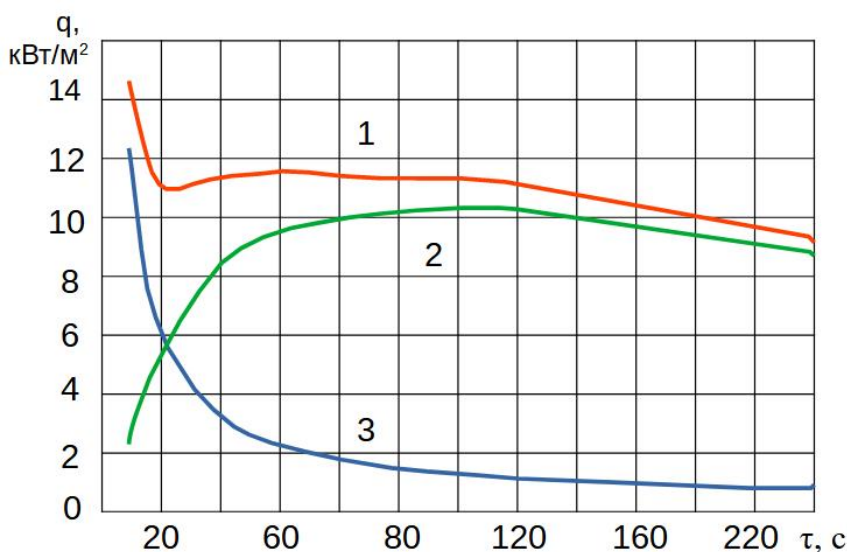


Рис. 1. Теплові потоки в зоні гігротермічної обробки: 1 – тепловий потік від робочої поверхні нижнього каналу печі; 2 – тепловий потік через контактну поверхню ТЗВ; 3 – різниця між 1 і 2.

З графіків видно, що тепловий потік, сприйнятий нижньою частиною ТЗВ (крива 2), має зростати приблизно до 100-ї секунди, досягаючи максимуму біля значення 10 кВт/м², а з 140-ї секунди – починати плавно зменшуватися практично за лінійним законом.

Тепловий потік від робочої стінки нижнього каналу (крива 1), що забезпечує заданий раціональний режим поглинання теплоти має максимум на початку процесу, різко зменшується до значення 11 кВт/м² на 20-й секунд, практично на цьому рівні він тримається до 130-ї секунди і далі зменшується майже лінійно, повторюючи конфігурацію графіка спожитого теплового потоку.

Слід зазначити, що форма (якісна характеристика) кривої поглинутого теплового потоку (крива 2) не відповідає усталеним уявленням, що базуються на теоретичних засадах. Згідно з ними, на самому початку після укладення заготовки на попередньо нагрітий під має спостерігатися максимальний тепловий потік, оскільки в цей момент має місце максимальний градієнт температури у контактному шарі ТЗВ.

Зазначена невідповідність може мати два пояснення. Перше – критеріальне рівняння (7) досить грубо описує картину теплообміну саме у початкові хвилини

перебування ТЗВ в печі. Але, зважаючи на високий авторитет автора, як дослідника, це малоймовірно. Другим поясненням може бути, що в експерименті, за результатами якого складене рівняння, не була дотримана артикульована Лісовенком умова щодо підтримання температури поду на незмінному рівні 200°C, бо на практиці цього досягнути важко. Ця умова може бути забезпечена лише якщо теплова масивність поду є набагато більшою, ніж масивність тістової заготовки, що може мати місце у разі випікання тонких виробів, як, наприклад, перепічок, лаваша, піци тощо на попередньо нагрітому товстому керамічному поду. Опосередковано про недотримання умови постійності температури свідчать температурні криві раціонального режиму випікання, наведені самим автором, де температура поду знижується після моменту посадки ([2], рис. 5.13, с. 139).

Видається імовірним, що рівняння (7) побудоване для умов поступового прогрівання поду разом з тістовими заготовками. У такому випадку крива 3 на рис. 1 є нічим іншим, як графіком теплового потоку, що витрачається на підігрівання поду. У перший момент часу теплота з поверхні каналу найбільш інтенсивно акумулюється металевим подом, спостерігається максимальне значення теплового потоку як з боку каналу, так і поглинутого подом. Далі по мірі прогрівання поду поглинання теплоти стрімко спадає, натомість збільшується тепловий потік, що йде на прогрівання нижніх шарів ТЗВ. У подальшому реалізується режим потоку, що спадає, який відображає загальноприйнятту концепцію теплового режиму випікання в науковій літературі.

Отримана картина зміни в часі і числові значення теплових потоків у перші 4 хв процесу випікання подового хліба можуть служити відправною точкою для проектування нагрівної системи, а також для налаштування подачі теплоносія до нижнього нагрівного каналу в зоні гіротермічного оброблення сучасних тунельних печей. Це дозволить реалізувати раціональний режим випікання, що передбачає отримання продукції високої якості за мінімально необхідних енергозатрат.

Література:

1. Пехович А.И. Расчеты теплового режима твердых тел / А.И. Пехович, В.М. Жидких – Л.: Энергия. – 1968. – 304 с.
2. Лисовенко А.Т. Процесс выпечки и тепловые режимы в современных хлебопекарных печах / А.Т. Лисовенко. – М.: Пищевая пром-сть. – 1976. – 214 с.
3. Zheleva I. Identification of heat and mass transfer processes in bread during baking / Ivanka Zheleva, Vesselka Kambourova // Thermal science. – 2005. – Vol. 9. – No. 2. – pp. 73-86.
4. Zanoni, B. Study of the Bread Baking Process – II. Mathematical Modeling / B. Zanoni, S. Pierucci, C. Peri, // Journal of Food Engineering. – No. 23. – 1994. – pp. 321-336.
5. Baic O.D. Modeling the moisture diffusivity in a baking cake / O.D. Baic, M. Marcotte // Journal of Food Engineering. – 2003. – 56(1). – pp. 27-36.