

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ІНСТИТУТ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ

ДОЗВОЛЯЮ
на депонування

Голова вченої ради Інституту
післядипломної освіти НУХТ, директор

_____ **Володимир БАРАНОВ**

УДК 664.6 (Хлібопекарське виробництво. Випічка. Хліб. Борошняні
кондитерські вироби)

**Тепломасообмін у пекарній камері тунельної печі на початковій стадії
випікання подового хліба**

Автор _____ **Сергій ДУДКО**

Київ – 2023

Тепломасообмін у пекарній камері тунельної печі на початковій стадії випікання подового хліба

Зміст

	Стор.
Передмова	3
1. Геометричні характеристики круглого подового хліба як об'єкту тепломасообміну	3
2. Гігротермічне оброблення тістових заготованок	6
2.1. Характеристика процесу	6
2.2. Конструктивне оформлення зони ГТО пекарної камери печі	10
3. Матеріальний і енергетичний баланс зони гігротермічного оброблення тістових заготованок	12
3.1. Вентиляція робочої камери	17
3.2. Тепловий баланс ГТО за відсутності газообміну з пекарною камерою	22
3.3. Тепловий баланс зони ГТО за наявності газообміну з рештою простору пекарної камери	28
4. Теплообмін з боку нижнього каналу в зоні ГТО	33
4.1. Розрахунок теплообміну через контактну поверхню ТЗВ за рівнянням нестационарної теплопровідності	34
4.2. Теплообмін через незайняту поверхню поду печі	36
4.3. Тепловий баланс зони ГТО з урахуванням обігріву з боку нижнього каналу	38
4.4. Градієнт температури у контактному шарі ТЗВ	40
4.5. Розрахунок теплообміну через контактну поверхню за критеріальним рівнянням	43
Висновки	48
Література	51

ПЕРЕДМОВА

Для проектування кінетики теплового потоку від теплоносія у пекарню камеру, що є основою для проектування конструкції і режиму роботи нагрівної системи печі на її газовій стороні, необхідно визначитися з часткою теплоти, що вноситься з технологічною парою, видаляється з випарами і передається поверхні тістової заготованки, що випікається (ТЗВ) як внаслідок контакту з подом, так і внаслідок тепломасообміну з середовищем. Окремий інтерес становить кінетика вологовіддачі протягом процесу випікання і відповідні витрати теплоти на випаровування вологи з ТЗВ.

Якісний бік картини процесів, що супроводжують випікання хлібобулочних виробів є достатньо вивченим і формалізованим. Однак для кращого розуміння співвідношень між впливом різних процесів, ілюстрації методів розрахунку, що необхідно для отримання вихідних даних для проектування конструкцій печей, цінним є числовий розв'язок задачі. Для прикладу будемо розглядати випікання подового пшеничного круглого хліба масою 1 кг. Конкретні значення фізичних, геометричних характеристик печі та деякі характеристики тепловологісного режиму процесу випікання наводяться у розділі 3.2.

1. Геометричні характеристики круглого подового хліба як об'єкту тепломасообміну

Під час випікання відбувається тепломасообмін середовища пекарної камери з тістовими заготованками, який здійснюється практично повністю через їх поверхню шляхом радіаційного, конвективного, контактного теплообміну, а також фазових переходів води. Кожен з цих видів теплообміну має свої особливості залежно від просторової орієнтації поверхні теплообміну відносно середовища. Зокрема, випаровування відбувається по різному з відкритої і вільної поверхонь ТЗВ. За даними Stenby Andersen (2013) [1] вологовіддача з контактної поверхні становить орієнтовно 60% від вологовіддачі з вільної і практично не залежить від характеристик щільності опорної поверхні. Щоб визначитися з

тепловими потоками, що сприймає ТЗВ зверху і знизу в зоні гіротермічного оброблення, слід окремо розглянути теплові витрати внаслідок конденсації і випаровування. Оскільки конденсація відбувається лише на відкритій поверхні ТЗВ, а випаровування відбувається по різному з відкритої і контактної поверхонь важливо встановити площу цих поверхонь. Також є потреба визначення такого геометричного показника як об'єм готового виробу і тістової заготованки.

Для визначення геометричних характеристик ТЗВ скористаємося літературними даними Лісовенка (1976) [2] розглядає буханець подового круглого хліба таким, що складається з двох частин – верхньої і нижньої, утворених обертанням еліптичних кривих навколо осі симетрії. Об'єм V , м^3 , готового виробу він пропонує розрахувати за формулою:

$$V = 0,513 \cdot 1,09d^2h = 0,559d^2h,$$

де d – діаметр, м;

h – висота буханця, м.

Для вирішення питання щодо площ складових поверхні випеченого круглого подового хліба Десик з колегами (2012) [3] пропонують розглядати загальну площу як суму контактної поверхні, верхньої і бічної поверхонь. Для розрахунків за цією методикою мають бути наперед відомі значення таких геометричних розмірів: радіуса контактної поверхні R_k , радіуса буханця R (відповідає радіусу проекції буханця на опорну площину), висоти в центральній точці h . Гіпотетично приймається, що відстань від опорної поверхні до точки, в якій заміряється радіус R буханця дорівнює: $r = R - R_k$.

Повну площу автори пропонують розраховувати за формулою:

$$F = 4\pi nR_s^2,$$

де R_s – радіус кулі, що має однаковий з буханцем об'єм V :

$$R_s = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}}; n = 0,15 \frac{d}{h} + 0,76$$

Площа контактної поверхні:

$$F_k = \pi R_k^2$$

Площа бічної поверхні, що розташовується між опорною і верхньою поверхнями:

$$F_l = \pi r(\pi R_k + 2r)$$

Площа верхньої поверхні розглядається як площа еліпсоїда обертання і для її обчислення треба знати фокусні відстані еліпса, що викликає певні складнощі. Але цю площу F_t можна обчислити враховуючи, що: $F_t = F - F_l - F_k$

Для прикладу розглянемо геометричні характеристики хліба українського масою 1,0 кг. Середні розміри його такі: $d=0,22$ м; $h=0,076$ м; $R_k=0,085$ м; $r=d/2$; $R_k=0,025$ м. Розрахунок за вище наведеними формулами дає: $V=0,002056$ м³; $F_k=0,0227$ м²; $F_l=0,0249$ м²; $F_t=0,0462$ м²; $F=0,0939$ м².

Геометричні розміри тістової заготованки подового хліба під час випікання змінюються, тому для проведення відповідних обчислень на початковій стадії слід зауважити, що упродовж перших 3 – 4 хв вона дещо розпливається на поду внаслідок релаксації напружень і термічного розслаблення після посадки внаслідок перевероту коліски агрегату вистояю. За нашими оцінками площа контактної поверхні заготованки упродовж 4 хв збільшується на 10% від значення на момент посадки (до $F_k=0,025$ м²). У подальшому за рахунок збільшення поверхневого натягу під час утворення скоринки кривизна бічної поверхні зменшується, тим самим спричиняючи зменшення площі опорної поверхні приблизно до значення у момент посадки на під.

Процес тепломасообміну відбувається по різному на нижній контактній поверхні і відкритій, що є сумою площ верхньої і бічної поверхонь. Візьмемо до уваги, що використання площі готового хліба для розрахунку масообміну на початку процесу не є коректним, оскільки розміри ТЗВ змінюється впродовж

випікання. Найбільш суттєво збільшується висота заготовки протягом першого періоду випікання у проміжку часу $(0,1 \dots 0,5)\theta$, де θ – відносна тривалість процесу (Лісовенко, 1976) [2]. В середньому висота тістової заготовки подового круглого хліба, при якій вона перебуває у зоні зволоження, становить приблизно 76% від кінцевої висоти хліба (там же, с. 60). У той же час, зростання тістової заготовки під час випікання супроводжується зменшенням її діаметру приблизно у 1,09 рази. Якщо застосувати геометричну модель Десика з колегами (2012) [3] до тістової заготовки круглого подового хліба масою 1,0 кг, за нашими розрахунками площа поверхні, на якій відбувається конденсація, становить в середньому 93 % порівняно аналогічною поверхнею готового хліба. Отже, можна прийняти, що питома поверхня, на якій конденсується пара становить $f'_{cd}=0,066 \text{ м}^2/\text{кг}$.

2. Гіротермічне оброблення тістових заготовок

2.1. Характеристика процесу

Процес гіротермічного оброблення (ГТО) тістових заготовок є дуже важливою стадією загального складного процесу випікання хлібобулочних виробів. Він полягає в тому, що тістові заготовки одразу при входженні до простору пекарної камери піддають впливу середовища помірної температури і високої відносної вологості. Пара конденсується на відкритій поверхні заготовок і частково розчиняє крохмаль, створюючи тонку плівку клейстеру, яка в подальшому забезпечує блиск (глянець) готових виробів. Теплота конденсації вивільняється на відкритій поверхні заготовок, що, як вважається, інтенсифікує їх прогрівання. Недостатня кількість пари призводить до збільшення товщини скоринки та може провокувати подальшу появу тріщин на поверхні ТЗВ (Михелев, Ицкович (1968) [4], Sommier з колегами (2005) [5], Лісовенко (1976) [2], И. Маклюков, В. Маклюков (1983) [6], А. Le-Bail (2011) [7]. Необхідні параметри вологого повітря створюються за рахунок водяної пари, що подається через зволожуючий пристрій з парової магістралі заводу, або вбудованого в піч

парогенератора. Попри те, що стадія гіротермічного оброблення триває в середньому лише близько 1/10 від загальної тривалості випікання хлібобулочних виробів, цей процес суттєво впливає на величину упікання, а також на товарний вигляд і якість готових виробів – їх об'єм, рельєф, забарвлення і глянець поверхні.

Основні закономірності процесу гіротермічного оброблення ТЗВ були досліджені до середини 80-х років ХХ століття і висвітлені у багатьох працях, насамперед, київських і московських вчених. За їх результатом сформувався уявлення про оптимальні умови для процесу ГТО. Критеріями оптимізації були тривалість конденсації і маса конденсату, величина упікання, об'єм готових виробів, стан їх поверхні тощо. Прийнятними для більшості виробів з пшеничного борошна вважаються температура 110 – 120 °С і відносна вологість 70 – 80 %. У той же час, для булочних виробів оптимальна для отримання максимального блиску поверхні температура ГТО становить близько 140°С при тривалості процесу 70 с (Теличкун з колегами, 1989) [8]. Тривалість процесу ГТО визначається, насамперед, тривалістю конденсації, що, як правило, не перевищує трьох хвилин. При цьому важливо окрім умов для інтенсивної конденсації пари забезпечити певне співвідношення між інтенсивністю теплообміну через контактну і вільну поверхні ТЗВ.

Кількість конденсату на поверхні виробів за час ГТО за даними різних авторів різніться. Михелев, Ицкович (1968) [4] вказують максимальне значення 230 г/м², а для отримання глянцевої скоринки за їх даними достатньо 140-160 г/м². Володарський з колегами (1976) [9] наводять значення 400 г/м², Лісовенко (1976) [2] – 20-28 г/м² (вочевидь, тут має місце друкарська помилка, оскільки з контексту випливає, що вона має бути 200-280 г/м²). Германчуком з колегами (2012) [10] отримана залежність приросту маси конденсату з часом при температурі 140°С і вологості в камері 80%. Її інтегрування у межах від 0 до 240 с дає результат порядку 113 г конденсату на 1 м² поверхні ТЗВ (в статті помилково вказано 0,013 кг/м²). Для подовження періоду конденсації, уникнення раннього утворення скоринки, що може призвести до недостатнього об'єму виробів та появи

кругового підриву бокової поверхні, основна кількість теплоти має підводитись із боку контактної поверхні (Михелев, Ицкович (1968) [4], Лісовенко (1976) [2], Маклюков, Маклюков (1983) [6]).

Дослідженнями (Германчук А. з колегами, 2012) [10] вивчена залежність інтенсивності і тривалості конденсації пари на поверхні тістової заготованки від характеристик середовища зони ГТО. Підтверджено, що оптимальними за показником кількості конденсату і блиску поверхні готових виробів значеннями параметрів ГТО є відносна вологість 80-85% і температура 140°C. При зменшенні температури середовища пекарної камери кількість сконденсованої вологи і тривалість конденсації збільшується. Максимальна інтенсивність теплового потоку (3400 Вт/м²) має місце на 70-й секунді при температурі середовища в 110 °C та відносній вологості 82% (Германчук з колегами, 2014 [11]). Із збільшенням відносної вологості середовища зони гіротермічної обробки до 90 % зростає тривалість конденсації вологи і кількості сконденсованої вологи, інтенсифікується прогрівання верхніх і внутрішніх шарів ТЗВ (Германчук з колегами, 2013) [12]. За температури 125°C, яка є близькою до раціональної за Лісовенком (1976) [2] і яку можна вважати підходящою для більшості подових виробів з пшеничного борошна, встановлена залежність зміни температури t , °C, верхньої поверхні ТЗВ від відносної вологості φ , %, середовища зони ГТО:

$$t-t_0=1,79\varphi^{0,445}\ln\tau-4,97,$$

де t_0 – початкова температура поверхні ТЗВ;

τ – тривалість процесу, с (Германчук з колегами, 2014) [13].

Запропонований Лісовенком (1976) [2] раціональний режим випікання подового хліба з пшеничного борошна передбачає проведення гіротермічної обробки в середовищі відносною вологістю 80% і вище протягом 3 хв при температурі 120 °C, далі – інтенсивна теплова обробка, що передбачає швидкий підйом температури пекарної камери до 190 °C, яка надалі підтримується

впродовж більшої частини процесу. Середнє значення теплового потоку за час конденсації – 4700 Вт/м².

Вироби з житнього чи із суміші житнього і пшеничного борошна прогріваються більш повільно і потребують інших параметрів середовища. Оброблення паром відбувається або за більш короткий проміжок часу, або зовсім відсутнє (якщо асортимент не вимагає глянцевої поверхні). Після цього ТЗВ попадає до зони з максимально високою за весь час випікання температурою (т. зв. «обжарювання»). Для житніх і житньо-пшеничних виробів також розглядають тристадійну модель випікання: зволоження паром, «обжарювання» і подальше випікання за температури, що спадає (т. зв. «допікання»). Аношина і Ковальова (2009) [14] пропонують для житньо-пшеничного хліба гігротермічну обробку за температури 110 – 120 °С і відносній вологості 70 – 72% протягом 2 хв, «обжарювання» за температури 240 – 250 °С протягом 3 хв і наступного випікання за температури 150 – 180 °С. Раціональний режим, запропонований Лісовенком (1976) [2] для хліба українського передбачає таку організацію процесу: гігротермічна обробка до 2 хв при 120 °С і вологості 80%, далі стрімке збільшення температури середовища до 220 °С і майже відразу за тим – плавне лінійне спадання температури до 170 °С в кінці процесу випікання. В сучасній практиці у деяких випадках температуру обжарювання піднімають до 270-300°С і навіть вище.

Слід зазначити, що в деяких дослідженнях фіксується уповільнення темпу прогрівання внутрішніх шарів тістових заготовок в середовищі з більш високим вмістом пари (А. Le-Bail, 2011) [7], що пов'язується з впливом процесу конденсації: «This difference was attributed to the condensation of steam on the loaf for higher steaming, which in turns slows down the heating rate». Виявлений феномен затримки росту температури в центрі ТЗВ загалом суперечить переважаючому серед наукової спільноти уявленню щодо, навпаки, інтенсифікації прогрівання за рахунок ГТО.

2.2. Конструктивне оформлення зони ГТО пекарної камери тунельної печі

У сучасних конструкціях печей обігрівання зони гіротермічного оброблення здійснюється за рахунок теплоти від нижньої поверхні огорожі пекарної камери (від нагрітого поду і стінки нагрівального каналу) та технологічної пари, що подається до зволожуючого пристрою. Зазвичай, цей пристрій являє собою систему із 3 – 6 перфорованих труб, встановлених поперек під верхньою огорожею пекарної камери і підключених до парової магістралі заводу чи автономного парогенератора, а також відповідної арматури – вентилів, пристроїв для осушування пари, відведення конденсату тощо. Для уникнення перегрівання пари в зоні ГТО, що зменшує ефективність процесу парозволоження, додаткове підігрівання з боку верхньої поверхні не передбачають, отже верхній нагрівальний канал в межах зони у більшості сучасних конструкцій відсутній.

Печі великої продуктивності водночас мають і значні розміри зони ГТО. Оскільки ширина пекарної камери може сягати 4 м, за цих обставин важливо забезпечити поперек зони ГТО однаковість значень відносної вологості середовища для стабілізації показників готових виробів у межах партії. Однаковість умов безпосередньо залежить від рівномірності виходу пари через отвори або насадки уздовж розподільних труб.

Питання щодо закономірностей розподілу пари уздовж перфорованої труби досліджувалося нами разом з В. Теличкуном [15]. Шляхом обчислювального експерименту досліджували витікання за адіабатних умов сухої насиченої пари з отворів у стінці труби довжиною 2,2 м, під'єднаної одним кінцем до парової магістралі, і закритим протилежним кінцем. Варіювали такими характеристиками як витрата пари ($G=2 \cdot 10^{-2} \dots 10^{-1}$ кг/с), площа перерізу труби ($F=2,5 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-2}$ м²), переріз отворів ($\sigma=6 \cdot 10^{-3} \dots 2,4 \cdot 10^{-2}$ м²), їх кількість ($n=10 \dots 50$). Досліджувався найбільш розповсюджений на практиці випадок рівномірної перфорації, коли крок отворів уздовж труби однаковий, так само, як їх діаметр. Формалізована задача зводилася до гідравлічного розрахунку послідовно встановлених трійників.

Бралось до уваги, що коефіцієнт витрати через отвір у стінці є функцією коефіцієнта місцевого опору, що, в свою чергу, залежить від геометричних характеристик течій та співвідношення швидкостей в трубі і в отворі. Встановлено, що незалежно від витрати пари в трубі відносно відхилення витрати в кожному отворі Δg_i від середнього для всіх отворів значення $\Delta g_i = (g_i - \bar{g}) / \bar{g}$ має однаковий характер: невелике перевищення на початковій ділянці, зменшення ближче до середини труби і далі зростання у напрямку закритого торця труби (рис. 1). На рисунку нульова позначка відповідає сумарній витраті пари, поділеній на кількість отворів. Зазначений розподіл витрати пари через отвори, розташовані з однаковим кроком уздовж труби, підтверджений лабораторним експериментом.

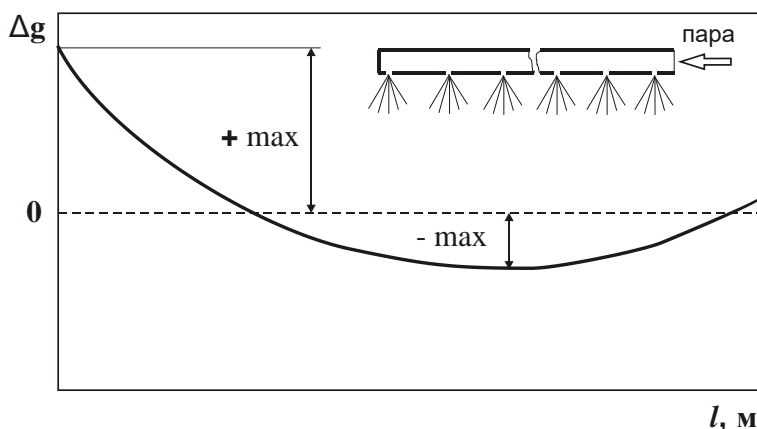
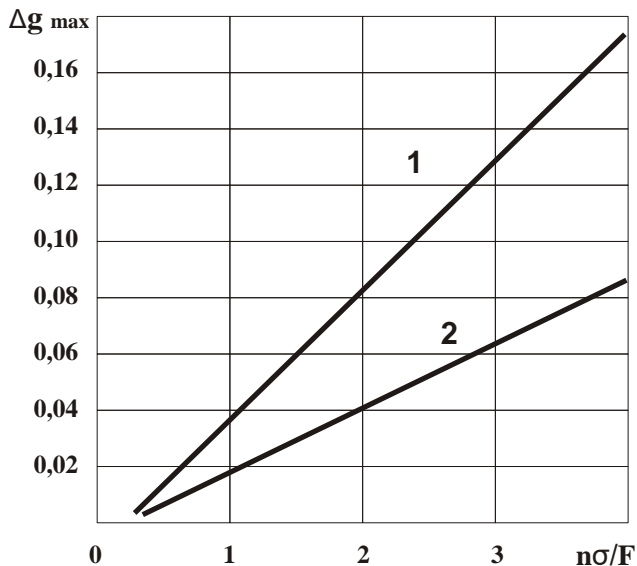


Рисунок 1. Узагальнена картина розподілу пари уздовж перфорованої труби із закритим торцем.

Такий характер кривої можна пояснити взаємним впливом двох головних чинників: статичного тиску в трубі, який зменшується за напрямком ходу пари внаслідок подолання місцевих опорів і, з іншого боку, зростанням коефіцієнта витрати внаслідок зменшення величини місцевих опорів, що є наслідком зменшення швидкості руху. До точки мінімуму кривої визначальну роль грає перший чинник, потім коефіцієнт витрати зростає швидше, ніж падає статичний



тиск у потоці, що гальмується, і локальна витрата зростає досягаючи максимуму біля закритого торця труби.

Рисунок 2. Найбільші додатні +max (1) і найбільші від’ємні -max (2) відхилення витрати пари від середнього значення.

Отримані в ході варіювання загальною витратою G значення максимальних локальних відхилень

витрати пари Δg_{\max} мають пряму залежність від співвідношення сумарної площі отворів і площі перерізу труби $n\sigma/F$ (рис. 2). Залежність 1 апроксимуються виразом:

$$\Delta g = 0,05n\sigma / F - 0,02,$$

залежність 2:

$$\Delta g = 0,024n\sigma / F - 0,008$$

Для прикладу, якщо вважати припустимим нерівномірність розподілу пари по довжині труби в межах 10%, це означає, що сумарна площа отворів має перевищувати площу перерізу труби не більш, ніж у 1,7 рази. Слід урахувати, що під час роботи печей можуть мати місце відхилення параметрів пари та умов її витікання від прийнятих у досліді, а отже нерівномірність витікання може мати більші значення. Тому при проектуванні зволожувальних пристроїв не варто перевищувати значення співвідношення $n\sigma/F$ більш, ніж у 1,3-1,4 рази.

3. Матеріальний і енергетичний баланс зони гіротермічного оброблення тістових заготованок

Прийmemo, що в зоні ГТО на вільній поверхні ТЗВ конденсується водяна пара масою Δm_{cd} , кг/м², виділяється теплота фазового переходу в кількості ΔQ_1 ,

кДж/кг, конденсат після зони ГТО має кінцеву температуру 100 °С. Практично одразу після виходу ТЗВ із зони ГТО починається і до кінці процесу випікання продовжується випаровування вологи з поверхні і поверхневого шару, на що витрачається енергія. Випаровується весь конденсат, а також частина води з ближніх шарів. Загальна кількість випареної води Δg_2 , кг, для буханця масою 1,0 кг:

$$\Delta g_2 = g_{m.z} - g_{z.x} + g_k, \quad (1.1)$$

де $g_{m.z}$ – приведена маса тістової заготованки, кг на 1 кг гарячого хліба;

g_k – приведений приріст маси ТЗВ внаслідок конденсації, кг конденсату на 1 кг гарячого хліба.

$$g_k = \Delta m_{cd} f'_{cd} \left(\frac{W}{100} + 1 \right) \quad (1.2)$$

$g_{z.x}$ – приведена маса гарячого хліба, кг/кг ($g_{z.x}=1$).

Для визначення кількості теплоти, що вивільняється при конденсації пари, скористаємося даними И. Маклюкова, В. Маклюкова (1983, с. 55) [6]. Ці дані включають графік зміни теплового потоку на поверхні тістових заготовок, отриманий для тіста-хліба із пшеничного борошна I сорту при таких значеннях параметрів зони гіротермічного оброблення, які цілком відповідають умовам сучасних тунельних печей: $t=125^\circ\text{C}$, $\varphi=77\%$, $w=0,15$ м/с, $t_p=92,6^\circ\text{C}$, $\tau=210$ с. Виконані нами апроксимація даних і обчислення кількості поглинутої теплоти за допомогою програми MATHCAD дали результат $Q_{\text{ГТО}}=544$ кДж/м².

Питоме споживання теплоти внаслідок теплообміну через відкриту поверхню ТЗВ у перерахунку на 1 кг гарячого хліба в зоні ГТО становитиме:

$$Q'_{\text{zmo}} = Q_{\text{zmo}} f'_{cd} \left(\frac{W}{100} + 1 \right) \quad (1.3)$$

Після підстановки величин отримаємо загальну кількість теплоти, передану в зоні ГТО від газового середовища за рахунок конденсації пари, конвекції та випромінювання, кДж/кг:

$$Q'_{mo}=544 \cdot 0,066 \cdot 1,08=38,8$$

За наведеними цими ж авторами даними відносна кількість сконденсованої пари становить $\Delta m_{cd}=0,18$ кг/м², що відповідає середньому значенню за даними більшості досліджень (див. розділ 1.2). У подальших викладках ми також будемо оперувати цим значенням. Орієнтовно можна прийняти, що в результаті конденсації передається теплоти, кДж/кг:

$$Q_c = r \Delta m_{cd} f'_{cd} \left(\frac{W}{100} + 1 \right), \quad (1.4)$$

де r – теплота фазового переходу, кДж/кг.

$$Q_c=2260 \cdot 0,18 \cdot 0,066 \cdot 1,08=29$$

Це становить близько 75 % від загальної кількості переданої теплоти в зоні зволоження. Якщо врахувати теплоту, передану поверхні ТЗВ внаслідок контакту з гарячим конденсатом, ця частка становитиме сумарно понад 80% від загальної кількості переданої теплоти усіма видами теплообміну в зоні гігротермічного оброблення, що узгоджується з даними И. Маклюкова, В. Маклюкова (1983) [6]. Також ця величина узгоджується з результатами Лісовенка щодо частки теплоти конденсації в загальній витраті теплоти на випікання в межах 8% (у нашому випадку ця частка $29/371 \times 100=7,8$ %, якщо прийняти $Q_1=371$ кДж/кг – теоретична витрата теплоти на випікання за аналогічних умов (Михелев, Володарский, 1974) [16], або 6,8 % , якщо виходити з $Q_1 =426$ кДж/кг за даними самого Лісовенка.

Порівнюючи отримані результати розрахунку теплообміну через відкриту поверхню в зоні ГТО з даними О. Лісовенка (середнє значення 4700 Вт/м²), слід зауважити, що він розглядає модель, за якої конденсація відбувається на верхній

половині заготованки, тобто без урахування нижньої половини бічної поверхні. Якщо віднести тепловий потік до скоригованої питомої площі, отримаємо, що за 180 с кількість переданої теплоти буде дорівнювати 49,7 кДж/кг (перевищення на 28%). Беручи до уваги той факт, що експериментальні дані інших авторів, які вимірювали теплові потоки на початку процесу випікання у зволоженому середовищі, хоча і різняться між собою, проте мають суттєво менші значення, ніж наведені Лісовенком, надалі будемо оперувати значенням 38,8 кДж/кг.

Приведена кількість конденсату згідно з (1.2), кг на 1 кг гарячого хліба:

$$g_k = 0,18 \cdot 0,066 \cdot 1,08 = 0,0128$$

Зауважимо, що в структурі загальних витрат теплоти з випарами протягом процесу випікання близько 14 % складають витрати на випаровування конденсату. Частка сконденсованої пари відносно загальної її витрати складає приблизно 8 – 10 %, решта пари служить для створення необхідної відносної вологості середовища в умовах інвазії холодного повітря з цеху. Для порівняння, за даними, які наводить О. Лісовенко (1976, с. 159) [2] для печі БН показник ефективності використання пари може складати 30 %, що на нашу думку, є помилкою.

Щоб забезпечити правильне конструювання і налаштування теплового стану тунельної печі відповідно до раціонального режиму випікання необхідно мати знання щодо значень складових теплового балансу зони ГТО, зокрема, необхідної теплової потужності нижнього нагрівального каналу. Складемо тепловий баланс зони гіротермічного оброблення тістових заготованок, приведений до продуктивності печі по гарячому хлібу. Схематично зона ГТО

представлена на рис. 3.

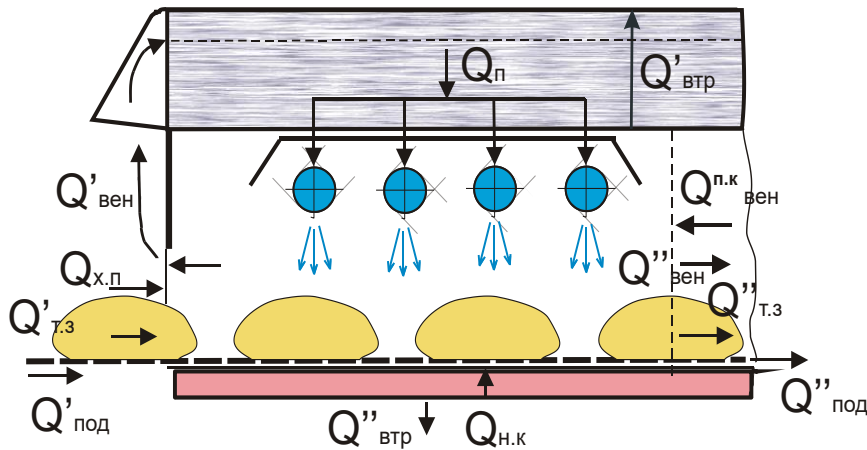


Рисунок 3. Складові теплового балансу зони гіротермічного оброблення тунельної печі.

Надходження теплоти до зони ГТО відбувається від верхньої стінки нижнього нагрівального каналу $Q_{н.к}$, з технологічною парою $Q_{п}$, транспортним засобом – конвеєрним подом $Q'_{под}$, з тістовими заготовками $Q'_{т.з}$, разом з повітрям із приміщення $Q'_{х.п}$. Тепло виноситься із зони з тістовими заготовками $Q''_{т.з}$, з конвеєрним подом $Q''_{под}$, з вологим вентиляційним повітрям $Q'_{вен}$, яке викидається через саджальний отвір печі. Також вентиляція здійснюється між зоною ГТО і решетою пекарної камери $Q''_{вен}$, причому, перетікання відбувається у той, і інший бік, що в обох випадках є небажаним явищем, оскільки призводить до порушення раціонального тепловологісного режиму. Зазвичай, конструкція сучасної печі передбачає наявність вентиляційного отвору на межі між зоною ГТО і решетою пекарної камери. Іноді на границі між ними встановлюють повітряну завісу, яка має перешкоджати взаємопроникненню середовищ. У випадку вдалої конструкції печі і правильного налаштування вентиляційної системи перетікання між зоною ГТО і пекарною камерою незначне (див. розділ 3.3).

Кількість теплоти, що вноситься/виноситься конвеєрним подом є величиною, що може мати декілька значень залежно від варіанту конструктивного виконання і регулювання. В конструкціях сучасних печей зазвичай передбачається пристрій для попереднього підігрівання поду, оскільки позитивні

наслідки такого підігріву для більшості видів асортименту є загальновідомим фактом. Під час роботи печі у місці посадки тістових заготовок температура поду знижується внаслідок контакту з холодним тістом. У подальшому з моменту проходження через саджальний отвір під печі отримує тепло від нижнього каналу. При цьому можливі три варіанти зміни температури поду на виході із зони ГТО: зростання температури, зниження її і незмінна температура. Ми у своїх викладках будемо орієнтуватися на раціональний режим випікання, який передбачає останній варіант – температура поду на вході і виході зони ГТО однакова. Отже, приймаємо $Q'_{\text{под}} = Q''_{\text{под}}$ і, таким чином, цю складову з теплового балансу зони виключаємо.

Втрати теплоти у навколишнє середовище через обшивку $Q'_{\text{втр}}$ в сучасних печах незначні з двох причин: невисокої температури в камері ГТО і через застосування високоефективних теплоізоляційних матеріалів. Цими втратами можна знехтувати.

Втрати через нижню стінку нижнього каналу $Q''_{\text{втр}}$ залежать від конструкції конкретної печі: теплової ізоляції каналу, наявності пристрою для попереднього підігрівання поду, його конструкції, розташування й комутації тощо. Розрахунок цих втрат є достатньо громіздким, проте, з огляду на невелике значення $Q''_{\text{втр}}$ їх можливо врахувати як відсоток від загальних втрат теплоти. У нашому випадку їхньою величиною знехтуємо.

3.1. Вентиляція робочої камери

Найбільшу проблему становить визначення витрат теплоти внаслідок вентиляційних процесів. Картина вентиляційних потоків, що циркулюють в зоні ГТО і поблизу неї в сучасних тунельних печах складна для дослідження, а тому є недостатньо вивченою і формалізованою. Однією з найбільш опрацьованих математичних моделей розрахунку пароповітряних потоків у пекарній камері, включаючи зону ГТО, є модель з рециркуляцією пароповітряних сумішей уздовж всієї пекарної камери (Маклюков, Маклюков 1984) [6]. Однак за нашими

спостереженнями фізичної картини природної вентиляції зони ГТО (Дудко з колегами 1985 [17] та Дудко з колегами 1986 [18]) феномен рециркуляції пароповітряної суміші в тунельних печах, що мають достатньо велику протяжність пекарної камери на практиці не спостерігається.

На нашу думку, більш адекватною може бути двозонна модель вентиляційного процесу в межах і поблизу зони ГТО (рис. 4). До першої (перехідної) зони умовно можна віднести простір пекарної камери між перерізом саджального отвору і ближчим до нього конструктивним елементом зволожуючого пристрою. В цій зоні має місце активне перемішування двох різко відмінних за своїми фізичними властивостями середовищ: нагрітого вологого повітря з високою концентрацією водяної пари, з якого складається робоче середовище зони ГТО, і холодного сухого повітря пекарної зали. Потік холодного повітря, що проникає через нижню частину саджального отвору по мірі віддалення від входу достатньо швидко прогрівається і змішується з паром, утворюючи пароповітряну суміш з високим вологовмістом. Вентиляційний потік, що формується з цієї суміші в перехідній зоні прямує за межі пекарної камери через верхню частину саджального отвору. Друга (робоча) зона відповідає основному простору, в якому відбувається гіротермічне оброблення тістових заготованок. Згідно з раціональним режимом для пшеничного круглого хліба, як зазначено вище, параметри пароповітряної суміші в робочій зоні мають бути $t=120$ °С, $\varphi=70 - 85$ %, за яких відбувається інтенсивна конденсація пари на поверхні.

Вентиляція зони ГТО має деякі особливості, які досліджувалися нами (Дудко з колегами, 1983 [19], Дудко з колегами 1985 [17]). Предметом дослідження, зокрема, був вплив геометричних чинників будови камери для парозволоження і витрати пари на параметри середовища, що визначаються інтенсивністю природної вентиляції. Висловлене і обґрунтоване припущення, що інтенсивність вентиляційних процесів залежить від показника обмеженості

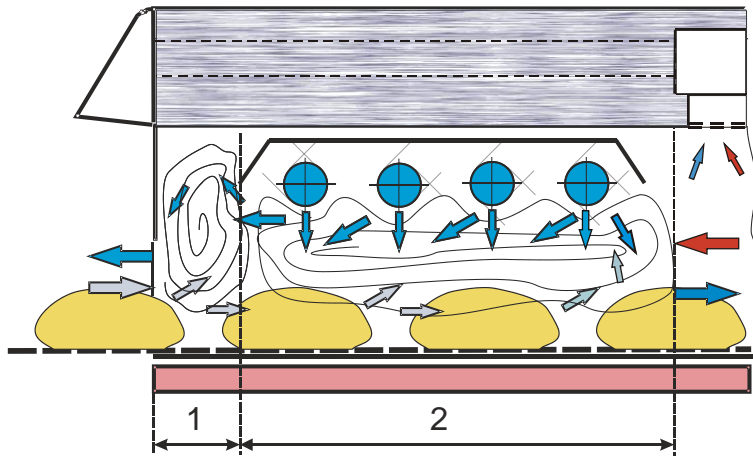


Рисунок 4. Двоннна розрахункова модель вентиляційних потоків: 1 – перехідна зона; 2 – робоча зона гігротермічного оброблення.

простору, який можна представити у вигляді безрозмірного комплексу $1/Ve$, складеного з геометричних характеристик. Комплекс Ve являє собою співвідношення деякого умовного об'єму, в якому спостерігаються вентиляційні течії, і геометричного об'єму V камери:

$$Ve = \frac{1}{V} \left[\sum_{i=1}^n S_i (H_i^t + H^b) + \Delta H \cdot S_{\min} \right]. \quad (1.5)$$

Умовний об'єм представлений величинами, що інтенсифікують вентиляційний процес. Для робочої камери печі кількість отворів $n=2$, характеристиками є: відстань між горизонтальною площиною, яка проходить через центр камери і рівнями газоскиду (верхніми краями) саджального та розвантажного отворів H_1^t , H_2^t , між цією ж площиною і нижньою нагрівною поверхнею H^b , площа отворів S_1 , S_2 , а також перепад висот між рівнями газоскиду отворів ΔH . За наявності перепаду висот між рівнями газоскиду отворів враховується площа меншого з них S_{\min} .

Максимальна відносна вологість середовища, яка може бути досягнута в камері ГТО визначальним чином залежить від значення геометричного показника обмеженості простору і не залежить від витрати технологічної пари. За деяких несприятливих обставин (наявність перепаду висот між рівнями газоскиду протилежно розміщених отворів) збільшення витрати пари, навпаки, інтенсифікує вентиляційний процес, що призводить до зворотного ефекту –

зменшення відносної вологості в камері. Крім показника V_e , на вентиляцію суттєво впливає і місце уведення пари відносно вхідного і вихідного отворів камери.

На рис. 5 зображена залежність відносної вологості в камері ГТО від показника обмеженості простору і витрати пари. В цілому, простежується тверда кореляція досягнутої величини відносної вологості від показника обмеженості простору. За малих значень показника обмеженості простору $1/V_e$ відносна вологість низька і практично не залежить від витрати пари (криві $1/V_e = 5,0$ і $1/V_e = 7,1$). Інакше кажучи, неможливо отримати середовище з параметрами, достатніми для якісного гіротермічного оброблення шляхом збільшення витрати пари в камері з великим значенням V_e .

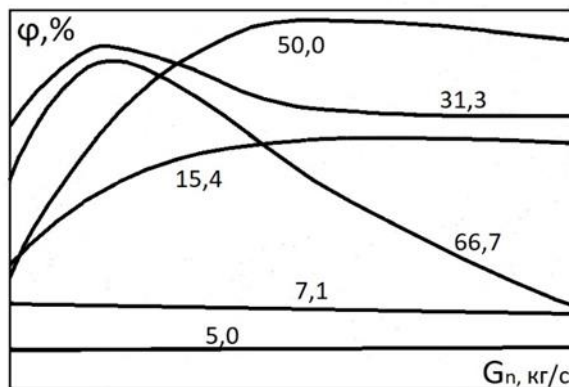


Рисунок 5. Відносна вологість у камері ГТО з різним значенням показника обмеженості простору $1/V_e$ (числа біля відповідних кривих) залежно від витрати пари.

На рис. 6 показана залежність досягнутого максимального значення відносної вологості середовища в камері від значення геометричного показника V_e і від близькості розташування джерела пари до відкритого отвору камери, що корелюється з довжиною перехідної зони згідно з моделлю на рис. 4.

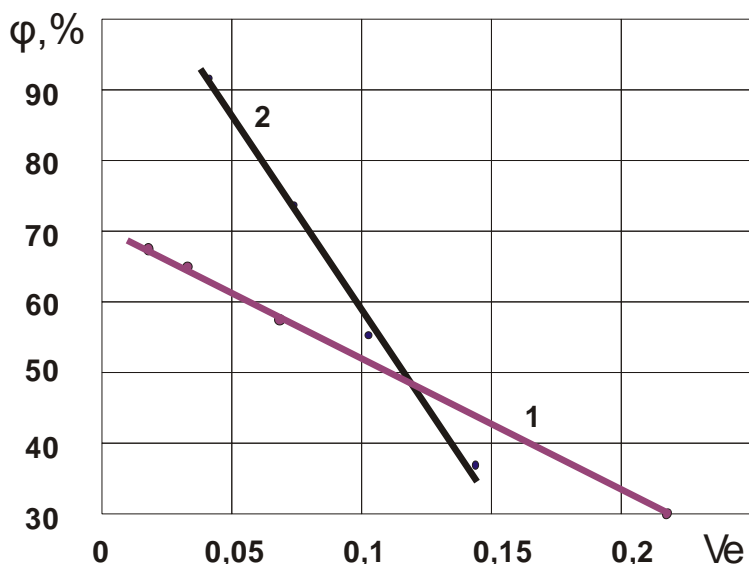


Рисунок 6. Максимальне значення відносної вологості в камері з різним значенням геометричного показника V_e за близького (1) та віддаленого (2) розташування джерела пари відносно саджального отвору.

Як бачимо, попри багатоманітність кривих на рис. 5, залежності на рис. 6 мають чіткий лінійний характер. Близьке розташування перфорованих паророзподільних труб до саджального отвору (пряма 1) інтенсифікує вентиляційний процес, внаслідок чого досягти високих значень відносної вологості середовища шляхом збільшення витрати пари немає можливості. Точка перетину прямих 1 і 2, що характеризує умову $V_e=0,12$ і $\phi=48\%$ відповідає витраті пари для прямої 1 приблизно у 2 – 2,5 рази більшій, ніж для прямої 2.

Звідси можна зробити висновок, що проектувальникам печей не слід розміщувати парозволожуючий пристрій близько до саджального отвору попри уявне бажання створити найкращі умови для інтенсивної конденсації пари одразу після входження тістових заготованок у піч. Близьке розташування джерела пари до вхідного отвору провокуватиме збільшення вентиляції, що погіршить умови для конденсації пари і призведе до її перевитрати. Для зменшення впливу природної вентиляції ефективним засобом може бути розміщення на верхній грані вхідного отвору еластичного фартуха. Цей прийом часто пропонується провідними фірмами-виготовлювачами пічної техніки і достатньо успішно застосовується під час експлуатації печей.

3.2. Тепловий баланс ГТО за відсутності газообміну з пекарною камерою

Спочатку розглянемо випадок, коли вся надлишкова пара виводиться через саджальний отвір, тобто втрати теплоти внаслідок вентиляції враховуються у значенні $Q'_{вен}$. Тому поки що вважатимемо, що $Q''_{вен}=0$, також у цьому розділі для спрощення позначимо $Q'_{вен}=Q_{вен}$.

З урахуванням зазначених вище міркувань картина потоків теплоти спроститься і рівняння теплового балансу зони ГТО матиме вигляд, кДж/кг:

$$Q_n + Q_{x.n} + Q_{н.к} = \Delta Q_{т.з} + Q_{вен}, \quad (1.6)$$

де Q_n – кількість теплоти внесеної технологічною парою;

$Q_{x.n}$ – кількість теплоти з вентиляційним повітрям із цеху;

$Q_{н.к}$ – кількість теплоти, передана нижнім нагрівним каналом;

$\Delta Q_{т.з}=Q''_{т.з}-Q'_{т.з}$ – кількість теплоти, яка виноситься із зони ГТО разом з нагрітими тістовими заготовками.

Для того, щоб з'ясувати реальну картину впливу вентиляційних процесів на тепломасообмін в околі зони ГТО розглянемо числовий приклад із практики роботи сучасних тунельних печей. Будемо вважати, що:

1. У тунельній печі РРР 3.0 54.0 випікається круглий подовий хліб масою 1,0 кг з пшеничного борошна. Площа поду печі становить 54 м², продуктивність печі по гарячому хлібу – 971 кг/год, величина упікання – 8 %. Пекарна камера має розміри 18,0x3,1x0,2 м.
2. Параметри середовища в робочій області зони ГТО згідно з раціональним режимом для пшеничних подових виробів (Лісовенко, 1976): $t_{гто}=120$ °С, $\phi=79$ %. За цих значень параметрів вологовміст повітря становить $d_{гто}=2,34$ кг вологи на 1 кг сухого повітря і температура мокрого термометра 92 °С.

3. Параметри технологічної пари: $t_{\text{п}}=110$ °С, $p=1,026$ кПа, пара суха насичена.
4. Витрата технологічної пари становить $g_{\text{п}}=0,15$ кг на 1 кг гарячого хліба, приведена маса конденсату (див. розділ 3) $g_{\text{к}}= 0,0128$ кг/кг.
5. Зовнішнє повітря має такі параметри: $t_{\text{х.п}} = 26$ °С і $\varphi=75\%$, що означає вологовміст $d_{\text{х.п}} = 0,016$ кг вологи на 1 кг сухого повітря.

Складемо рівняння матеріального балансу газової фази в зоні ГТО, кг на 1 кг гарячого хліба, враховуючи, що вентиляційне вологе повітря, яке виводиться за межі камери ГТО складається з несконденсованої пари і усієї кількості холодного повітря, що проникає через саджальний отвір, кг/кг:

$$g_{\text{п}} - g_{\text{к}} + g_{\text{х.п}} = g_{\text{вен}}, \quad (1.7)$$

де $g_{\text{п}}$ – витрата технологічної пари;

$g_{\text{к}}$ – витрата конденсату;

$g_{\text{х.п}}$ – витрата повітря, що проникає з цеху;

$g_{\text{вен}}$ – витрата вентиляційного повітря, що виходить назовні.

Кількість теплоти, що вноситься з технологічною парою, кДж на 1 кг гарячого хліба, знаходиться як добуток питомої ентальпії $H_{\text{п}}$, кДж/кг, і питомої витрати пари, кг/кг:

$$Q_{\text{п}} = g_{\text{п}} H_{\text{п}}, \quad (1.8)$$

Питома ентальпія перегрітої пари (при $t=110$ °С) після виходу насиченої пари з тією ж температурою в простір пекарної камери, кДж/кг пари, буде:

$$H_{\text{п}} = 2501 + 1,8 \cdot 110 = 2699,$$

де 2501– теплота пароутворення при 0°С, кДж/кг;

1,8 – питома теплоємність пари, кДж кг⁻¹ К⁻¹, при температурі 120°С;

Таким чином, кількість теплоти, що вноситься парою на 1 кг гарячого хліба складає, кДж/кг:

$$Q_{\Pi} = 404,85$$

Механізм передачі теплоти тістовим заготованкам різний для відкритої і контактної поверхонь. Відповідно, розділимо і кількість переданої теплоти між двома половинами тістової заготованки:

$$\Delta Q_{m.3} = \Delta Q_{m.3}^g + \Delta Q_{m.3}^k \quad (1.9)$$

Кількість теплоти, переданої нижнім нагрівним каналом, частково поглинається ТЗВ і частково передається пароповітряному середовищу зони ГТО внаслідок тепловіддачі від незайнятої тістовими заготованками частини поду:

$$Q_{н.к} = \Delta Q_{m.3}^k + Q_{к-с}, \quad (1.10)$$

де $Q_{к-с}$ – кількість теплоти, передана середовищу через незайняту поверхню поду, кДж/кг.

Тоді після деяких спрощень рівняння теплового балансу (1.6) набуде вигляду:

$$Q_{\Pi} + Q_{х.н} + Q_{к-с} = \Delta Q_{m.3}^g + Q_{вен} \quad (1.11)$$

Кількість теплоти, отримана внаслідок теплообміну парогазового середовища з відкритою частиною поверхні тістової заготованки $\Delta Q_{т.з}^g$, підрахована вище за формулою (1.3) і дорівнює 38,8 кДж/кг.

Кількість теплоти, переданої тістовим заготованкам від поду, можна визначити шляхом інтегрування кривої теплового потоку через нижню поверхню ТЗВ у проміжку часу від τ_1 до τ_2 . Щоб визначити вид підінтегральної функції скористаємося експериментальними кривими Лісовенка (1976) [2], які представимо у проміжку часу з 31 до 180 с у вигляді апроксимуючої функції:

$$q_{н.н} = -1814 \ln \tau + 15428 \quad (1.12)$$

Ця функція, як зазначає автор, описує експериментальні точки з високою точністю. В результаті інтегрування отримуємо значення $(Q_{т.з.}^H)_{31-180}=1075789$ Дж/м². Для перших 30 с скористатися цією кривою теплового потоку проблематично через непорівнянність масштабів (загальний масштаб становить 1920 с). Тому будемо вважати, що середнє значення теплового потоку в проміжку часу 0 – 30 с становить 9500 Вт/м², що дещо більше максимуму, характерного для кривої на 31-й секунді. Тоді $(Q_{т.з.}^H)_{0-30}= 285000$ Дж/м². Враховуючи, що питома площа контактної поверхні тістової заготовки за 180 с в середньому складає 0,0235 м²/кг, в сумі отримуємо $\Delta Q_{т.з.}^K= 0,0235(1075789+285000)/1000=31,98$ кДж/кг.

Для визначення кількості повітря, що проникло до зони ГТО, будемо керуватися такими міркуваннями. В робочій зоні ГТО в результаті змішування пари із зволожуючого пристрою і повітря з цеху утворюється робоча суміш (рис. 2) з визначеними параметрами (t, φ, d), значення яких визначені умовами задачі.

Кількість інвазійного повітря можна орієнтовно визначити, якщо розглядати утворене середовище як результат ідеального змішування двох середовищ з різною концентрацією водяної пари. Концентрація ψ водяної пари в суміші:

$$\psi_{см} = \frac{\psi_{x.n} g'_{x.n} + \psi_n g_n}{g'_{x.n} + g_n}, \quad (1.13)$$

де $g'_{x.n}$ – кількість повітря, що проникло до робочої зони ГТО, кг/кг.

Масову концентрацію пари у вологому повітрі і вологовміст пов'язує формула: $\psi=d/(d+1)$. Тоді $\psi_{x.n}=0,0157$, $\psi_n= 1,0$, а $\psi_{см}=0,7$.

Кількість сухого повітря, присутнього в робочій зоні ГТО, обчислюється після відповідних перетворень виразу (1.13), кг/кг гарячого хліба:

$$g'_{x.n}=0,0602$$

Загальна кількість повітря, що проникає із цеху через саджальний отвір печі $g_{вх}$, кг сухого повітря на 1 кг гарячого хліба, для тунельної печі згідно з прийнятою моделлю визначається з рівняння балансу вологи за формулою:

$$g_{x.n} = \frac{g_n - g_k}{d_{вен} - d_{x.n}}, \quad (1.14)$$

де $d_{вен}$ – середній вологовміст вихідного потоку в перерізі саджального отвору, кг/кг.

Після підстановки значень і обчислень отримаємо:

$$d_{вен} = 0,016 + \frac{0,1372}{g_{x.n}} \quad (1.15)$$

З іншого боку, вологовміст вихідного потоку можна визначити, якщо розглядати цей потік як результат змішування середовища робочої області зони ГТО з вхідним потоком повітря згідно з прийнятою моделлю взаємодії потоків (рис. 2):

$$d_{вен} = \frac{d_{x.n}g_{x.n} + d_{гто}g_{гто}}{g_{x.n} + g_{гто}}, \quad (1.16)$$

де $g_{гто} = 0,1372 + 0,0602 = 0,1974$ кг/кг гарячого хліба (0,1372 – приведена кількість несконденсованої пари).

Спільний розв'язок (1.15) і (1.16) дає значення кількості вхідного повітря $g_{x.n} = 0,0924$ кг на 1 кг гарячого хліба. Тоді вологовміст вихідного повітря згідно з формулою (1.16) буде $d_{вен} = 1,5$ кг води на 1 кг сухого повітря.

Кількість теплоти, що вноситься повітрям із цеху, кДж/кг:

$$Q_{x.n} = g_{x.n}c_{x.n}t_{x.n} = 2,32, \quad (1.17)$$

де питома теплоємність повітря $c_{x.n} = 1,005$ кДж кг⁻¹ К⁻¹.

Підставивши обчислені величини у рівняння (1.11) отримаємо вираз для кількості теплоти, що втрачається через саджальний отвір, на 1 кг гарячого хліба, кДж/кг:

$$Q_{вен} = Q_{к-с} + 368,4 \quad (1.18)$$

Із цього виразу очевидно, що втрати теплоти з вентиляційним повітрям можливо визначити, якщо відома кількість теплоти, отримана внаслідок тепловіддачі від незайнятої поверхні поду. Ця задача буде розв'язана у розділі 4.3.

Поки що зробимо оцінку можливому значенню температури вихідного вентиляційного потоку.

Кількість теплоти, що виноситься з вентиляційним потоком можна представити у вигляді:

$$Q_{вен} = G_{вен} H_{вен},$$

де $G_{вен}$ – витрата вологого повітря, приведена до 1 кг сухого повітря, на 1 кг гарячого хліба.

Ентальпія вологого повітря (в кДж на 1 кг сухого повітря):

$$H_{вен} = c_{x.n} t_{x.n} + d_{вен} (2501 + 1,8 t_{вен}), \quad (1.19)$$

Якщо знехтувати вологістю цехового повітря, можна записати: $G_{вен} \approx g_{x.n}$, оскільки іншого джерела сухого повітря в зоні ГТО, ніж вхідний потік, немає. Тоді $Q_{вен} = g_{x.n} H_{вен}$. Середню температуру вентиляційного потоку можна розрахувати з виразу:

$$Q_{вен} = g_{x.n} [1,0 \cdot t_{x.n} + d_{вен} (2501 + 1,8 t_{вен})] \quad (1.20)$$

Якщо $Q_{к-с}=0$ (тепловіддача від нижнього каналу відсутня по причині близькості температур середовища і поду), $Q_{вен}=368,4$ кДж/кг, а розрахунок середньої температури вихідного потоку дає результат близько 64 °С.

Сумарна тепловіддача від нижнього каналу з урахуванням теплоти, переданої тістовим заготовкам, буде: $Q_{н.к}=Q_{к-с}+31,98$ кДж/кг. У табл. 1 наведені результати розрахунків складових теплового балансу розраховані за певної температури вентиляційного потоку. У практиці експлуатації печі, навпаки, заданою величиною, як правило, має бути кількість теплоти, підведеної до нижнього каналу, інші статті балансу, а також середня температура вентиляційного потоку визначаються залежно від цієї кількості.

Таблиця 1

Балансові витрати теплоти, кДж/кг, та середня температура вентиляційного потоку, °С, залежно від кількості теплоти на підігрів нижнього каналу

$Q_{н.к}$	31,98	34,10	37,52	40,94	44,35	47,77	51,19
$Q_{к-с}$	0,00	2,12	5,54	8,96	12,37	15,79	19,21
$Q_{вен}$	368,45	370,57	373,99	377,41	380,83	384,25	387,66
$t_{вен}$	63,81	70	80	90	100	110	120

Зауважимо, що тепловіддача від поверхні нижнього каналу за реальних значень температури може складати від 9 до 19 % від вентиляційних втрат, у свою чергу, втрати теплоти внаслідок вентиляції можуть бути однієї величини, або й більші, ніж витрати безпосередньо на процес перетворення тіста-хліба в готові хлібобулочні вироби.

3.3. Тепловий баланс зони ГТО за наявності газообміну з рештою простору пекарної камери

Повернімося до питання щодо врахування тепломасообміну внаслідок газообміну всередині пекарної камери (рис. 3). Характер обміну між зоною ГТО і рештою пекарної камери має суттєву відмінність від газообміну через саджальний отвір. Чіткої границі між середовищами зони ГТО і першої зони випікання печі не

існує: пекарна камера по суті є продовженням зони ГТО. Про це, зокрема, свідчать багаточисленні експериментальні дані, в тому числі, Лісовенка з колегами (1979) [20], згідно з якими температура мокрого термометра по ходу конвеєра тунельної печі навіть на значному віддаленні від зони ГТО залишається практично на тому самому рівні (порядку 85 – 90 °С), що і в робочій зоні. Це свідчить про те, що значна частина технологічної пари виводиться із зони ГТО не лише через саджальний отвір, але й мігрує до пекарної камери. Тут відбувається тепломасообмін за рахунок конвективної дифузії між середовищами зони ГТО і менш вологого, проте, більш нагрітого – із першої зони випікання. Інтенсивність цього процесу менша, порівняно з вентиляцією через саджальний отвір, оскільки середовища, які рухаються назустріч одне одному мають меншу різницю значень густини.

Температура мокрого термометра пов'язана з іншими параметрами пароповітряної суміші виразом:

$$t_m = t_c - \frac{r_m (d_m - d)}{c_{нов} + c_n d} \quad (1.21)$$

де t_c – температура середовища (сухого термометра), °С;

r_m – теплота пароутворення при температурі мокрого термометра, кДж/кг;

d_m – вологовміст насиченого вологого повітря при температурі мокрого термометра, кг/кг.

Розглянемо характерний випадок, коли у першій зоні обігріву $t_c = 190$ °С, $t_m = 90$ °С. За наведених вище умов маємо такі табличні дані: $r_m = 2282$ кДж/кг, $d_m = 1,51$ кг/кг, питома теплоємність пари $c_n = 2,0$ кДж кг⁻¹ К⁻¹. Тоді після відповідного перетворення (1.20) обчислення вологовмісту середовища першої зони обігріву пекарної камери дає результат $d = 1,348$ кг/кг.

У місці зустрічі двох середовищ – із зони ГТО і з основної частини пекарної камери формуються вентиляційні потоки, спрямовані назустріч один одному, аналогічно тому, як це відбувається в перерізі саджального отвору. Рушієм є

різниця статичних тисків, обумовлена різницею густини двох середовищ. Вентиляційні потоки формуються таким чином, що середовище меншої густини займає верхню частину простору, а більшої – нижню.

Густину вологого повітря можна визначити за формулою, кг/м³:

$$\rho_{в.н} = \frac{1}{T} \left(\frac{p_{с.п}}{287} + \frac{p_n}{461,5} \right), \quad (1.22)$$

де $p_{с.п}$ – парціальний тиск сухого повітря, Па;

p_n – парціальний тиск пари, Па;

T – абсолютна температура вологого повітря, К.

Парціальний тиск пари знаходиться з виразу, кПа:

$$p_n = \frac{101,3d}{0,622 + d} \quad (1.23)$$

За наведених вище значень параметрів парціальний тиск пари у пекарній камері поблизу зони ГТО становить 69,3 кПа. Густина двох середовищ – пекарної камери і зони ГТО мають близькі значення ($\rho_{ГТО}=0,63$ кг/м³, $\rho_{п.к}=0,565$ кг/м³), тому рушійна сила повітрообміну буде незначною, зустрічне переміщення вентиляційних потоків уздовж горизонтальної осі камери буде виражено відносно слабо.

Нами досліджувалися зустрічні горизонтальні вентиляційні потоки, обумовлені різною густиною середовищ (Дудко, Теличкун 1986) [18]. Встановлено, що потік меншої густини, що витікає у простір з однаковою і більшою за значенням густиною, займає верхню 1/3 (з високою точністю) висоти отвору (або камери, якщо вона нічим не обмежена). Цей потік є суттєво нерівномірним по висоті за температурою і густиною, бо в умовах вільної конвекції зазнає стратифікації внаслідок дії гравітаційних сил. Зустрічний потік із середовища з більшою густиною займає нижні дві третини сумарної висоти і характеризується практично однаковим значенням густини по висоті.

Ця сама закономірність матиме місце і на межі зони ГТО і пекарної камери. Середовище зони ГТО є більш однорідним за густиною внаслідок більш активного турбулентного перемішування паровими струменями, ніж середовище пекарної камери. Потік у напрямку пекарної камери, сформований цим середовищем, займає дві третини висоти камери у нижній її частині.

Щоб надати кількісну оцінку вентиляційному процесу природного повітрообміну між двома різними середовищами скористаємося отриманою нами залежністю між середнім перепадом густини між двома пароповітряними сумішами $\Delta\rho$, одна з яких (меншої густини) витікає в середовище постійної густини, і середньою масовою швидкістю (ρw) цього потоку. Залежність у межах значень перепаду густини $0,04 - 0,2 \text{ кг/м}^3$ виражається емпіричною формулою:

$$(\rho w) = 0,0243 \exp(15,24\Delta\rho) \quad (1.24)$$

За середньої різниці густин $\Delta\rho=0,065 \text{ кг/м}^3$ значення середньої масової швидкості потоку з пекарної камери до зони ГТО, обчислене за формулою (1.24), буде $(\rho w)=0,0654 \text{ кг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а значення середньої швидкості цього потоку $w=0,116 \text{ м/с}$.

Тепловий баланс складається на одиницю продукції, тому, щоб перейти до характеристики повітрообміну, яку можна використати у рівнянні теплового балансу зони ГТО, слід пов'язати середню масову швидкість вентиляційного потоку з продуктивністю та геометричними характеристиками печі, наведеними вище. Кількість вологого повітря, що проникає із пекарної камери становитиме:

$$G_{n.k} = 0,33NB(\rho w)_{n.k}, \quad (1.25)$$

де N і B – висота і ширина пекарної камери відповідно, м.

Результат обчислення за формулою (1.25): $G_{п.к}=0,01338 \text{ кг/с}$. Кількість сухого повітря в потоці з пекарної камери $0,01077(101,3-69,5)/101,3=0,00423 \text{ кг/с}$, що в перерахунку на 1 кг гарячого хліба становитиме:

$$g_{п.к} = 0,00338 \cdot 3600 / 971 = 0,0157 \text{ кг/кг.}$$

Кількість теплоти, яка потрапляє до зони ГТО з боку пекарної камери за рахунок вентиляції, кДж на 1 кг гарячого хліба:

$$Q_{вен}^{п.к} = 0,0157 [1 \cdot 190 + 1,348(2501 + 2 \cdot 190)] = 64,0$$

Кількість вологого повітря, що потрапляє зі зони ГТО до пекарної камери можна визначити виходячи з припущення про рівність витрат зустрічних потоків¹. Знаючи геометричні розміри потоків, після простих перетворень будемо мати:

$$(\rho w)_{зто} = 0,5(\rho w)_{п.к}, \quad (1.26)$$

де індекс означає місце, звідки бере початок відповідний потік.

Середня швидкість потоку із зони ГТО у пекарну камеру становитиме 0,052 м/с. Витрата вологого повітря в перерахунку на сухе повітря і на 1 кг гарячого хліба становитиме 0,0103 кг/кг.

Кількість теплоти, що виноситься із зони ГТО в пекарну камеру, кДж/кг:

$$Q_{вен}'' = 0,0103 [1 \cdot 120 + 2,34(2501 + 1,8 \cdot 120)] = 66,7$$

Як бачимо, теплообмін між зоною ГТО і пекарною камерою внаслідок природної вентиляції незначний, сумарно із зони ГТО до пекарної камери потрапляє теплоти в кількості 2,7 кДж/кг. Цей факт дає підставу зробити припущення, що вентиляційний процес всередині пекарної камери не вплине суттєво на повітрообмін через саджальний отвір, тобто будемо вважати, що підраховані вище кількісні показники складових теплового балансу не зміняться.

Для врахування впливу повітрообміну всередині пекарної камери внесемо корективи у рівняння (1.10) теплового балансу зони ГТО:

¹ Це припущення справедливе за умови правильного налаштування витяжної системи з пекарної камери, що передбачає відсутність наскрізних протягів.

$$Q_n + Q_{x.n} + Q_{k-c} + Q_{вен}^{n.k} = \Delta Q_{т.з}^6 + Q'_{вен} + Q''_{вен} \quad (1.27)$$

Після підстановки значень і розв'язання рівняння отримаємо уточнені залежності між витратою теплоти на підігрів нижнього каналу, тепловіддачею від незайнятої поверхні поду, втратами з вентиляційним процесом і температурою вихідного вентиляційного потоку (табл. 2).

Таблиця 2

Баланс теплоти, кДж/кг, з урахуванням газообміну всередині пекарної камери залежно від середньої температури вентиляційного потоку, °С

$t_{вен}$	63,81	70	80	90	100	110	120
$Q_{н.к}$	34,68	36,80	40,22	43,64	47,05	50,47	53,89
$Q_{к-с}$	2,70	4,82	8,24	11,66	15,07	18,49	21,91
$Q_{вен}$	368,45	370,57	373,99	377,41	380,82	384,24	387,66

Дійсну температуру вихідного вентиляційного потоку і кількість теплоти, що передається від нижнього каналу у межах зони ГТО можна розрахувати як задачу теплообміну ТЗВ через опорну поверхню у поєднанні з тепловіддачею від незайнятої поверхні поду. Важливо, щоб значення і хід температури поду з урахуванням умов тепловіддачі до контактної поверхні виробів відповідали початковому значенню і кінетиці теплового потоку, які є характерними для раціонального режиму підведення теплоти в зоні гіротермічного оброблення.

4. Теплообмін з боку нижнього каналу в зоні ГТО

У місці контакту ТЗВ з подом має місце кондуктивний теплообмін. Чисельні значення інтенсивності цього процесу можна визначити розрахунковим способом теоретично (шляхом розв'язання рівняння нестационарної теплопровідності) або на підставі даних експерименту.

4.1. Розрахунок за рівнянням теплопровідності

На сьогоднішній день відсутня чітка і однозначна картина теплових процесів, що мають перебіг біля контактної поверхні ТЗВ, в літературі описані

лише окремі її фрагменти. На початковій стадії випікання ТЗВ можливо представити як напівобмежене масивне тіло у контакті з нагрітою поверхнею. З погляду математики задача прогрівання ТЗВ описується 3D рівнянням нестационарної теплопровідності:
$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left[\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \right],$$
 де t – температура °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 заготованки у горизонтальній площині, тобто вважати задачу лінійною, як це роблять переважна більшість дослідників. Тоді вираз спроститься:
$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \right).$$

Попри удавану простоту математичного виразу розв'язання рівняння є достатньо складним завданням. Для його спрощення припускається, що на початку прогрівання температура тіла в усіх точках однакова ($t_{\tau=0} = t_0$), включаючи температуру на поверхнях, коефіцієнт температуропровідності не змінюється з часом і не залежить від температури тіла у точці вимірювання. Однак навіть за таких спрощень аналітичні розв'язки рівняння отримані лише для найпростіших за формою тіл: кулі, циліндра, пластини.

Зазвичай, при розгляді теплообміну ТЗВ з подом до рівняння теплопровідності застосовують граничні умови IV роду, які передбачають тісний контакт тіл, в результаті чого температура в місці контакту для тіла і опорної поверхні однакова (початок координат знаходиться у місці контакту, а вісь x спрямована вглиб ТЗВ):

$$-\lambda_{m-x} \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=+0} = -\lambda_{o.n} \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=-0},$$

де λ_{m-x} , $\lambda_{o.n}$ – коефіцієнти теплопровідності тіста-хліба і матеріалу опорної поверхні відповідно, $\text{Вт м}^{-1}\text{К}^{-1}$.

Можна прийняти, що вся кількість теплоти, що випромінюється нижнім каналом, повністю передається поду з розміщеними на ньому ТЗВ. Водночас, доцільно розглядати умови теплообміну диференційовано відповідно до механізму. З відкритої частини поду існуватиме теплообмін за рахунок природної конвекції, на зайнятій поверхні – контактний теплообмін.

У більшості випадків у сучасних хлібопекарських та кондитерських печах вироби випікаються на металевому поду, який являє собою плетену сталеву сітку або суцільну сталеву стрічку. 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 (Пехович і Жидких, 1968) [21] така схема належить до граничних умов V роду і математично записується так:

$$-\lambda_{m-x} \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=+0} = q - c' \rho' h' \frac{\partial t}{\partial \tau} \Big|_{x=0} , \quad (1.28)$$

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

q – тепловий потік від горизонтальної стінки каналу, Вт/ м²;

h' – товщина сталеві стрічки (конвеєрного поду), м.

Насправді ця картина може бути більш складною, якщо брати до уваги додатковий зазор між рухомим подом і нерухомою горизонтальною поверхнею стінки пекарної камери (нижнього нагрівного каналу), можливу наявність пекарських листів, пекарських форм тощо, оскільки тоді задача набуває рис теплообміну через багат шарову стінку. Найбільший же внесок в ускладнення аналітичного розв'язку робить урахування існуючої нелінійної залежності теплофізичних характеристик тіста-хліба від температури, що фактично робить можливим розв'язок лише за допомогою чисельних методів або напівемпіричних методів теорії подібності.

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

$$t(\tau) = t_0 + 17,2 \ln \tau, \quad (1.29)$$

де t_0 – початкова температура тіста, °С.

Похідна цієї функції буде $\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{17,2}{\tau}$

Якщо підставити значення похідної і середні значення теплофізичних характеристик матеріалу поду (сталева сітка) у діапазоні температур 30 – 200 °С рівняння граничних умов (1.28) набуде вигляду:

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=+0} = q - \frac{125}{\tau} \quad (1.30)$$

В лівій частині рівняння – тепловий потік, сприйнятий ТЗВ. Значення q (тепловий потік з поверхні каналу) можна знайти з виразу (1.12) у проміжку значень часу 31 – 180 с. Для проміжку 0 – 30 с будемо вважати лінійною зміну теплового потоку із значеннями 9500 Вт/м² на 15-й секунді і 9258 Вт/м² на 30-й, як нами було прийнято раніше. Тоді для відрізка часу 0 – 30 с функція матиме вигляд: $q_{0-30} = -16,13\tau + 9742$.

4.2. Теплообмін через незайняту поверхню поду печі

Тепловіддачу з незайнятої виробами поверхні поду розрахуємо як для умов вільної конвекції за турбулентного режиму руху теплоносія. Для розрахунку скористаємося формулою (Уонг, 1979) [22]:

$$\check{Nu} = 0,14(GrPr)^{0,33},$$

де \check{Nu} – середнє значення критерію Нуссельта;

Gr , Pr – відповідно числа Грасгофа і Прандтля.

За характерний розмір, що фігурує в складі комплексів Nu та Gr візьмемо усереднену ширину смужки поду між рядами тістових заготованок. За продуктивності печі 971 кг/год і кількості заготованок по ширині поду 12 шт. знайдемо, що відстань між осями рядів становитиме 0,33 м. З урахуванням діаметру виробів відстань між найближчими точками тістових заготованок двох суміжних рядів буде 0,11 м, а з урахуванням кривизни заготованок приймемо значення характерного розміру 0,15 м.

Застосування критеріальних залежностей у розрахунках теплообміну передбачає отримання усереднених локальних даних. У той же час, параметри середовища суттєво відрізняються за довжиною зони ГТО, тому для збільшення точності розрахунку розіб'ємо зону на три відрізки, що відповідатимуть проміжкам часу: (1) = 0 – 60 с, (2) = 60 – 120 с і (3) = 120 – 180 с. Відповідно до середніх температури і складу пароповітряної суміші, які встановлені нашими попередніми дослідженнями, у межах виділених відрізків розрахуємо значення числа Прандтля. Скориставшись результатом лінійної інтерполяції табличних даних (Уонг, 1979) [22] отримаємо: $Pr(1) = 0,90$, $Pr(2) = 0,93$, $Pr(3) = 0,97$. Таким саме чином з тих же таблиць знайдемо значення чисел Грасгофа: $Gr(1) = 24543000$, $Gr(2) = 15586000$, $Gr(3) = 11164500$. Розрахуємо середні значення коефіцієнта теплообміну, що входить до складу критерію Нуссельта на цих ділянках (у $Вт м^{-2} К^{-1}$): $\alpha(1) = 7,77$, $\alpha(2) = 7,34$ і $\alpha(3) = 6,84$. Середні значення щільності теплового потоку внаслідок конвективної тепловіддачі з незайнятої поверхні поду на зазначених трьох ділянках відповідно складуть, $Вт/м^2$: $q(1) = 1100$, $q(2) = 797$, $q(3) = 604$. Застосувавши лінійну інтерполяцію можна отримати картину зміни щільності теплового потоку вздовж зони ГТО. Результати розрахунків теплових потоків – поглинутого тістовими заготованками разом з зайнятою ділянкою поду та внаслідок тепловіддачі від стінки нижнього нагрівного каналу для значень 0 – 240 с наведені на рис. 7 (вибір верхньої межі часового діапазону обумовлений тим,

що максимальну тривалість ГТО іноді вказують до 4 хв, хоча в нашому випадку всі числові розрахунки ведуться за період 3 хв).

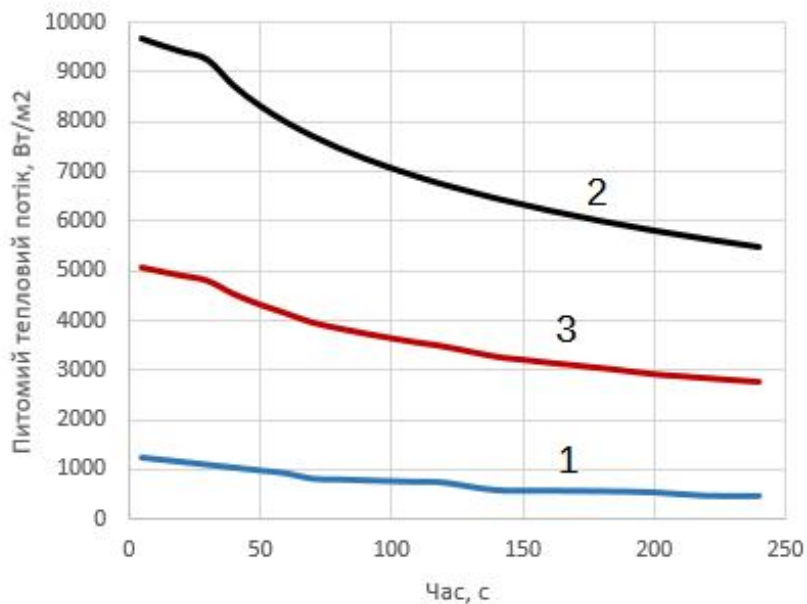


Рисунок 7. Теплові потоки з боку нижньої поверхні ТЗВ, Вт/м²: 1 – тепловіддача з незайнятої поверхні поду; 2 – теплоспоживання подом з тістовими заготовками (ТЗВ⁺) ; 3 – усереднена тепловіддача з поверхні каналу в межах зони ГТО ($\bar{Q}_{н.к}$).

Крива усередненої тепловіддачі з поверхні каналу побудована з урахуванням співвідношення площ зайнятої і незайнятої поверхонь поду, що в даному числовому прикладі склала 0,455. Зміна характеру кривих теплоспоживання і навантаження на канал на 30-й секунді відображає перехід від прийнятого нами апріорі лінійного характеру зміни теплового потоку у перші 30 с до криволінійного, обчисленого за формулою (1.30).

4.3. Тепловий баланс зони ГТО з урахуванням обігріву з боку нижнього каналу

Спираючись на отримані залежності знайдемо питому кількість теплоти, яку споживають вироби за час гіротермічного оброблення і питому кількість теплоти, яка має бути передана нижнім каналом. Для цього знайдемо площі між відповідними кривими і віссю абсцис, що відповідають питомій кількості

переданої теплоти. Крива теплоспоживання ГЗВ⁺ складається з двох ділянок. Для ділянки 0 – 30 с площа: $S_1 = 30(9766+8740)/2=277590$ Дж/м².

Ділянка 30 – 180 с описується рівнянням: $q(\tau)=22591 \cdot \tau^{-0,255}$. Кількість поглинутої теплоти:

$$S_2 = 22591 \int_{30}^{180} \tau^{-0,255} d\tau = 1069721 \text{ Дж/м}^2.$$

Сумарно кількість теплоти складе 1347311 Дж/м². З урахуванням середнього значення питомої площі контактної поверхні 0,0235 м²/кг кількість поглинутої теплоти складе 31,66 кДж/кг, що з похибкою 1 % відповідає отриманому раніше значенню 31,98 кДж/кг. Відтак, можна вважати, що частка теплоти, витрачена на підігрів поду (стрічка плетена із сталевого дроту) у нестационарному процесі становить незначну величину (лежить у межах похибки), якою можна знехтувати. Це цілком природно, якщо взяти до уваги, що розглядається модель раціонального режиму за Лісовенком, згідно з якою температура поду від моменту посадки заготованок і далі постійна 200 °С, тобто, фактично за стаціонарних умов.

Аналогічно визначимо кількість теплоти, що витрачається внаслідок тепловіддачі від незайнятої частини поду. Вона дорівнює 160242 Дж/м², що з урахуванням питомої незайнятої площі поду 0,0573 м²/кг складе 9,182 кДж/кг гарячого хліба.

Якщо співставити результати обчислень теплообміну через контактну поверхню з результатом балансових співвідношень для зони ГТО, відображених у табл. 2, отримаємо остаточний результат, кДж/кг гарячого хліба: $Q_{к-с} = 9,182$; $Q_{н.к} = 41,17$; $Q_{всн} = 374,95$. Середня температура пароповітряної суміші, що видаляється за межі зони ГТО $t_{всн} = 83$ °С. Тепловий баланс зони ГТО представлений на рис. 8.

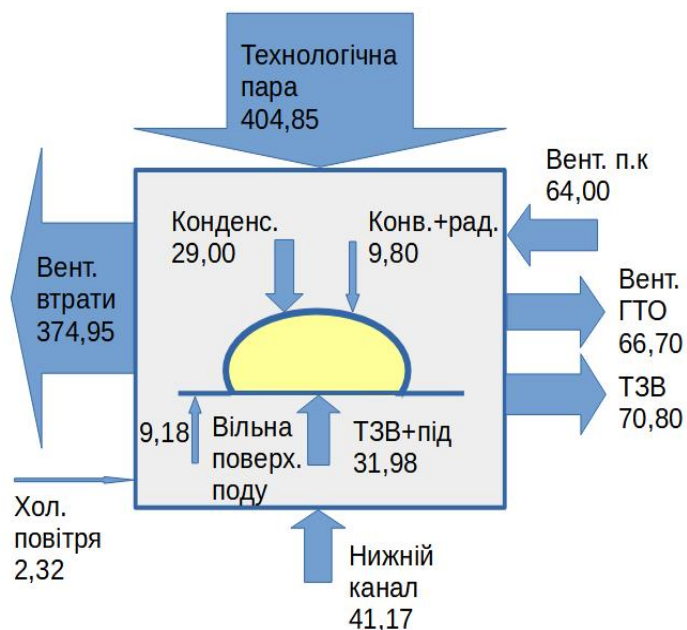


Рисунок 8. Тепловий баланс зони ГТО, кДж/кг гарячого хліба.

Альтернативним шляхом розв'язку задачі теплообміну ТЗВ з нижнім каналом міг би бути розрахунок за виразом (1.30) за умови відомого значення градієнту температури в тісті-хлібі у місці контакту. Однак цей градієнт, у свою чергу, є функцією температури і також залежить від

агрегатного стану тіста-хліба, який змінюється у місці контакту від стану в'язко-пластичної рідини до стану твердого тіла, тому навіть грубо оцінити його значення непросто. Таким чином, поставлена задача виглядає занадто складною для розв'язання «в лоба» і потребує більш гнучкого підходу.

4.4. Градієнт температури у контактному шарі ТЗВ

Отримані нами дані дають можливість зробити оцінку значення градієнту температури контактному шару ТЗВ, зробивши зворотний перерахунок за виразом (1.30). Для цього, найперше, необхідно знати залежність коефіцієнту теплопровідності у контактному шарі ТЗВ. Однак він належить до складних для визначення теплофізичних характеристик, що залежить від конкретних умов. Його значення, розраховані за різними методиками, варіюють у широких межах. У літературі існує багато даних щодо його розрахунку. Pulris, Salvadori (2009) [23] пропонують визначати коефіцієнт теплопровідності залежно від стану тіста-хліба (зневоднена скоринка, чи вологий м'якуш) за формулою:

$$\lambda = \begin{cases} \frac{0,9}{1 + \exp[-0,1(T - 253,16)]} + 0,2 & \text{if } T \leq T_f - \Delta T \\ 0,2 & \text{if } T > T_f - \Delta T, \end{cases}$$

де T_f – температура фазового переходу води при відповідному тиску;

ΔT – поправка на фізико-хімічні ефекти.

Однак зазначена формула дає для м'якуша значення близьке до постійної величини $1,1 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$, що практично не відображає вплив вологості на коефіцієнт теплопровідності. Тому, в своїх розрахунках для температури менше температури фазового переходу скористаємося формулами Лісовенка та Гінзбурга з колегами, отриманими для відповідних діапазонів температури:

- від 20 до 70 °C і вологовмісту тіста-хліба $30 - 100$ %:

$$\lambda = \lambda_{293} + 0,0061(T - 293) \text{ (Лісовенко, 1976),}$$

де $\lambda_{293} = 0,345 - 0,001W^c$ (Гінзбург з колегами, 1980, с. 196) [24];

W^c – вологовміст (на суху речовину), %.

Лісовенко зазначає, що його формула однаково придатна для тіста-хліба з різного борошна.

Гінзбург з колегами (1980) для тіста-хліба з пшеничного борошна наводять таку формулу:

$$\lambda = 0,345 - 0,001W^c + 0,00025(T - 273);$$

для тіста-хліба з житнього борошна:

$$\lambda = 0,345 - 0,001W^c + 0,0003(T - 273)$$

Що стосується коефіцієнта теплопровідності в діапазоні температур вище $70 - 80$ °C, його ефективне значення (що враховує ефект переносу, спричиненого усіма, окрім теплопровідності способами) нелінійно і різко зростає приблизно на третину, що Лісовенко (1976) пояснює переходом тіста у м'якуш та інтенсифікацією масопереносу. Водночас, для діапазону температур понад 100 °C скористаємося значенням $\lambda=0,2$ відповідно до Pulris, Salvadori (2009) [23]. Аналіз літературних даних свідчить, що для цього діапазону температур попри різні

умови випікання, рецептуру тіста тощо дані інших авторів (Лісовенко, 1976, [2], Zanoni колегами, 1995) [25] несуттєво відрізняються від цього значення.

У табл. 4 представлені значення коефіцієнту теплопровідності тіста-хліба, отримані за різними методами, і розраховані згідно з ними значення градієнту температури.

Таблиця 3

Зміна температурного градієнту в контактному шарі ТЗВ

Момент часу, с	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К)		Градієнт температури, К/м	
	Лісовенко (1)	Гінзбург, Громов, Красовская (2)	(1)	(2)
5	0,4919	0,2783	-	-
10	0,5638	0,2813	682	1205
20	0,6367	0,2852	3613	7242
40	0,7095	0,2892	7675	17131
60	0,7526	0,2919	10461	25668
80	0,8518	0,3708	11657	30054
Pulris, Salvadori (2009)				
100	0,2		49294	
120	0,2		50487	
140	0,2		50305	
160	0,2		48954	
180	0,2		47461	
200	0,2		45911	
220	0,2		44355	
240	0,2		42823	

Як бачимо, значення градієнту температури для тіста-хліба на кінець першої хвилини відрізняються за двома способами обчислення майже у 2,6 рази. Температурний градієнт збільшується, в момент фазового переходу та початку заглиблення зони випаровування в кінці другої хвилини стрибкоподібно зростає, досягаючи значення порядку 50 К/мм, яке тримається приблизно на цьому рівні впродовж третьої хвилини. Потім температурний градієнт починає знижуватися синхронно із зменшенням теплового потоку.

4.5. Розрахунок теплообміну через контактну поверхню за критеріальним рівнянням

Одним із традиційних шляхів розрахунку складових теплообміну, який передбачає уникнення розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь є застосування методів теорії подібності. Зокрема, можна скористатися критеріальним рівнянням, отриманим О. Лісовенком (1976) експериментальним шляхом для визначення температури в місці контакту з подом хліба з пшеничного борошна:

$$t^* = 5,33 Fo_m^{0,041} Kq^{0,057}, \quad (1.31)$$

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 заготованки перед посадкою в піч (у наших розрахунках прийнято $t^* = t/30$);

Kq – критерій випікання, що чисельно дорівнює відношенню кількості поглинутої теплоти на певній ділянці до загальної кількості поглинутої теплоти ТЗВ упродовж всього процесу випікання. Критерій випікання для нижньої половини виробу має вигляд:

$$Kq^H = \frac{Q^H(\tau)}{Q_{\text{вип}}^H}, \quad (1.32)$$

де $Q_{\text{вип}}^H = 224$ кДж/кг – кількість поглинутої теплоти за період випікання нижньою половиною виробу (Лісовенко (1976), с. 113) [2].

Слід зауважити, що кількість теплоти $Q_{\text{вип}}^H$ отримане шляхом інтегрування експериментально одержаної залежності теплового потоку від температури нижньої скоринки, помноженої на питому площу контакту і на продуктивність печі. Тобто, за своїм фізичним змістом зазначена кількість теплоти відноситься не до маси нижньої половини, а всієї ТЗВ.

Критерії подібності в рівнянні (1.31) складаються, в тому числі, із змінних теплофізичних характеристик, що залежать від температури, пористості і вологості тіста-хліба за час прогрівання. В літературі представлена велика кількість математичних моделей, що враховують зазначені функціональні залежності, однак ці дані різняться між собою в рази, а іноді на порядок і більше.

Зокрема, такою теплофізичною характеристикою є коефіцієнт дифузії води в тісті-хлібі, залежність якого Zheleva і Kambourova (2005) [26] представляють у вигляді, м²/с: $a_m = (-9,75 + 0,15u + 0,14t)10^{-11}$. Zanoni з колегами (1994) [27] 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 $u > 0,43$): $a_m = 10^{-9} u / 0,43$. Для бісквітного тіста (вологоміст 0,707 кг/кг) Baik, Marcotte (2003) [28] пропонують формулу для визначення ефективного коефіцієнта дифузії залежно від пористості ϵ і температури, Т, К: $D_e = 29,6\epsilon \exp(-8020,5 / T)$. Результати підрахунку за цією формулою подані ними у вигляді таблиці:

Пористість, ϵ	0,15 – 0,20	0,35 – 0,50	0,55 – 0,70
Температура, °С	33,0 – 35,9	53,5 – 58,5	73,8 – 84,1
Ефективний коефіцієнт дифузії, м ² /с	$(1,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-10}$	$(4,8 \pm 1,5) \cdot 10^{-10}$	$(22 \pm 3) \cdot 10^{-10}$

Це дослідження видається нам найбільш обґрунтованим, базується на більш сучасних методах дослідження, враховує основні чинники впливу – температуру і пористість, близьке до нашої задачі значення вологомісту, тому його результати ми будемо використовувати у подальших обчисленнях у вигляді:

$$a_m = 29,6k\epsilon(-8020,5 / T), \quad (1.33)$$

де k – поправочний коефіцієнт, уведений до формули нами.

Правомірність введення поправки k пояснюється тим, що дослідники тепломасообмінних процесів у ТЗВ не виробили єдиних підходів до методики

визначення коефіцієнта дифузії, а отримані ними значення залежать від асортименту тіста, тому мають суттєві розбіжності. Відсутність цих підходів як і відсутність збігів результатів вимірювань/обчислень коефіцієнта дифузії певним чином дає підстави адаптувати функціональну залежність (1.33) до результатів інших пов'язаних досліджень. Конкретне значення коефіцієнта ($k=1,858$) підібране нами виходячи із реперної точки – кількості теплоти, спожитої нижньою половиною ТЗВ за час 240 с, яке згідно з експериментальними даними Лісовенка ([2], с.153) становить 55 кДж/кг.

Для вибору адекватної моделі для розрахунку значень теплофізичних характеристик тіста-хліба розглянемо фізичні умови у контактному шарі ТЗВ після укладання заготованки на під печі. По перше, тістова заготованка подового хліба упродовж перебування в зоні ГТО дещо розпливається на поду внаслідок релаксації напружень (Лісовенко, с. 59) [2] і термічного розслаблення після перевертання колиски агрегату вистоя, зменшення формоутримуючої спроможності тіста (мінімум досягається за температури 57 °С (Михелев, Ицкович, 1968) [4] тобто на початку площа контактної поверхні дещо збільшується. За нашими оцінками за 3-4 хв, поки триває гігротермічне оброблення, площа контактної поверхні зростає на 10 %. По друге, прогрівання контактного шару іде у високому темпі, так само інтенсифікуються пов'язані з цим процеси (збільшення шпаруватості, інтенсивне зневоднення). Після досягнення температури порядку 70 – 80 °С перенесення вологи додатково активізується внаслідок інтенсифікації термовологопровідності, що супроводжується перетворенням тіста-хліба на м'якуш. Далі у периферійному шарі починає формуватися скоринка (на кінець випікання має вологість 4 – 8 % (Лісовенко, 1976), пористість стабілізується, як і коефіцієнт теплопровідності. Ці зміни вкупі призводять до зміни температурного градієнту, який спочатку набуває максимуму після досягнення температури фазового переходу, а потім починає зменшуватися, що призводить і до зменшення потоку поглинутої теплоти, тобто реалізується спадний тепловий режим. Таким чином, саме значення

температурного градієнту контактного шару виступає обмежуючим чинником у спроможності поглинати теплоту нижньою половиною ТЗВ.

З рівнянь (1.29 – 1.32) можна визначити кількість поглинутої теплоти нижньою половиною тістової заготовки Q_i на кожному етапі перебування її в зоні ГТО. Для цього загальну тривалість (240 с, як у Лісовенка) поділили на часові відрізки 1, 5, 10, 20, 40 с і далі з кроком 20 с (всього 14 відрізків). Значення поглинутого теплового потоку розраховували як середню величину за відповідний відрізок часу з урахуванням зміни площі опорної поверхні:

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

де $i=1, 2, \dots, 14$.

Необхідну тепловіддачу від нижнього нагрівного каналу розраховували згідно з рівнянням (1.30). Графіки зміни теплових потоків, за яких реалізується раціональний режим випікання, переданого нижнім каналом і поглинутого ТЗВ, починаючи з 10-ї секунди наведені на рис. 9.

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 секунді, практично на цьому рівні він тримається до 130-ї секунди і далі зменшується майже лінійно, повторюючи конфігурацію графіка спожитого теплового потоку.

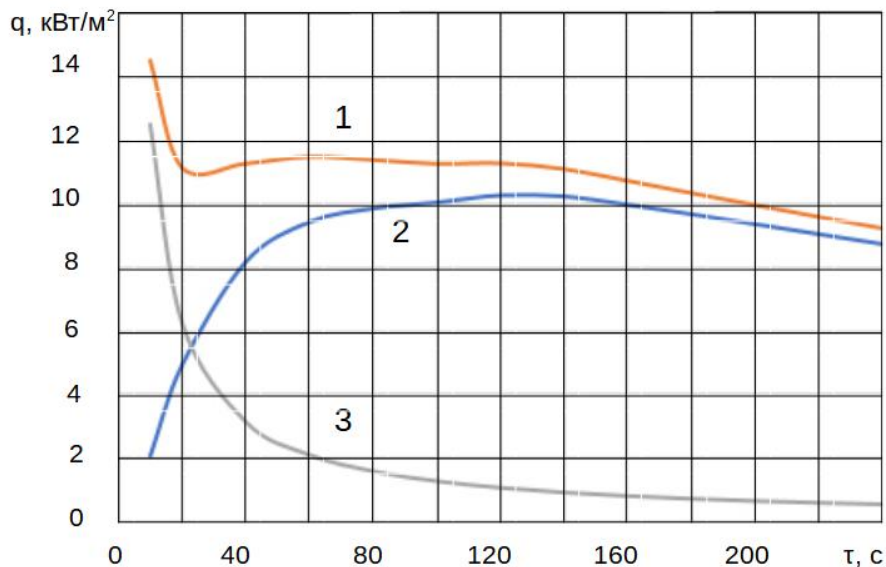


Рисунок 9. Теплові потоки, розраховані за допомогою критеріяльних залежностей О. Лісовенка: 1 – тепловіддача від робочої поверхні нижнього каналу печі; 2 – поглинутий ТЗВ тепловий потік; 3 – різниця між 1 і 2.

Наведені графіки, що ілюструють результати розрахунку не мають однозначного трактування. Форма кривої (якісна характеристика) поглинутого теплового потоку не відповідає усталеним уявленням, що базуються теоретичних засадах. Згідно з ними, на самому початку після укладення заготованки на попередньо нагрітій під має спостерігатися максимальний тепловий потік, оскільки в цей момент має місце максимальний градієнт температури у контактному шарі ТЗВ. Водночас, коефіцієнт теплопровідності тіста-хліба хоча і збільшується з часом внаслідок зростання температури тіста-хліба, проте не так суттєво, щоб подолати тренд спадання теплового потоку. Щодо кількісної характеристики, значення теплових потоків суттєво більші, ніж вказані на графіках рис. 7. Ці невідповідності можуть бути пояснені тим, що запропоноване критеріяльне рівняння досить грубо описує картину теплообміну саме у початкові хвилини перебування ТЗВ в печі. Іншим поясненням може бути, що в експерименті, результати якого формалізовані у вигляді критеріяльного рівняння, не була дотримана артикульована Лісовенком умова щодо підтримання температури поду на рівні 200°C, якої на практиці досягнути важко. Опосередковано про це свідчать температурні криві раціонального режиму

випікання, наведені самим автором, де температура поду знижується після моменту посадки (рис. 5.13, с. 139). Ця умова щодо постійної температури поду може бути забезпечена лише якщо теплова масивність поду є набагато більшою, ніж масивність тістової заготованки, що може мати місце у разі випікання тонких виробів, як, наприклад, перепічок, лаваша, піци тощо на керамічному поду. Більш імовірно, що рівняння (1.31) побудоване для умов поступового прогрівання поду разом з тістовими заготованками, що й ілюструють графіки процесу на рис. 9. У такому випадку крива 3 є нічим іншим, як графіком витрати теплоти на підігрівання поду.

Різниця в абсолютних значеннях теплових потоків на рис. 7 і 9 може бути пояснена різними шкалами, застосованими для обчислення ТФХ та інших величин, що входять до критеріїв подібності. Будемо вважати більш адекватними результати обчислення, наведені на рис. 7, як такі, що більше відповідають теоретичним засадам і підтверджуються тепловим балансом зони ГТО.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дозволило отримати деякі результати, що розвивають теорію процесу випікання хлібобулочних виробів у сучасних тунельних печах. Зокрема:

Розраховані складові теплового балансу зони гіротермічного оброблення тістових заготованок як важливої складової частини тунельної хлібопекарської печі. Це дає можливість локальної, а не сукупної (для печі в цілому) оцінки теплових витрат і дозволяє організувати відповідний режим локального підведення теплоти з боку нагрівної системи.

Запропонована двозонна модель вентиляційного процесу в зоні ГТО адекватно описує механіку вентиляційних потоків і дає змогу отримати чисельні значення параметрів середовища зони зволоження і енергетичний бік повітрообміну.

Здобуто підтвердження щодо питомої ваги процесу конденсації у передачі теплоти тістовим заготованкам через вільну поверхню. Ця кількість складає близько 75 %, решта 25 % – за рахунок конвекції і випромінювання парогазового середовища і огорожень.

Розглянута задача контактного теплообміну ТЗВ з нагрітою опорною поверхнею. Нижнє підведення теплоти має складати близько 45 % від загальної кількості отриманої теплоти в зоні ГТО. Втрати теплоти через незайняту тістовими заготованками поверхню поду складають близько 25 % від загальної тепловіддачі нижнього нагрівного каналу, що не дозволяє ігнорувати цю статтю витрат у тепловому балансі.

Розраховане значення температурного градієнту в місці контакту тістової заготовки з опорною поверхнею. Встановлено, що максимальне значення градієнту температури спостерігається упродовж третьої хвилини від початку випікання і становить порядку 50 К/мм.

Також отримані дані, що мають важливе практичне значення для конструкторів промислових печей та експлуатуючого персоналу. Зокрема:

Головною статтею витрат теплоти в процесі гіротермічного оброблення тістових заготовок є витрата технологічної пари, що подається до зони ГТО тунельної печі у великій кількості для можливості створення пароповітряного середовища з високою вологістю. Навіть за умови ретельного налагодження парозволожуючого пристрою близько 93 % теплової енергії пари втрачається внаслідок вентиляційного процесу, що робить необхідним і економічно доцільним теплоутилізацію цих викидів.

Витрата технологічної пари залежить не лише від бажаного значення відносної вологості середовища в зоні ГТО, але і від геометричних характеристик пекарної камери і парозволожуючого пристрою. Ці характеристики можуть бути поєднані у вигляді комплексу – геометричного фактору V_e , який характеризує

ступінь відокремленості простору від навколишнього повітряного середовища і визначає рівень витрати пари. В камері з великим значенням V_e неможливо отримати пароповітряну суміш з параметрами, достатніми для якісного гігротермічного оброблення шляхом збільшення витрати пари.

Важливою вимогою щодо налаштування парозволожуючого пристрою є встановлення такого аеродинамічного режиму, який супроводжується мінімальним перепадом тиску по обидва боки зони ГТО, що забезпечує мінімально можливий рівень вентиляції. Це потребує ретельного налагодження витяжної системи, особливо, якщо в печі передбачена штучна вентиляція, що забезпечує організований відбір баластної пари на межі між зоною ГТО і рештою пекарної камери.

Розміщення парозволожуючого пристрою в безпосередній близькості до саджального отвору печі тягне за собою суттєве збільшення втрат теплоти через надмірну вентиляцію. Ефективним засобом протидії надмірній вентиляції є встановлення шторки на вході в пекарну камеру, нижній край якої опущений впритул до верху тістових заготованок, що рухаються конвеєром.

Для забезпечення розподілу пари за шириною печі з прийнятним значенням нерівномірності у паротрубній системі з одностороннім підведенням пари слід дотримуватися пропорції між сумарною площею перфорації і внутрішнім перерізом труб. Особливого значення це набуває для печей з великою шириною пекарної камери (3 м і більше). Для нерівномірності в межах 10%, яку можна вважати прийнятною, це співвідношення не повинно перевищувати значення 1,3 – 1,4.

Дослідження теплообміну ТЗВ з подом через контактну поверхню і тепловіддачі через незайняту поверхню поду дали змогу отримати картину кінетики теплового навантаження на канал, щоб побудувати бажаний режим підведення теплоти, такий, що відповідає раціональному режиму випікання.

Згідно з графіком на рис. 7 можна прийняти, що бажана крива теплового потоку з боку нижнього каналу за ходом конвеєра для реалізації раціонального режиму випікання практично лінійно має знижуватися від значення 5000 до 3000 Вт/м². Зазначений спадний режим підведення теплоти в тунельній печі конструктивно простіше організувати шляхом подачі теплоносія до нижнього каналу з боку місця подачі тістових заготовок і руху димових газів каналом за ходом конвеєра. Сумарна теплова потужність, передана нижнім каналом у межах зони ГТО (на ділянці, що відповідає першим 180 с від посадки тістових заготовок на під печі), у наведеному числовому прикладі має становити: $P=Q_{н.к} \cdot \Pi_{п}=41,17 \cdot 971/3600=11,1$ кВт.

Отримані результати дають більш глибоке розуміння кількісної сторони тепломасообмінних процесів у пекарній камері печі тунельного типу на початку процесу випікання, що дозволяє науково обґрунтувати деякі практичні рекомендації для проектувальників печей та експлуатаційного персоналу на хлібопекарському підприємстві.

ЛІТЕРАТУРА

1. Stenby Andresen, M., Løje, H., & Adler-Nissen, J. (2013). Experimentally supported mathematical modeling of continuous baking processes. PhD Thesis. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark (DTU). P. 200.
2. Лисовенко А.Т. Процесс выпечки и тепловые режимы в современных хлебопекарных печах. М.: Пищевая пром-сть. 1976. 214 с.
3. Десик М.Г., Теличкун В.І., Теличкун Ю.С., Германчук А.І. Дослідження впливу геометричних параметрів хліба на тепломасообмінні процеси. *Харчова промисловість*. 2012. № 12. С. 203–207.
4. Михелев А.А., Ицкович Н.М. Расчет и проектирование печей хлебопекарного и кондитерского производства : учеб. для техн. спец. вузов пищ. пром-сти, изд. 2-е перераб. и доп. М.: Пищевая пром-сть. 1968. 487 с.

5. Sommier, A., Chiron, H., Colonna, P., Della Valle, G., Rouille, J., An instrumented pilot scale oven for the study of French bread baking. *Journal of Food Engineering* 2005. Vol. 69 (1). P. 97–106.
6. Маклюков И.И., Маклюков В.И. Промышленные печи хлебопекарного и кондитерского производства. М.: Легкая и пищевая пром-сть. 1983. 272 с.
7. Le-Bail A., Leray D., Lucas T., Mariani S., Mottollese G., Jury V. Influence of the amount of steaming during baking on the kinetic of heating and on selected quality attributes of bread. *Journal of Food Engineering*. 2011. Vol. 105 (2). P. 379–385.
8. Теличкун В.И., Емельяненко Л.С., Дудко С.Д., Бережницкая Ю.С. Влияние параметров среды рабочей камеры на глянец хлебной корки. *Хлебопродукты*. 1989. № 12. С. 24–26.
9. Володарский А.В., Михелев А.А., Сигал М.Н. Современные тоннельные печи в хлебопекарной промышленности. М.: Пищевая пром-сть. 1976. 135 с.
10. Германчук А., Теличкун В., Теличкун Ю., Десик М. Исследование тепломасообменных процессов в камере гигротермической обработки тестовых заготовок. *Научни трудове на русенския университет*. 2012. Том 51, сер. 9.2. С. 44–48.
11. Германчук А.І., Теличкун Ю.С., Теличкун В.І. Вплив параметрів середовища на теплоперенесення при випіканні пшеничного хліба. Тези міжнар. наук. конф. «Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчовій промисловості» 13-17 жовтня 2014 р. Київ, НУХТ. 2014. С. 400.
12. Германчук А., Десик Н., Хоменко О., Левицкий В., Теличкун В., Теличкун Ю. Влияние относительной влажности на процесс гигротермической обработки тестовых заготовок. *Научни трудове на русенски университет “Ангел Кънчев”*. Разград. 2013. Т. 52. С. 143–147.

13. Германчук А., Хоменко О., Левицький В., Теличкун В. Вплив відносної вологості середовища пекарної камери на перебіг процесу гіротермічної обробки тістових заготовок : в кн. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті: програма і матеріали 80 міжнарод. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 10–11 квітня 2014 р. Київ, НУХТ. 2014. Ч. 2. С. 48–50.
14. Аношина О., Ковалева И. Влияние продолжительности выпечки на качество ржано-пшеничного хлеба. *Хлебопродукты*. 2009. № 5. С. 52–53.
15. Дудко С.Д., Теличкун В.И. Закономерности раздачи пара перфорированными трубами. *Пищевая промышленность*. 1988. № 11. С. 26-28.
16. Михелев А.А., Володарский А.В. Практикум по курсу «Промышленные печи хлебопекарного и кондитерского производства». М.: Пищевая пром-сть. 1974. 288 с.
17. Дудко С.Д., Лисовенко А.Т., Теличкун В.И. Естественная вентиляция рабочих камер хлебопекарных печей. *Хлебопекарная и кондитерская промышленность*. 1985, № 1. С. 24–26.
18. Дудко С.Д., Теличкун В.И. Определение живого сечения вентиляционных потоков в устье печи. *Хлебопекарная и кондитерская пром-сть*. 1986. № 6. С. 31–32.
19. Дудко С.Д., Лисовенко А.Т., Теличкун В.И. Влияние конструктивных особенностей зон увлажнения на режим гигротермической обработки. *Известия вузов. Пищевая технология*. 1983. № 1. С. 79–81.
20. Лисовенко А.Т., Володарский А.В., Кацев Б.Л. Наладка печей хлебопекарного производства. К.: Техніка. 1979. 136 с.
21. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия. 1968. 304 с.

22. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ. Справочник. М.: Атомиздат. 1979. 216 с.
23. Pulris E., Salvadori V.O. Bread baking as a moving boundary problem. Part 2: Model validation and numerical simulation. *Journal of Food Engineering*. 2009. 91(3). P. 434–442.
24. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. Изд. второе, доп. и перераб. М.: Пищевая пром-сть, 1980. 288 с.
25. Zanoni B., Peri C., Gianotti R. Determination of the Thermal Diffusivity of Bread as a Function of Porosity. *Journal of Food Engineering*. 1995. Vol. 26. P. 497–510.
26. Zheleva I., Kambourova V. Identification of heat and mass transfer processes in bread during baking. *Thermal science*. 2005. Vol. 9. No. 2. P. 73–86.
27. Zanoni, B., Pierucci, S., Peri, C., Study of the Bread Baking Process – II. Mathematical Modeling. *Journal of Food Engineering*. 1994. Vol. 23. P. 321–336.
28. O.D. Baik, M. Marcotte. Modeling the moisture diffusivity in a baking cake. *Journal of Food Engineering*. 2003. Vol. 56, issue 1. P. 27–36.