

ADVANTAGES AND PROBLEMS IN STUDYING OF MASSIVE FLOUR GOODS BAKING: LITERATURE REVIEW. PART 2: HEAT AND MASS TRANSFER IN OVEN'S BAKING CHAMBER

S. Dudko

Institute of Post-Diploma Training of the National University of Food Technologies

V. Fedorov

Uman National University of Horticulture

Key words:

*Baking process,
Mathematical model,
Massiveness of bodies,
Heating regime,
Combined heat and mass
exchange*

Article history:

Received 03.12.2019

Received in revised form
18.12.2019

Accepted 12.01.2020

Corresponding author:

S. Dudko

E-mail:

dudko_ipdo@ukr.net

ABSTRACT

Baking is one of the most complex processes in the technologies of bakery and confectionery products, that's why there is a wide variety of approaches to its study. In this paper an attempt was made to systematization of carried thermal energy researches of the baking process in order to determine the suitability of the results for creating thermal model of the baking oven. Analysis of the models of combined heat exchange in the baking chamber in the literature showed that the main amount of researches are devoted to the study of separated sides of the baking integrated process. But a large number of studies was published and the appropriate mathematical models allow to formalise not only the separate elementary processes, but also the process of baking as a whole. During baking the conductive-radiation convection regime is the most acceptable, in which more heat should flow from the bottom, first of all, during the first period. At the same time, the correlation between the components of the heat flow can vary widely without a noticeable negative impact on the products' quality. The analysis described the significant difference between the received data by various authors regarding optimum numerical values and the kinetics of heat exchange between the products and the baking chamber medium. The heat flow kinetics data interpretation and its harmonization with baking temperature regime is not always convincing enough. Thus, the literature review shows that a general model of baking process is currently not created. This indicates the feasibility of continuation both experimental research of thermo physical processes and theoretical and methodological processing of the obtained data for development of more adequate models.

ДОСЯГНЕННЯ І ПРОБЛЕМИ У ВИВЧЕННІ ПРОЦЕСУ ВИПІКАННЯ МАСИВНИХ БОРОШНЯНИХ ВИРОБІВ: ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.

ЧАСТИНА 2: ТЕПЛО І МАСОПЕРЕНОС У ПЕКАРНІЙ КАМЕРІ ПЕЧІ

С. Д. Дудко

*Інститут післядипломної освіти Національного університету
харчових технологій*

В. Г. Федоров

Уманський національний університет садівництва

Випікання є одним із найбільш складних процесів у технологіях хлібопекарських і борошняних кондитерських виробів, наслідком чого є широке розмаїття підходів до його вивчення. У статті зроблена спроба систематизації проведених теплоенергетичних досліджень процесу випікання з метою визначення придатності їх результатів для побудови теплової моделі хлібопекарської печі. Аналіз представлених у літературі моделей поєданого теплообміну в пекарній камері печі показав, що попри те, що основна кількість праць присвячена вивченню окремих сторін цього комплексного процесу, наявність великої кількості проведених досліджень і відповідних математичних моделей дає змогу скласти уявлення і формалізувати не лише окремі елементарні процеси, що були предметом вивчення, але й процес випікання в цілому. При випіканні подових хлібобулочних виробів наразі найбільш прийнятним вважається кондуктивно-радіаційно-конвективний режим, при якому більше теплоти має надходити з боку поду, насамперед протягом першого періоду. Водночас, співвідношення між складовими теплового потоку можуть коливатися у широких межах без помітного негативного впливу на якість виробів. Проведений аналіз висвітлив значне розходження даних, отриманих різними авторами щодо оптимальних чисельних значень і кінетики теплообміну між виробами та середовищем пекарної камери. Також не завжди достатньо переконливою є інтерпретація даних кінетики теплових потоків та узгодження їх з температурними режимами випікання.

Проведений огляд літератури засвідчує, що узагальненої моделі процесу випікання хлібобулочних і масивних борошняних кондитерських виробів наразі ще не створено. Це вказує на доцільність продовження як експериментальних досліджень теплофізичних процесів, так і ретельного теоретико-методичного опрацювання отриманих даних для розроблення більш адекватних моделей.

Ключові слова: процес випікання, математична модель, масивність тіл, тепловий режим, поєднана задача тепломасообміну.

Постановка проблеми. У першій частині статті [1] обґрунтований поділ усього асортименту борошняних виробів, що виготовляються шляхом випікання, на дві групи — тонких і масивних тіл за критерієм Біо, а моделі процесу випікання виробів систематизовані залежно від положення границь досліджуваної

системи. Згідно з цим підходом розглядаються три рівні: перший — моделі процесів, що відбуваються всередині тістової заготовки, що випікається (ТЗВ). На другому рівні ТЗВ розглядається як елемент пекарної камери — системи, в якій відбувається теплообмін. На третьому рівні мають бути розміщені найбільш комплексні моделі, що описують теплообмін між пекарною камерою з наявними в ній ТЗВ і нагрівною системою печі. Аналіз моделей першого рівня виконаний у першій частині статті. Моделі, що описують поєднаний тепломасообмін, є предметом розгляду другої частини.

Метою статті є вивчення можливості використання наявних літературних даних щодо кінетики тепломасообміну та значень характеристик середовища у пекарній камері для побудови на їх основі досконалих математичних моделей процесу випікання масивних борошняних виробів.

Викладення основних результатів дослідження. 2. Моделі II рівня. В ідеалі ці моделі мали б надавати повний опис поєднаного тепломасообміну — внутрішніх процесів у ТЗВ разом із взаємодією з середовищем пекарної камери печі. Однак складність цього завдання спонукає більшість дослідників обмежуватися вивченням лише окремих сторін комплексного процесу поєднаного тепломасообміну.

2.1. Температурний режим випікання. Під режимом випікання розуміють обстановку довкола ТЗВ, яка змінюється в організованому порядку протягом часу випікання τ_v , с. Для можливості узагальнення досліджуваних феноменів часто користуються відносною тривалістю $\theta = \tau / \tau_v$. Крім часових, важливими для процесу є кінетичні й термодинамічні характеристики середовища, а також форма, терморадіаційні властивості, розташування поверхонь — ТЗВ, стінок пекарної камери тощо.

Запропонований Лісовенком (1976) [2] раціональний режим випікання подового хліба масою 1,0 кг з пшеничного борошна передбачає процес у три стадії: проведення гіротермічної обробки (ГТО) в середовищі з вмістом водяної пари 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 підтримується впродовж більшої частини процесу. На третій стадії, починаючи з $\theta = 0,85$ —0,90, температура середовища має бути поступово знижена на 15—20°C задля зменшення втрат. Температура контактної поверхні (металевого поду) протягом всього процесу випікання підтримується постійною на рівні 200°C.

Вироби із житнього чи із суміші житнього і пшеничного борошна потребують інших умов. Для подових житніх і змішаних виробів так само, як для пшеничних, розглядають модель випікання у три стадії: зволоження паром, так зване «обжарювання» при високій температурі і подальше випікання при більш низькій температурі. Раціональний режим, запропонований Лісовенком для хліба українського, передбачає гіротермічну обробку до 2 хв при 120°C і відносній вологості 80%, далі обжарювання при 220°C і майже відразу за цим — плавне лінійне зниження температури до 170°C в кінці процесу випікання. Аношина і Ковальова (2009) [3] пропонують для житньо-пшеничного хліба гіротермічну обробку при температурі 110—120°C і відносній вологості 70—72%

протягом 2 хв, обжарювання при температурі 240—250°C протягом 3 хв і допікання при температурі 180—150°C. В сучасній практиці іноді температуру обжарювання піднімають до 270°C і вище.

Режим випікання формового хліба має певні відмінності. Therdtthai з колегами (2002) [4] досліджували режими випікання в закритих формах білого хліба у 4-зонній тупиковій печі. Мета дослідження полягала в тому, щоб оптимізувати процес, зменшивши упікання і мінімізувавши його тривалість шляхом підбору температур по зонах. Отриманий ними оптимум усередненої температури скоринки всередині форм становив 115, 130, 156 і 176°C для 1, 2, 3, 4 зон відповідно, тривалість випікання — 27,4 хв. Величина упікання при цьому становила близько 8%.

Важливість контролю упікання є загальноновизнаною, оскільки з його величиною пов'язана як витрата сировини та енергоресурсів, так і якісні показники готової продукції. Ovadia, Walker (1998) [5] зазначають, що зниження втрат вологи внаслідок упікання додатково призводить до більшої м'якості м'якуша хлібобулочних виробів і подовження строку зберігання виробів. Потреба у зниженні температури в кінці процесу задля зменшення упікання є актуальною і для масивних кондитерських виробів. При вироблянні формових борошняних виробів (бісквіт, кекс тощо) доцільно знижувати температуру середовища в останню чверть часу (Дорохович з колегами, 2012) [6]. Суттєвий вплив на величину упікання переважної більшості подових хлібобулочних виробів чинить середовище зони ГТО, яке також впливає і на якість кінцевого продукту.

Основні закономірності процесу гіротермічного оброблення ТЗВ були досліджені до середини 80-х років XX ст. і висвітлені у багатьох працях. За їх результатом сформувалися уявлення про оптимальні умови для процесу ГТО. Критеріями оптимізації в різних дослідженнях були: тривалість конденсації і маса конденсату, величина упікання, об'єм готових виробів, стан їх поверхні тощо. Якщо для більшості хлібних виробів з пшеничного борошна оптимальною вважаються температура 110—120°C і відносна вологість 70—80%, для булочних виробів оптимальна температура ГТО для отримання максимального блиску поверхні становить близько 140°C при тривалості процесу 70 с (Теличкун з колегами, 1989) [7]. Тривалість процесу ГТО визначається насамперед тривалістю конденсації пари, що, як правило, не перевищує трьох хвилин. Кількість конденсату на поверхні виробів за час ГТО за даними різних авторів суттєво різняться. Міхелєв, Іцкович, (1968) [8] вказують максимальне значення 230 г/м², а для отримання глянцевої скоринки, за їхніми даними, достатньо 140—160 г/м². Володарський з колегами (1976) [9] наводять значення 400 г/м², Лісовенко (1976) [1] — 20—28 г/м². Германчуком з колегами (2012) [10] отримана залежність приросту маси конденсату з часом при температурі 140°C і вологості 80%. Її інтегрування у межах від 0 до 240 с дає результат порядку 113 г конденсату на 1 м² (в статті помилково вказано 0,013 кг/м²). Для подовження періоду конденсації, уникнення раннього утворення скоринки, що може призвести до недостатнього об'єму подових виробів та появи кругового підриву бокової поверхні, має бути забезпечене інтенсивне підведення теплоти під час ГТО від поду (Лісовенко, 1976) [2], (І. Маклюков, В. Маклюков, 1983) [11].

У дослідях Германчука з колегами (2014) [12] максимальна інтенсивність теплового потоку 3400 Вт/м^2 була зафіксована на 70-й секунді при температурі середовища 110°C та відносній вологості середовища 82%. При збільшенні відносної вологості до 90% зростає тривалість конденсації вологи і кількість сконденсованої вологи, інтенсифікується прогрівання верхніх і внутрішніх шарів ТЗВ (Германчук з колегами, 2013) [13]. При температурі 125°C , яка є близькою до раціональної за Лісовенком і яку можна вважати підходящою для більшості подових виробів з пшеничного борошна, встановлена залежність зміни температури t , $^\circ\text{C}$ верхньої поверхні ТЗВ від відносної вологості ϕ , % середовища зони ГТО: $t - t_0 = 1,79\phi^{0,445} \ln \tau - 4,97$, де t_0 — початкова температура поверхні ТЗВ, τ — тривалість процесу, с (Германчук з колегами, 2014) [14].

2.2. *Види теплообміну та співвідношення між ними в пекарній камері.* У переважній більшості промислових печей при випіканні масивних виробів реалізується кондуктивно-радіаційно-конвективний режим. Передача теплоти кондукцією відбувається через нижню опорну поверхню ТЗВ від поду печі, зверху через відкриту поверхню теплообмін відбувається в результаті конденсації/випаровування води, випромінюванням від нагрітих стінок пекарної камери і конвекцією від гарячого пароповітряного середовища. Для печей, що мають значну висоту пекарної камери, слід також враховувати і випромінювання від парогазового середовища, яке може складати до 20—26% від загальної густини теплового потоку випромінюванням (Кулешов, Седелкин, 2011) [15]. Для хлібобулочних виробів бажане співвідношення між кількістю отриманої теплоти через верхню і нижню поверхні ТЗВ за весь період випікання, на думку відповідних авторів, може становити 1:1 (Міхелєв, Іцкович, 1968 [8]), 2:3 (Лісовенко, 1976 [1]), 4:5 (І. Маклюков, В. Маклюков, 1984 [11]), 7:8 (Володарський з колегами, 1986 [16]). Для раціонального режиму випікання масивних кондитерських виробів (кексів, бісквіту, мафінів, пряників) Дорохович з колегами, (2012) [6] пропонують у першій чверті процесу «подачу теплоти зменшити на 25—30% від загальної теплоти», причому 2/3 теплоти підводити до ТЗВ знизу і 1/3 — зверху. При $\theta=0,25\dots0,75$ тепловий потік має бути максимальним і симетричним, в останню чверть — зменшеним на 30%.

Krist-Spit, Sluimer (1987) [17] при випіканні хліба при постійній температурі в тунельній печі з непрямым обігрівом отримали такі дані щодо частки випромінювання у теплообміні через верхню поверхню ТЗВ: при 250°C і природній конвекції в пекарній камері — 73%, при 250°C і швидкості середовища 0,6 м/с — 64%, при 220°C і швидкості 1,5 м/с — 59%. Досліди, проведені Carvalho, Nogueira (1997) [18], показали, що при швидкості омивання ТЗВ не більше 0,6 м/с радіаційна компонента складала 57% від сумарної витрати, а при деяких комбінаціях зовнішніх умов — до 91%.

Standing (1974) [19] при випіканні бісквіту в печі з непрямым обігрівом наводить такі дані щодо розподілу за механізмом передачі теплоти: кондукцією — 20%, випромінюванням — 45%, вимушеною конвекцією — 35%. Близько половини теплоти іде на нагрівання продукту, інша половина — на випаровування. Дорохович з колегами (2012) [6] для бісквітів вказують на значення 47% теплоти, що споживається на прогрівання та покриття внутрішніх ендотермічних про-

цесів, решта — втрати з випареною вологою. Для кексів частка спожитої теплоти за їх даними становить 62%, для пряників — 65,7%. За даними Бондаренко з колегами (1977) [20] при випіканні бісквіту в металевих формах через нижню поверхню надходить 36% теплоти, через бічні поверхні — 38,5%, через верхню — 25,5%. За наявності паперової вкладки на дні форми кількість пропущеної теплоти, відповідно, перерозподіляється у співвідношенні 0,303/0,439/0,258.

Fahloul з колегами (1995) [21] досліджували випікання бісквіту в промисловій газовій печі з непрямим обігрівом пекарної камери (шість теплових зон). У результаті розрахунку тепловіддачі при вимушеній конвекції автори отримали дані про конвективну і радіаційну складові сумарного потоку. При постійній температурі в пекарній камері 200°C тепловий потік кондукцією від поду складає 11%, випромінюванням — 49% і конвекцією — 40%. При підвищенні температури в 3, 4 і 5 зонах до 230°C при тій же тривалості випікання (8 хв), відповідно, отримали 11, 55 і 34%, а при 200°C і додатковому триразовому підвищенні відбору пароповітряної суміші після 4 і 5 зон, що пришвидшило рух середовища — 10, 43 і 47%. Обчислення коефіцієнта конвективного теплообміну на верхній поверхні виробів виконували: при ламінарному режимі ($Re < 40$) $Nu = 4,5Re^{0,27}$; при турбулентному ($Re > 40$) $Nu = 0,7Re^{0,61}$, де $Re = vD/\nu$, ν — швидкість середовища; ν — коефіцієнт кінематичної в'язкості; $D = 2bh/(b+h)$ — еквівалентний діаметр, b — ширина пекарної камери, h — її висота. Металеві поверхні печі і бісквіт прийняті сірими поверхнями зі ступенем чорноти 0,9. Коефіцієнт тепловіддачі від поду був прийнятий постійним — 35 Вт м⁻²К⁻¹. Наведені криві теплового потоку мають куполоподібну форму з максимумом порядку 2200 Вт/м² при температурі в камері 200°C і 2850 Вт/м² при 250°C.

Зазначимо, що використана авторами модель з граничними умовами третього роду є занадто спрощеною. Для врахування теплообміну з подом мала б бути застосована принаймні модель четвертого роду (ідеальний контакт тіл). У той же час інтенсивне випаровування відбувається і з контактної поверхні (за даними Andersen (2013) [22] приблизно на 40% менше, ніж з відкритої). При цьому немає значення, чи ТЗВ знаходиться на суцільному поду, на перфорованій металевій стрічці, чи на плетеній дротяній стрічці (там же). Відтак найбільш придатними для математичної моделі були б граничні умови п'ятого чи шостого роду (Федорів, 1998 [23]).

Baik з колегами (1999) [24] досліджували випікання тістечок у промисловій електричній тунельній печі з чотирма тепловими зонами. Дані щодо теплового потоку отримували шляхом вимірювання температури модельного тіла — тонкого алюмінієвого диску і середовища. Розраховували радіаційну складову за законом Стефана-Больцмана і конвективну складову за формулами для вимушеного руху при $Re > 40$, що наведена в [21], і для вільної конвекції згідно з виразом: $Nu = 0,82(GrPr)^{0,2}Pr^{0,034}$. Оскільки диск є тонким тілом ($Bi < 0,02$) ефективний коефіцієнт теплообміну розраховували за формулою: $h_e = mC_p\Delta T[A(T_a - T_s)\Delta t]$, де m — маса, C_p — масова теплоємність диска, ΔT — зміна температури диска за проміжок часу Δt , A — площа диска, T_a , T_s — відповідно, температури середовища і диска. У діапазоні температур 186—225°C радіаційний потік складав 75—80% від сумарного теплового потоку.

Проведений огляд літератури демонструє переважне значення радіаційної складової в радіаційно-конвективному теплообміні, що є характерним для більшості сучасних печей. Інфрачервоне випромінювання чинить позитивний вплив на ТЗВ, зокрема призводить до зменшення втрати маси і збільшення об'єму виробів (Skjöldebrand з колегами, 1988 [26]). До переваг радіаційного теплообміну Dessev з колегами (2011) [27] відносять миттєвий дистанційний вплив на продукт, високу енергетичну інтенсивність, більшу простоту організації порівняно з конвективним способом, відносну легкість управління тепловим потоком; готова продукція під впливом ІЧ випромінювання має покращені показники: більший питомий об'єм, тоншу скоринку і краще розвинену пористу структуру м'якуша при зменшенні втрат від упікання.

Короткохвильове ІЧ випромінювання, як вважається, дає змогу передати більшу питому потужність, оскільки проникає глибше, ніж довгохвильове. Водночас перевищення інтенсивності короткохвильового ІЧ опромінення понад певне значення може призвести до зменшення питомого об'єму виробів, провоює надмірну втрату маси, збільшує загальну різницю в кольоровому забарвленні скоринки і погіршує зовнішній вид виробу (Dessev з колегами, 2011) [26]. До того ж ступінь відбивання коротших хвиль більший, ніж у довгих, насамперед у випадку білої поверхні (там же). Skjöldebrand з колегами (1988) [25] визначили, що при занадто високому рівні ІЧ випромінювання в короткохвильовому діапазоні можлива поява білих плям на поверхні ТЗВ відповідно до місць, де не відбулася клейстеризація крохмалю, а також нерівномірні шпаруватість і поява великих пор у м'якушці.

Новим кроком у технології хлібопечення можна вважати впровадження на початку XXI ст. STIR-технології (Selected Transformed Infrared Radiation), яка полягає у застосуванні як випромінювача ІЧ хвиль спеціального керамічного покриття, що наноситься на верхню теплообмінну стінку пекарної камери. Експериментальне дослідження STIR-технології було виконано Брязуном з колегами (2009) [27]. Згідно з гіпотезою STIR-технологія створює подвійний ефект: за рахунок вищого ступеня чорноти керамічного покриття активізується радіаційний теплообмін у пекарній камері; енергія селективно трансформованого ІЧ випромінювання у ближньому та середньому діапазоні інтенсивно поглинається молекулами води, що знаходяться в поверхневому шарі ТЗВ. За рахунок цього молекули активізуються, що призводить до збільшення ефективного коефіцієнта теплопровідності тіста-хліба. В досліді скоротилася тривалість випікання (момент переходу тіста у м'якуш настав на 2 хв раніше, порівняно з еталонним зразком), проте скоринка стала вдвічі товщою і більш насиченого забарвлення. Майже однакові результати щодо якісних показників (формуотримувальна здатність, питомий об'єм, товщина і забарвлення верхньої скоринки) досягнуті при скороченні тривалості випікання з 23 до 20 хв. Величина упікання зменшилася на 1,4%, також відбулося зменшення питомої витрати теплоти на випікання до 1% (на 40—45 кДж/кг).

Головною перевагою конвективного теплообміну є отримання рівномірного забарвлення скоринки по всій поверхні виробів. Враховуючи велику різноманітність конструкцій печей і режимів випікання виробів, а також різницю в мето-

дах обчислення коефіцієнта конвективного теплообміну літературні дані щодо його значень варіюють у широкому діапазоні. Baik з колегами (1999) [24] звертають увагу на критичну залежність значень коефіцієнта теплообміну від коректності фіксації різниці температур між поверхнею ТЗВ і середовищем. Дослідники визначили, що в умовах природної конвекції товщина температурного межового шару над плоскою поверхнею ТЗВ становить близько 50 мм, що слід враховувати при використанні показів датчиків температури. Максимальні значення коефіцієнта конвективного теплообміну становлять: 3,55 Вт м⁻² К⁻¹ (Михелєв, Іцкович, 1968), 5,3 Вт м⁻² К⁻¹ (І. Маклюков, В. Маклюков, 1983), 5,42 Вт м⁻² К⁻¹ (Володарський з колегами, 1986). В англомовних джерелах застосовують моделі Rohsenow з колегами (1998) [28], що для умов випікання хлібобулочних виробів у промисловій печі дає розрахункове значення близько 10 Вт м⁻² К⁻¹ (Zhang, Datta (2006) [29], Šheruga з колегами (2007) [30], Sakin з колегами (2007) [31].

У більшості обчислень використовують приведений коефіцієнт теплообміну, що враховує як конвективну, так і радіаційну складові (Sani з колегами, 2014 [32]). При швидкості повітря в пекарній камері у межах 1,5—2,5 м/с Monteau, (2008) [33] вказує на 14 Вт м⁻² К⁻¹. За умов природної конвекції Sakin з колегами (2007) [31] при випіканні бісквіту і тістечок наводить значення 16—21 Вт м⁻² К⁻¹, Sato з колегами (1987) [34] — значення 21 Вт м⁻² К⁻¹ при швидкості повітря до 2 м/с, Shibukawa з колегами (1989) [35] зазначають 29 Вт м⁻² К⁻¹. Baik з колегами (1999) [24] отримали значення в межах 20—48 Вт м⁻² К⁻¹, а для розрахунку приведенного коефіцієнта теплообміну h_t у діапазоні температур $t=186—225^{\circ}\text{C}$ при відносній швидкості повітря $v=0,02—0,437$ м/с пропонується формула: $h_t=0,0887t+61,4v$, Вт м⁻² К⁻¹.

Останнім часом набули популярності печі, що в англомовному середовищі відомі під назвою «jet impingement ovens». З урахуванням фізичної сутності їх можна назвати печами ударно-струменевої дії. В них реалізується теплообмін за примусової конвекції (понад 90% переданого тепла): теплоносієм є гаряче повітря або димові гази, що спрямовуються на ТЗВ через круглі або щілинні сопла, розташовані над ними. Ударно-струменеві печі часто використовують при виробленні нарізаного запакованого формового хліба для сандвічів, який випікають у закритих формах. Турбулентне середовище дає змогу отримувати вироби з практично однаковим забарвленням скоринки з усіх боків і скоротити тривалість процесу. Відповідно до даних Paton (2013) [36] ці печі можуть забезпечити збільшення коефіцієнта теплообміну від традиційних 10 Вт м⁻² К⁻¹ до 35 Вт м⁻² К⁻¹, що за рахунок зменшення температури теплоносія може економити до 5% приведеної, з урахуванням різних її видів, енергії.

2.3. Теплові потоки у пекарній камері. Для радіаційно-конвективного режиму, за якого переважно випікають хлібобулочні вироби, температура середовища не є параметром, що повно характеризує інтенсивність теплообміну. Попри наявність сильного позитивного кореляційного зв'язку між температурою поверхні ТЗВ і тепловим потоком (Dessev з колегами, 2011) [26], саме тепловий потік виглядає більш зручним інструментом для інтегральної оцінки умов теплообміну в пекарній камері, а отже, і більш придатним для цілей моделювання тепло-

масообмінних процесів (Шубенко, 1980 [37]), Теличкун з колегами, 1989 [38], (Carvalho i Nogueira, 1997 [18]), (Van Son M., 2001 [39]), (Sakin з колегами, 2009 [31]).

Therdthai i Zhou, (2003) [40] висловлюють думку щодо більшої плідності розгляду теплообміну при граничних умовах другого, а не третього роду. Розподіл теплового потоку уздовж пекарної камери водночас є зручним засобом для виконання діагностики печі (Федоров, 1974) [41]. Крім того, існує міцна кореляція між величиною теплового потоку і величиною упікання, кольором скоринки (Fahloul з колегами (1995) [21]), глянцем поверхні (Теличкун з колегами, 1989 [7]), що дає можливість оцінювати як кількісні, так і якісні показники процесу.

При аналізі процесу випікання розрізняють складові сумарної густини теплового потоку: кондуктивна, конвективна, радіаційна та масообмінна. З іншого боку, при математичному описі прогрівання ТЗВ зручно розглядати тепловий потік як суму потоків, що відповідають елементарним процесам, мають різну природу і рушійні сили. Тому на практиці часто оперують такими визначеннями, як підведений до поверхні ТЗВ тепловий потік (він же сумарний) Σq , відбитий від поверхні q_b , сприйнятий (пропущений) q_{cp} , і поглинутий q_{np} . Між ними існують такі взаємозв'язки: $\Sigma q = q_b + q_{cp}$; $q_b = (1 - \epsilon) \Sigma q$ (ϵ — ступінь чорноти поверхні), $q_{cp} = q_{np} + q_{mo} + q_{fx}$, де $q_{np} \sim c \Delta t$ ($c \Delta t$ — зміна ентальпії тіста-хліба); q_{mo} — масообмінна складова теплового потоку, яка може змінювати знак залежно від напрямку вектора масопереносу; q_{fx} — частка теплового потоку, що витрачається на покриття фізико-хімічних процесів у тісті-хлібі.

Childs з колегами (1999) [42] виділяють чотири методи визначення величини теплового потоку: перепаду температур, калориметричний, балансовий (підведення/відведення енергії) та масообмінної аналогії. Найбільш придатним для вивчення процесу випікання є перший з названих. Він набув розвитку значною мірою завдяки працям О. Геращенка та В. Федорова у галузі теплофізики і метрології, у яких закладено наукові основи і розроблено цілий клас шаруватих мікродатчиків-тепломірів. У діапазоні температур 30—160°C похибка вимірювання теплового потоку датчиком не перевищує 3%, а при вимірюванні окремих складових теплового потоку — 10%.

За результатами досліджень процесу випікання тістечок в електropечі Baik з колегами (1999) [24] побудовані криві теплового потоку для двох режимів випікання двох різних виробів. Для першого режиму (тривалість випікання 8 хв 36 с) тепловий потік має максимум 6300 Вт/м² при $\theta=0,16$, швидке зниження до 2500 Вт/м² при $\theta=0,36$, далі повільне плавне зниження до 1503 Вт/м² у кінці процесу. Для другого режиму (6 хв 27 с) має місце максимум 7550 Вт/м² при тій же відносній тривалості, потім майже лінійне зниження до 1570 Вт/м² при $\theta=0,64$ і плавне підвищення до 1950 Вт/м² в кінці випікання.

Доломакін з колегами (2012) [43] встановлювали тепломіри (шаруваті мікродатчики) на верхню поверхню ТЗВ при дослідженні випікання булочки дні-провської масою 60 г у конвективній печі з рециркуляцією пароповітряного середовища при температурі 200°C і швидкості 5 м/с. Отримані залежності теплового потоку для першого періоду випікання у вигляді $q=2480 t^{0,1}$, Вт/м², для

другого $q=30200 \text{ t}^{-0,45}$, Вт/м². Пік кривої теплового потоку (3800 Вт/м²) спостерігався при $\theta=0,125$. За час випікання $t=600$ с значення середнього теплового потоку склало 2423 Вт/м².

Лісовенком [1] при обґрунтуванні раціонального режиму випікання подового пшеничного хліба шаруваті мікродатчики теплового потоку встановлювались між подом і нижньою поверхнею ТЗВ та на відкритій поверхні. Для нижньої поверхні, що у момент посадки тістової заготовки мала температуру 200°C, зафіксований найбільший за весь час випікання тепловий потік порядку 10000 Вт/м². Далі за рахунок вирівнювання температурного поля ТЗВ поблизу контактної поверхні крива теплового потоку різко прямує донизу. У діапазоні значень $\theta=0,125\text{—}0,175$ датчик фіксує майже постійний тепловий потік порядку 5300...5200 Вт/м². З поступовим перетворенням тіста у скоринку, що супроводжується зменшенням теплопровідності, тепловий потік зменшується до кінця випікання до значення 2000 Вт/м².

Теплообмін на відкритій поверхні ТЗВ є значно складнішим. На початку процесу вільна поверхня ТЗВ є вологою, причому до $\theta=0,15$ на ній відбувається конденсація пари з виділенням теплоти фазового переходу, внаслідок чого стрімко зростає її температура. Приблизно через 1,5 хв після посадки у піч ($\theta=0,047$) фіксується максимум теплового потоку 9600 Вт/м². Далі до моменту $\theta=0,18$ крива густини теплового потоку різко знижується до позначки 3250 Вт/м², після чого іде вгору. При $\theta=0,32$ тепловий потік досягає локального максимуму близько 4950 Вт/м². Далі крива плавно знижується до значення 1200 Вт/м² у кінці процесу. Зауважимо, що значення другого максимуму відповідає діапазону 4600—5200 Вт м⁻² К⁻¹, визначеному Теличкуном з колегами, (1989) [7], як необхідна умова для досягнення найбільшого глянцевої верхньої поверхні. Цей факт є одним із підтверджень обґрунтованості раціонального режиму випікання за Лісовенком.

Перебуванням відповідної поверхні шаруватого датчика у зоні кипіння води, а не конденсації, як помилково вважають Ковальов з колегами (1999) [44], можливо пояснити і зафіксований ними феномен коливання кривих теплового потоку в проміжку часу $\theta=0,2\text{—}0,5$ усередині ТЗВ на глибині 0,5; 1,0 і 3,0 мм, що мав місце за таких значень температури відповідного шару: 85—90°C — пік, 105—110°C — западина і близько 120°C — другий пік.

Подібне коливання теплового потоку з боку нижньої поверхні і менш виражене — зі сторони бокових поверхонь спостерігали Бондаренко з колегами (1977) [20] при випіканні бісквіту при радіаційно-конвективному режимі і постійній температурі 165—170°C. Тепловий потік знизу після максимального значення порядку 3000 Вт/м² на початку процесу стрімко падає до 1950 Вт/м² у момент $\theta=0,15$. У проміжку часу $\theta=0,15\text{—}0,19$ темп прогрівання нижньої і верхньої граней шаруватого датчика стає однаковим, про що свідчить горизонтальна ділянка кривої, за рахунок витрати теплоти на ендотермічні процеси. Після їх завершення спад кривої продовжується до $\theta=0,42$, коли має місце локальний мінімум 1400 Вт/м². У цей час шар тіста над датчиком прогрівається понад 80°C, у результаті чого інтенсифікується внутрішній масоперенос термовологопровідністю, що спричиняє зростання теплового потоку до 1700 Вт/м² (локальний

максимум). З моменту $\theta=0,54$ утворюється скоринка і тепловий потік надалі знижується. Крива сумарного теплового потоку через верхню поверхню бісквіту плавно знижується протягом випікання від початкового значення близько 2000 Вт/м^2 .

Фіксуючи існуюче різноманіття температурних режимів, чисельних значень і кінетики теплових потоків у різних авторів, заслуговує на увагу думка Pierrel, Newborough (2003), [45] щодо можливості отримання якісного продукту при множинності варіантів кінетики теплового потоку. Для кожного моменту процесу існують допустимі максимальний і мінімальний рівні теплового потоку певного виду (радіаційного, конвективного, кондуктивного, масообмінного); вихід за ці межі не дасть змоги отримати продукцію прийнятної якості.

Висновки

1. Серед розглянутих праць лише невелика частина присвячена вивченню поєднаного тепломасообміну, в той час як у більшості випадків предметом досліджень є умови тільки зовнішнього обміну.

2. Існує певний консенсус щодо бажаного режиму випікання масивних виробів, при якому більше теплоти має надходити з боку нижньої поверхні, насамперед у першому періоді. При цьому співвідношення між тепловими потоками за напрямками «верх/низ», а також між радіаційною, конвективною і кондуктивною складовими можуть коливатися у широких межах, так само, як співвідношення між статтями витрат підведеної теплоти.

3. У літературі наявні дані щодо кінетики теплового потоку при випіканні широкого асортименту виробів. У ряді однотипних випадків дані чисельно відрізняються на 100% і більше. Найбільшої довіри, на нашу думку, заслуговують експериментальні результати із застосуванням мініатюрних шаруватих датчиків, встановлених безпосередньо на поверхні ТЗВ. З певними застереженнями ці дані можуть бути покладені в основу розрахункових моделей процесу випікання.

4. Аналіз інтерпретацій авторами особливих точок на графіках густини теплового потоку вказує на недостатню опрацьованість питання щодо сутності теплофізичних процесів у тісті-хлібі та метрологічних особливостей вимірювальних засобів. Це питання має стати предметом подальшого поглибленого дослідження.

Література

1. Дудко С. Д. Досягнення і проблеми у вивченні процесу випікання масивних борошнених виробів: огляд літератури. Частина 1: внутрішній тепломасообмін у тісті-хлібі. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2019. Т. 25, № 3. С. 174—186.
2. Лисовенко А. Т. Процесс выпечки и тепловые режимы в современных хлебопекарных печах. М.: Пищевая пром-сть, 1976. 214 с.
3. Аношина О., Ковалева И. Влияние продолжительности выпечки на качество ржанопшеничного хлеба. *Хлебопродукты*. 2009. № 5. С. 52—53.
4. Therdthai N., Zhou W., Adamczak T. Optimisation of the temperature profile in bread baking. *J. food engineering*. 2002. Vol. 55. Issue 1. P. 41—48.
5. Ovadia D. Z., Walker C. E. Impingement in Food Processing. *Food Technology*. 1998. 52(4). P. 46—50.

6. Дорохович А. Н., Дорохович В. В., Теличкун В. И., Ташева С., Вълчев Г. Обоснование режима выпечки мучных кондитерских изделий. *Хранителна наука, техника и технологии 2012: научни трудове на УХТ*. 2012. Т. 59. С. 785—790.
7. 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.
8. Михелев А. А., Ицкович Н. М. Расчет и проектирование печей хлебопекарного и кондитерского производства: учебник для техн. спец. вузов пищевой пром-сти. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Пищевая пром-сть. 1968. 487 с.
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, серия 9.2. С. 44—48.
11. Маклюков И. И., Маклюков В. И. Промышленные печи хлебопекарного и кондитерского производства. М.: Легкая и пищевая пром-сть. 1983. 271 с.
12. Германчук А. И., Теличкун Ю. С., Теличкун В. И. Вплив параметрів середовища на теплоперенесення при випіканні пшеничного хліба. Тези міжнарод. наук. конф. «Нові ідеї в харчовій науці — нові продукти харчовій промисловості» 13—17 жовтня 2014 р. Київ, НУХТ. 2014. С. 400.
13. Германчук А., Десик Н., Хоменко О., Левицький 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.
14. Германчук А., Хоменко О., Левицький В., Теличкун В. Вплив відносної вологості середовища пекарної камери на перебіг процесу гігротермічної обробки тістових заготовок. В кн. Наукові здобутки молоді — вирішення проблем харчування людства у XXI 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.
15. Кулешов О. Ю., Седелкин В. М. Анализ характеристик сложного теплообмена в промышленных хлебопекарных печах в зависимости от конструктивных и режимных параметров. *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2011. № 4 (60). Вып. 2. С. 161—165.
16. Володарский А. В., Сигал М. Н., Ничиков И. М. Промышленные печи пищевых производств. К.: Техніка. 1986. 136 с.
17. Krist-Spit C. E., Sluimer P. Heat transfer in ovens during the baking of bread. In: *Cereals in a European Context, 1st European Conference on Food Sci. & Tech.* Morton, I. D. (Ed.), 1987. P. 346—354.
18. Carvalho M. G., Nogueira M. Improvement of Energy Efficiency in Glass-Melting Furnaces, Cement Kilns and Baking Ovens. *Applied Thermal Engineering*. 1997. 17(8—10). P. 921—933.
19. Standing C. Individual heat transfer modes in band oven biscuit baking. *J. Food Sci.*, 1974. 39. P. 267—271.
20. Бондаренко Е. Г., Дорохович А. Н., Декуша Л. В., Федоров В. Г., Михелев А. А. Кинетика теплопритоков при выпечке бисквитного полуфабриката. *Пищевая технология*. 1977. № 3. С. 81—84.
21. Fahloul D., Trystram G., McFarlane I., Duquenoy A. Measurements and Predictive Modelling of Heat Fluxes in Continuous Baking Ovens. *J. Food Engineering*. 1995. 26. P. 469—479.
22. Stenby Andresen M., Løje H., Adler-Nissen J. Experimentally supported mathematical modeling of continuous baking processes. PhD Thesis. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark (DTU). 2013. P. 200.
23. Федорів В. Г. Тепломасообмін: конспект лекцій. К.: УДУХТ. 1998. 84 с.
24. Baik O. D., Grabowski S., Trigui M., Marcotte M., Castaigne F. Heat transfer coefficients on cakes in a tunnel type industrial oven. / *J. Food Sci.* 1999. Vol. 64, No. 4. P. 688—694.
25. Skjöldebrand C., Ellbjär C., Anderson C. G., Eriksson T. Optical properties of bread in the near infrared range. *J. Food Engineering*. 1988. 8. P. 129—139.

26. Dessev T., Jury V., Le-Bail A. The effect of moisture content on short infrared absorptivity of bread dough. *J. Food Engineering*. 2011. 104. P. 571—576.
27. Брызун В. А., Аднодворцев М. Ф., Йон П. Эффективность применения STIR-технологии для выпечки пшеничных хлебобулочных изделий. *Хлебопечение России*. 2009. № 2. С. 22—25.
28. Handbook of heat transfer / editors, W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, Y. I. Cho. 3rd ed. 1998. 1484 p.
29. Zhang J., Datta A. K. Mathematical Modeling of Bread Baking Process. *J. Food Engineering*. 2006. 75(1), P. 78—89.
30. Šeruga B., Budžaki S., Ugarčić-Hardi Ž. Individual Heat Transfer Modes During Baking of “Mlinici” Dough. *Agriculturae Conspectus Scientificus*. 2007. 72(3). P. 257—263.
31. Sakin M., Kaymak-Ertekin F., Ilicali C. Convection and radiation combined surface heat transfer coefficient in baking ovens. *J. Food Engineering*. 2009. 94. P. 344—349.
32. Sani N., Taip S., Kamal S. M. M., Ab. Aziz, N. Effects of temperature and airflow on volume development during baking and its influence on quality of cake. *J. Engineering Science and Technology*. 2014. Vol. 9, No. 3. P. 303—313.
33. Monteau J. Y. Estimation of Thermal Conductivity of Sandwich Bread Using an Inverse Method. *J. Food Engineering*. 2008. 85(1), P. 132—140.
34. Sato H., Matsumura T., Shibukawa S. Apparent Heat Transfer in a Forced Convection Oven and Properties of Baked Food. *J. Food Science*. 1987. 52(1), P. 185—193.
35. Shibukawa S., Sugiyama K. Yano T. Effects of Heat Transfer by Radiation and Convection on Browning of Cookies at Baking. *J. Food Science*. 1989. 54(3), P. 621—624.
36. Paton J. B. Energy utilisation in commercial bread baking. PhD Thesis. The University of Leeds. School of Mechanical Engineering. 2013. P. 181.
37. Шубенко Б. П. Теплометрическое исследование тоннельных хлебопекарных печей с целью их совершенствования: автореф. дисс. канд. техн. наук. К.: 1980. 24 с.
38. Способ управления тепловым режимом выпечки в хлебопекарной печи. А.с. СССР № 1517885: МКИ А 21 В 1/08. / Теличкун В. И., Ковалев А. В., Дудко С. Д., Пивень Е. Н., Тетеркина О. В.; заявл. 18.02.88; опубл. 30.10.89, Бюл. № 40.
39. Van Son M. Flux future. *Asia-Pacific Baker*, 2001. August. P. 16—22.
40. Therdthai N., Zhou W. Recent Advances in the Studies of Bread Baking Process and Their Impacts on the Bread Baking Technology / *Food Sci. Technol. Res.*, 2003. 9(3). P. 219—226.
41. Федоров В. Г. Теплометрия в пищевой промышленности. М.: Пищевая промышленность. 1974. 174 с.
42. Childs P. R. N., Greenwood J. R., Long C. A. Heat Flux Measurement Techniques. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C. 1999. 213(7), P. 655—677.
43. Доломакин Ю. Ю., Ковалев А. В., Глуздань А. А., Федоров В. М. Теплопоглощение тестовой заготовкой в процессе выпечки в конвективных хлебопекарных печах. *Ukrainian Food Journal*. 2012. № 2. С. 84—87.
44. Ковальов О. В., Теличкун В. І., Олійник Н. В. Теплопоглинання в процесі випікання хліба. *Харчова і переробна пром-ть*. 1999. № 5—6. С. 19.
45. Pierrel F., Newborough, M. Heat flux maps for ovens: baking comfort zones. In Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Conference. Washington, D.C., USA. 2003.