УДК 664.655

ADVANTAGES AND PROBLEMS IN STUDYING OF MASSIVE FLOUR GOODS BAKING: LITERATURE REVIEW. PART 1: INTERNAL HEAT AND MASS TRANSFER WITHIN DOUGH-BREAD

S. Dudko
Institute of Post-Diploma Training of the National University of Food Technologies

Key words:
Baking process
Mathematical model
Massiveness of the bodies
Heat and mass transfer
Dough-bread
Thermal physical properties

Article history:
Received 22.05.2019
Received in revised form 07.06.2019
Accepted 19.06.2019

Corresponding author:
S. Dudko
E-mail:
npnuht@ukr.net

ABSTRACT

Bread baking is a complex process that is engaged by many hundreds of researchers around the world. This interest is caused by the fact that baking as a technological operation requires much more energy consumption in comparison with other ones and, at the same time, it is the defining way affects business profit and consumers properties of the final product: the shape appearance, taste, smell, etc. To date, an extensive array of experimental data was accumulated, which requires appropriate systematization, analysis and evaluation of the various methods, tools, and sometimes — also the alternative results interpretation. At the same time, the same trick should be done with the numerous mathematical models of baking process.

The analysis found the discrepancy in the mathematical models construction between "Eastern" and "Western" scientific approaches. Despite the presentation of the importance of mass transition influence on heat transfer these two approaches have different evaluation of the moisture flow driving forces. In addition, they are characterized by different depth of the similarity theory methodology application. In English literature, usually, heat moisture conductivity phenomenon is not taken into account; at the same time, computer methods are more applied for solving differential equations for heat and mass transfer modelling, but not using of the theory of similarity tricks. The result of the work with the review and analysis of relevant literature has to contribute to a better understanding of dough-bread as the object of further research, correct using of data obtained by predecessors to develop improved models. This paper will also be useful for identifying areas of further research to reduce the energy consumption and make better quality of baked goods.

DOI: 10.24263/2225-2924-2019-25-3-21

ДОСЯГНЕННЯ І ПРОБЛЕМИ У ВИВЧЕННІ ПРОЦЕСУ ВИПІКАННЯ МАСИВНИХ БОРОШНЯНИХ ВИРОБІВ: ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. ЧАСТИНА 1: ВНУТРІШНІЙ ТЕПЛОМАСООБМІН У ТІСТІ-ХЛІБІ

С. Д. Дудко
Інститут післядипломної освіти Національного університету харчових технологій

Випікання є комплексним процесом, до вивчення якого долучалося велика кількість дослідників в усьому світі. Така увага викликана тим, що випікання, як технологічна операція, є найбільш енерговитратною порівняно з іншими і, водночас, вона визначальним чином впливає на економічні показники та споживчі властивості готового продукту: зовнішній вигляд, смак, запах тощо. На сьогодні накопичений великий масив експериментального матеріалу, який потребує відповідної систематизації, аналізу й оцінки різноманітних методик, інструментарію, а іноді — й альтернативної інтерпретації результатів. Так само потрібно вчинити з багатьма розробленими математичними моделями процесу випікання.

Проведений аналіз виявив розбіжність у побудові математичних моделей між умовно «східним» і «західним» науковими підходами. Попри констатацію важливості впливу масообміну на теплообмін, ці два підходи порізному оцінюють рушійні сили течії вологи. Крім того, для цих двох підходів характерна різна глибина застосування методології теорії подібності. В англомовній літературі, зазвичай, такий феномен, як термовологопровідність не враховується. Водночас при моделюванні тепломасообміну більше покладаються на комп'ютерні методи розв'язання диференційних рівнянь, а не на прийоми теорії подібності. Результат виконаної роботи з огляду й аналізу відповідної літератури має сприяти кращому розумінню тіста-хліба як об'єкта подальших досліджень, коректному використанню отриманих попередниками даних для розроблення більш досконалих моделей. Також дослідження буде корисним для окреслення напрямів подальшого пошуку умов, за яких можливо скоротити витрату енергетичних та інших ресурсів під час випікання і поліпшити якісні показники продукції.

Ключові слова: *процес випікання, математична модель, масивність тіл, тепломасообмін, тісто-хліб, теплофізичні характеристики.*

Постановка проблеми. Промислове випікання хліба, булочних та інших виробів з вибродженого тіста, що розпочалося на початку минулого століття, і тоді, і зараз потребує відповідного наукового забезпечення. Складність дослідження процесу випікання полягає в тому, що при нагріванні шматка тіста у ньому відбувається ціла низка елементарних процесів різної природи (фізичних, хімічних, біохімічних, мікробіологічних тощо), які чинять кількісний і якісний вплив на перебіг один одного. Під час перебування в печі під

впливом зовні спрямованої теплоти продукт перетворюється з однорідного шматка тіста у тверде тіло складної структури.

Як відомо, існує принципова різниця щодо умов прогрівання для тонких і масивних тіл. Поділ тіл на групи за ознакою масивності проводять відповідно до значення числа Біо (Ві), яке показує співвідношення інтенсивності зовнішнього і внутрішнього теплообміну. При Ві<0,25 тіло вважають тонким, при Ві>0,5 — масивним, а в діапазоні значень 0,25…0,5 тіла перебувають у перехідній області. При прогріванні масивних тіл обмежувальним чинником є темп відведення теплоти від поверхні вглиб тіла, що пов'язаний з теплопровідністю матеріалу. Для тонких тіл швидкість прогрівання визначається можливістю забезпечення зовнішнього теплообміну тіла із середовищем. Тривалість прогрівання залежно від характеристик, пов'язаних з числом Біо має вигляд (Будрін і Назаров, 1933) [1]:

$$\tau = \frac{R_{\text{екв}}^2}{a_{\text{екв}}\delta^2}\ln\left(\frac{M}{\Theta}\right),$$

де Θ — безрозмірна температура; M, δ^2 — табличні коефіцієнти залежні від значення Ві; $R_{\text{екв}}$, $a_{\text{екв}}$ — еквівалентні значення характерного радіуса і температуропровідності тіла.

У практиці процесу випікання до масивних тіл відносять хлібні, хлібобулочні, булочні вироби, до тонких — вафлі, печиво, крекер, соломку, а до тих, що складають проміжну групу, — баранкові вироби, сушку, хлібні палички, бісквітні заготовки для тортів і тістечок, деякі види національних кавказьких, азійських виробів тощо. Відповідно, теплові режими при випіканні виробів, що належать до різних груп, суттєво різняться. Під тепловим режимом випікання нині, зазвичай, розуміють сукупність термодинамічних (зокрема, теплових, температурних) та інших параметрів середовища, які змінюються відповідним чином під час перебування виробів у печі. У цьому огляді основна увага приділяється групі масивних борошняних виробів.

Мета дослідження: проаналізувати з позицій сучасних наукових уявлень наведені в літературі результати досліджень перебігу тепломасообмінних процесів при випіканні масивних борошняних виробів та систематизувати наявні дані; на основі проведеного аналізу й узагальнень обґрунтувати характер розподілу і значення теплових потоків у робочій камері печі при раціональному режимі випікання.

Викладення основних результатів дослідження. Поняття раціонального режиму введене в обіг О. Т. Лісовенком (1976) [2]. Цей режим передбачає такий перебіг процесу випікання, при якому досягається найбільш ефективне, раціональне поєднання окремих процесів і утворюється найкраща комбінація якісних показників виробу, що випікається.

Для зручності аналізування великої кількості наявної наукової літератури, присвяченої процесу випікання, доцільно класифікувати наведені дані за певними ознаками. Кожна математична, фізична модель, що служить для вивчення явищ і процесів, насамперед встановлює границі досліджуваної системи. На нашу думку, межі систем, визначені цими границями, можливо використати як критерій для поділу множини наявних моделей на три рівні (рис. 1).

На першому рівні знаходяться моделі, що описують переважно внутрішні процеси розповсюдження теплоти в середині тістових заготовок, які випікаються (ТЗВ), границя системи збігається з поверхнею ТЗВ або проходить у безпосередній близькості від неї. На другому рівні розташовуються моделі, що відтворюють не лише внутрішні процеси, але також взаємодію ТЗВ із середовищем пекарної камери (поєднаний теплообмін). Границі систем другого рівня охоплюють ТЗВ разом з опорною поверхнею (подом), парогазове середовище, а для деяких моделей також і огородження пекарної камери. На цьому рівні в досліджуваній системі ТЗВ стає одним із її елементів, який, у свою чергу, чинить вплив на середовище, тому на рис. 1 зв'язок між ТЗВ та середовищем пекарної камери зображений двостороннім. Масивні вироби переважно випікають у печах з непрямим обігрівом, тому на третьому рівні ієрархії додається ще один елемент системи — теплоносій, що рухається поза межами пекарної камери. Цей елемент, зазвичай, узагальнюють терміном «нагрівна система печі».

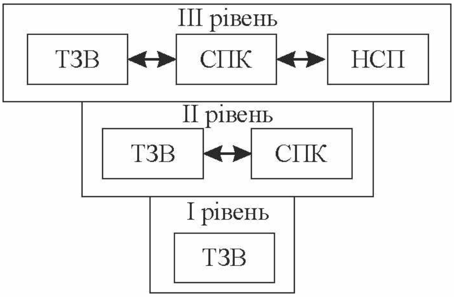

Рис. 1. Ієрархія систем, покладених в основу класифікації моделей процесу випікання: ТЗВ — тістова заготовка, що випікається; СПК — середовище пекарної камери; НСП — нагрівна система печі

1. Моделі I рівня. Моделі, що їх можна віднести до першого рівня, складають чи не найчисленнішу групу. У рамках цієї групи можна окремо виділити моделі, якими послуговувалися при дослідженнях теплофізичних характеристик (ТФХ) тіста, тіста-хліба, м'якуша і скоринки готового хліба. З них, власне, історично і розпочалося наукове дослідження багатопланового процесу випікання. Такими характеристиками є теплопровідність, температуропровідність, питома теплоємність, оптичні властивості поверхні виробу тощо. Також важливими фізичними властивостями, що впливають на теплові характеристики, є, зокрема, густина (шпаруватість), вологовміст, а також якісна і кількісна характеристика пор ТЗВ. Достатньо велика кількість досліджень на цю тему викликана, з одного боку, необхідністю вивчення значного розмаїття асортименту з різним складом (рецептурою) тіста, а з другого — складністю самого завдання. Складність визначається тим фактом, що значення ТФХ залежать від температури, від вологовмісту і форм зв'язку вологи з матеріалом, тобто змінюються (до того ж нелінійно) під час випікання. Вирішення цієї проблеми ускладнене через недостатню точність експериментальних вимірювань, попри наявність великого розмаїття методів досліджень, а також через малу кількість робіт методичного характеру з узагальненням експериментальних даних.

1.1. Теплофізичні характеристики тіста-хліба. Наразі можна відзначити два підходи до опису процесу теплопереносу в капілярно-пористому тілі, згідно з якими визначають ТФХ: один з них полягає у використанні багатофазної моделі теплопровідності, другий — в оперуванні так званими «ефективними» значеннями ТФХ, що встановлюються на основі експериментальних досліджень. Вагомий внесок у вивчення ТФХ зробили Гінзбург (1980) [3], Лісовенко (1976) [2], які розвинули обидва підходи, чим створили основу для подальших досліджень на пострадянському просторі. Важливе для вивчення теплообміну питання про оптичні та терморадіаційні характеристики поверхні ТЗВ досліджували Ільясов та Красніков (1972) [4]. Ґрунтовний огляд праць, присвячених проблематиці вивчення ТФХ в англомовному науковому просторі, детально представлений у праці Rask (1989) [5].

Серед більш пізніх праць на цю тему в англомовному сегменті варто відзначити статті Pulris & Salvadori, (2009, а, б) [6; 7]. Автори розробили підхід, який назвали «проблема рухливих зв'язків». Підхід формулюється з огляду на фізику процесу прогрівання ТЗВ, що супроводжується кипінням води, коли ентальпія стрибкоподібно змінюється відповідно до зміни фази, що в математичній моделі відображається уведенням еквівалентних ТФХ. Питома теплоємність тіста-хліба і скоринки представлена у вигляді еквівалентної теплоємності вологого матеріалу з урахуванням води у відповідному агрегатному стані: $C_p = C_p^* + rW\delta$, де r — прихована теплота пароутворення; W — вологовміст; δ — дельта-функція Дірака, яка дає змогу записати густину розосередженої в об'ємі ТЗВ вологи зосередженою в центрі ТЗВ. Еквівалентна теплоємність представлена у вигляді: $C_p^* = C_{p,s} + WC_{p,w}$, де перший доданок — це питома теплоємність твердої фази при відповідній температурі, другий — води в рідкому стані.

Zanoni з колегами (1995) [8] досліджували зв'язок між видимою густиною, коефіцієнтом температуропровідності, коефіцієнтом теплопровідності і шпаруватістю як для скоринки, так і для м'якуша. Залежність видимої густини (тобто з урахуванням газової фази) від шпаруватості ε, % має лінійний характер і апроксимується залежністю виду $\rho_i = a_i - b_i\varepsilon$, де a і b — константи, індекс $i = 1 \vee 2$ вказує на приналежність до скоринки або до м'якуша. Коефіцієнт температуропровідності має експоненціальну залежність від шпаруватості: $a_i = \exp(c_i\varepsilon - d_i)$, де c і d — константи. Різниця в поведінці скоринки і м'якуша обумовлена комбінованим ефектом від варіації видимої густини, теплоємності й температуропровідності. Залежність коефіцієнта теплопровідності для скоринки і м'якуша представлена у вигляді: $\lambda_i = e_i - f_i\varepsilon$, де e і f — константи.

В останні півтора десятка років набула популярності технологія глибокого заморожування частково випечених виробів, яка передбачає їх остаточне допікання на місці реалізації готової продукції. У цьому зв'язку актуальним є дослідження Jury з колегами (2007) [9], які визначили ТФХ частково випеченої і замороженої тістової заготовки при заморожуванні, в процесі танення і в

процесі допікання. На експериментальних даних, наведених у цій праці, також базується вираз для визначення коефіцієнта теплопровідності, адаптований Pulris і Salvadori (2009, б) [7], що відтоді широко використовується іншими дослідниками:

$$\lambda = \begin{cases} \dfrac{0,9}{1+\exp\left[-0,1(T-253,16)\right]}+0,2 & \text{якщо } T \le T_f - \Delta T \\ 0,2 & \text{якщо } T > T_f - \Delta T \end{cases},$$

де T_f — температура фазового переходу води при відповідному тиску; ΔT — поправка на фізико-хімічні ефекти.

Для вивчення нестаціонарної теплопровідності в праці Ajasa з колегами (2014) [10] побудована штучна нейронна мережа (ШНМ) — система зі своєрідним штучним інтелектом, яку можливо натренувати на розв'язання певних задач. Такі мережі широко застосовуються при вирішенні комплексних проблем у різних сферах людської діяльності, що є складними для розв'язання на звичайному комп'ютері. До переваг нейронної мережі належить ефективна реалізація менеджменту невизначеностей, зашумлених даних і нелінійних залежностей. Запропонована і протестована авторами ШНМ дає змогу з високою точністю прогнозувати значення теплопровідності тіста-хліба при змінних температурі, вологості і густині ТЗВ.

1.2. Тепломасообмін у тісті-хлібі.

1.2.1 Механізм міграції вологи. Основна кількість праць, які можна віднести до першого рівня, присвячена дослідженням однієї з найбільш складних проблем у теорії і практиці процесу випікання — питанню внутрішнього тепло- і масоперенесення в тісті-хлібі. Завданнями досліджень є побудова температурного поля ТЗВ, визначення тривалості випікання, складових енергетичного балансу процесу тощо. Теплові характеристики процесу значною мірою визначаються феноменом термовологопровідності; аналітичне визначення температурного поля тістової заготовки, що випікається, пов'язане з необхідністю розв'язання системи диференційних рівнянь Ликова-Михайлова (1963) [11], що наразі є невирішеним завданням (Кирик і Кирик, 2012) [12]. Тому при дослідженнях в ряді випадків широко застосовують напівемпіричну теорію подібності, що надає змогу замінити важко розв'язувані рівняння залежностями між безрозмірними комплексами-критеріями.

Теоретичні засади внутрішнього тепломасопереносу, що побудовані на спадщині акад. О. В. Ликова, опрацьовані в працях Гінзбурга (1955) [13], Міхелєва і Іцковича (1968) [14] та інших. У західній традиції включення до математичної моделі рівнянь термовологопровідності зустрічається доволі рідко, так само, як і застосування теорії подібності. Гінзбург (1955) [13] проводив дослідження тепломасообміну в тісті-хлібі, насамперед у початковий період випікання. Визначальними критеріями подібності названі критерії Косовича, Фур'є, Кірпічова та безрозмірна температура поверхні ТЗВ. Встановлений факт суттєвого внеску масообміну в загальну картину прогрівання.

Зокрема, за рахунок масообміну в тісті-хлібі зростають: теплопровідність — на 17% для житніх сортів і 14% для пшеничних; зростання температуропровідності становить до 17% для житніх і 12% для пшеничних.

У літературі наявна достатньо велика кількість моделей тепломасообміну під час випікання. De Vries із колегами (1989) [15] запропонували модель тепломасопереносу в тісті-хлібі і м'якуші (без скоринки). Автори з'ясували, що теплопровідність вибродженого тіста і пористого м'якуша вищі, ніж у тіста з видаленою газовою фазою і в ущільненого м'якуша. Такий результат, на перший погляд, суперечить картині, що спостерігається на практиці, коли пористість не сприяє, а, швидше, перешкоджає явищу перенесення. Для пояснення цього феномену вони висунули гіпотезу про те, що тепло- і масоперенесення всередині продукту визначається механізмом випаровування-конденсації води всередині пор, а не механізмами теплопровідності і дифузії. Механізм перенесення вологи починає відігравати більшу роль в міру перетворення тіста в хліб, оскільки теплопровідність м'якушки зменшується, порівняно з тістом. Запропонована ними модель передбачає 4-ступеневий механізм розповсюдження теплоти в тісті-хлібі:

1. Вода випаровується біля нагрітої стінки газового пухиря і забирає приховану теплоту випаровування.

2. Водяна пара мігрує крізь газову фазу.

3. Зустрівши холодну стінку пухиря пара конденсується з виділенням теплоти і стає рідиною.

4. Теплота і волога відповідно транспортуються шляхом кондукції і дифузії через білковий гель до більш теплої стінки наступного газового пухиря.

Zanoni з колегами (1995) [8] взялися перевірити гіпотезу De Vries з колегами (1989) [15] стосовно впливу пористості на процес тепло- і масоперенесення. Автори розробили математичну модель тепломасообміну в м'якушці і скоринці ТЗВ та експериментально підтвердили її адекватність. Виходячи з отриманих авторами даних, гіпотеза не підтвердилася. Тобто модель, у якій причиною інтенсифікації теплообміну в капілярно-пористому тілі названо процеси випаровування-конденсації в середині газових порожнин, визнано неадекватною. Натомість автори пояснюють феномен більш високої швидкості прогрівання шпаруватого тіла, порівняно з суцільним, нижчою здатністю до акумуляції теплоти, що, у свою чергу, визначається нижчими значеннями питомої теплоємності і густини шпаруватого тіла.

Як зазначають Zanoni з колегами (1993) [16], прогрівання ТЗВ накладає відбиток на весь комплекс супутніх фізичних, хімічних і структурних перетворень під час випікання. Дослідниками розроблена механістична модель тепло- і масоперенесення в тісті-хлібі. Визначеними параметрами моделі є: температура, вологість, товщина скоринки, об'єм ТЗВ. Температура поверхні лінійно зростає з часом до 100°С. Всередині ТЗВ утворюється фронт випаровування, у якому температура постійна 100°С. Фронт мігрує всередину ТЗВ в міру зростання температури скоринки.

Результати отримані Pulris і Salvadori, (2009a) [6] при моделюванні процесу випікання хліба добре узгоджуються з експериментом. Розраховані тем-

пература скоринки і м'якуша, так само, як і вологовміст, демонстрували належне узгодження із замірами. Модель описує фронт випаровування, який мігрує вглиб ТЗВ з температурою 100°С, змінюючи при цьому фізичні властивості матеріалу.

Вітчизняні дослідники також розглядали подібну модель розповсюдження теплоти і вологи. Зокрема, про виконані детальні інструментальні дослідження особливостей фізичної картини в околі зони випаровування та відповідне математичне оброблення даних багато сказано в праці Лісовенка (1976) [2]. За даними Сидоренко (2008) [17], межа зони випаровування в кінці процесу випікання проходить на глибині приблизно (5—6) мм від верхньої поверхні та (9—12) мм від нижньої поверхні виробу. Товщина скоринки становить (2,5—5,0) мм. При цьому термометричні вимірювання показали, що внутрішній межі скоринки відповідає температура 110±2°С, а внутрішній межі зони випаровування — температура фазового перетворення вологи при відповідному тиску. Тож зона випаровування охоплює не лише скоринку, а й підкірковий шар, з якого також випаровується волога під час випікання і який відрізняється від м'якушки меншою вологістю та своєрідною структурою.

Запропонована Zanoni з колегами (1994) [18] математична модель включає ті самі параметри, що в механістичній моделі цих же авторів, побудована в двомірній симетричній системі координат і описує розповсюдження теплоти в ТЗВ. Процес підведення теплоти описується окремо для зовнішньої і внутрішньої частин ТЗВ (скоринки і м'якуша). Температура зовнішньої частини визначається отриманою теплотою із зовні, переданою внутрішньому шару м'якуша, і конвективною масовіддачею назовні. Температура внутрішньої частини визначається за законом Фур'є. Парціальний тиск пари на поверхні ТЗВ розглядається як обмежуючий чинник для випаровування вологи. Випаровування моделюється лише для верхньої відкритої поверхні.

Отже, у представленні механізму тепломасообміну в тісті-хлібі між умовно «західною» і «східною» школами спостерігається суттєва різниця. Після уточнення моделі De Vries з колегами (1989) [15], про що йшлося вище, «західна» модель набула таких головних ознак (Khater і Bahnasawy, 2014) [19]:

- у тісті-мякуші має місце дифузія води лише в рідинному стані, в той час, як у периферійних шарах (за зоною випаровування, ближче до поверхні) — лише у вигляді пари;
- збільшення об'єму ТЗВ, як правило, ігнорується;
- переміщення рідинної вологи у тісті-мякуші відбувається від центральних шарів у напрямку зони випаровування;
- переміщення пари від зони випаровування до поверхні відбувається під дією градієнта концентрації пари;
- потік маси (води і водяної пари) відбувається відповідно до закону дифузії за Фіком, що має такий запис:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial u}{\partial x}\right),$$

де u — вологовміст; τ — час; D — коефіцієнт масопровідності;

- водяна пара потрапляє з поверхні ТЗВ до середовища пекарної камери у вигляді конвективного потоку.

Зазначена модель суттєво контрастує із підходами, що сформувалися «східною» школою щодо ролі термовологопровідності у тепломасообінних процесах у капілярно-пористих тілах. Винятком тут може служити праця Zheleva i Kambourova (2005) [20], яка є однією з небагатьох, що представляє школуЛикова-Гінзбурга в англомовному сегменті наукових часописів. Рівняння масообміну автори записують з урахуванням руху вологи під дією градієнта температури:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(D\delta\frac{\partial t}{\partial x}\right),$$

де δ — коефіцієнт термовологопровідності; t — температура.

Tong i Lund (1993) [21] досліджували тепломасообмін при нагріванні хлібного тіста у мікрохвильовому полі. Розроблена ними модель із внутрішнім джерелом теплоти передбачала перенесення теплоти вздовж однієї координати шляхом теплопровідності і дифузії води. Як механізм масоперенесення розглядалася рух води в рідинному стані вкупі з випаровуваннямконденсацією. При випаровуванні і подальшій конденсації рідка вода рухається як у напрямку центру ТЗВ, інтенсифікуючи прогрівання м'якушки, так і до периферії.

Lucas з колегами (2015) [22] досліджували чинники, що впливають на потік води, упікання і локальний розподіл вологи в ТЗВ. Представлене оригінальне формулювання процесів випаровування, конденсації і дифузії, що ідеалізує утворення в тісті бульбашок як періодичних кубів. За допомогою неінвазивного методу і чисельного моделювання вивчені механізми розширення і стиснення в тісті, що збільшується в об'ємі під час випікання. Знайдено єдиний набір фізичних значень, що можуть задовільно відтворити експериментальні результати досліджень, пов'язані з транспортуванням і розширенням газової фази.

1.2.2. Супутні фізичні процеси, геометричні параметри. Як зазначалося вище, великий обсяг досліджень на тему терморадіаційних характеристик харчових продуктів міститься в праці Ільясова та Краснікова (1972) [4]. Предметом досліджень Dessev з колегами (2011) [23] було визначення впливу вологості хлібного тіста (не вибродженого) на поглинальну здатність у ближній і середній області інфрачервоного діапазону електромагнітних хвиль. Вченими встановлено, що найбільший рівень поглинальної здатності тіста і найбільша температура його нагріву відповідає зразкам низької вологості. При всіх рівнях інтенсивності ІЧ опромінення спостерігається чітка позитивна кореляція між температурою поверхні тіста і сумарним поглинутим тепловим потоком. У ближньому діапазоні ІЧ випромінювання чітко простежується два піки поглинання, що визначаються станом води: 1,38 мкм (пара) і 1,43 мкм (вода).

Зміна об'єму тіста-хліба в міру прогрівання відбувається нерівномірно і залежить від температури відповідного шару. У свою чергу, це позначається на значенні густини тіста-хліба і має враховуватися при обчисленнях значень

ТФХ, насамперед для масивних тіл. У праці Теличкун з колегами (2008) [24] досліджена залежність зміни об'єму подового хліба в процесі випікання від зростання температури та віддаленості шарів тіста від зовнішньої поверхні заготовки. Також враховується активність бродіння, яка, у свою чергу, залежить від температури.

При використанні теорії подібності для опису і розрахунків тепломасообмінних процесів практично значущим є питання коректного застосування такого геометричного показника як визначальний розмір. Для виробів різної форми Десиком з колегами (2012) [25] запропонований вираз еквівалентного розміру як параметра, що використовується при застосуванні теорії подібності, зокрема при визначенні тривалості прогрівання. Отримано формулу для визначення еквівалентного геометричного розміру з урахуванням коефіцієнта співвідношення розмірів заготовки у трьох вимірах. Встановлена залежність визначального (еквівалентного) розміру від співвідношення діаметра круглого подового хліба до його висоти. Отримано формулу для визначення площі поверхні круглого подового хліба та залежність цієї величини від визначального розміру. Встановлено, що при рівних еквівалентних розмірах тіла з різною формою мають однакову тривалість випікання. У праці Десика з колегами (2016) [26] розглянуто прогрівання ТЗВ циліндричної форми (хлібні палички), що займає проміжне положення між масивними і тонкими тілами, побудовані тривимірні графіки зміни температурного поля ТЗВ у різні моменти часу.

У праці Кирик і Кирик (2012) [12] проаналізоване прогрівання ТЗВ під час регулярного режиму, який настає у другому періоді випікання. У процесі нестаціонарної теплопровідності автори розглядають як об'єкт прогрівання лише внутрішню насичену рідинною вологою частину тіста-м'якуша, оточену поверхнею випаровування з температурою 100°C, для якої зовнішні шари є середовищем. Отримане рівняння, що описує процес прогрівання при значеннях числа Фур'є $Fo>0{,}35$: $\theta=18{,}3e^{-8{,}89Fo}$, де $\theta=(100-t)/(100-t_0)$ — безрозмірна температура (t — поточна, t_0 — початкова температура). Як характерний розмір у числі Fo узята половина висоти ТЗВ. Це рівняння отримане для виробів із здобного тіста масою 200—400 г із співвідношенням діаметра до початкової висоти 1:5 і може бути використане для розрахунку тривалості випікання або значення температури в центрі ТЗВ через відповідний проміжок часу.

До окремої підгрупи можна віднести праці, в яких міститься інформація про результати досліджень енергетичних характеристик процесів всередині тіста-хліба. Гінзбург (1955) [27] і ряд інших авторів у 40—50-х роках минулого століття провели термографічні дослідження процесу клейстеризації крохмалю, що відбувається в діапазоні температур близько 60°C. Встановлено, що цей процес у тісті-хлібі супроводжується яскраво вираженим ендотермічним ефектом, при якому теплота витрачається на руйнування внутрішньої міцелярної структури крохмалю. Деякі автори, зокрема Брязун з колегами (2009) [28], безпосередньо пов'язують точку перегину на графіку прогрівання центральних шарів тіста саме з температурою клейстеризації крохмалю.

Також ендотермічні реакції відбуваються при денатурації білків, розкладанні хімічних розпушувачів, зміні об'єму ТЗВ. Ці витрати є достатньо суттєвими, про що свідчать дані Дорохович з колегами (2012) [29], отримані при дослідженні випікання масивних борошняних кондитерських виробів. Зокрема, ці втрати відносно сумарної витрати теплоти становлять 11% при випіканні бісквіту, близько 15% — кексів і понад 18% — пряників.

Vanin з колегами (2018) [30] досліджували вплив температури на реологію тіста в діапазоні 25—95°C як при малих, так і при великих напруженнях, щоб змоделювати зміни при переході тіста у м'якуш під час випікання. Встановлено, що в усьому діапазоні температур мав місце ефект пластичного зміцнення. Індекс консистенції зменшувався при зміні температури з 25°C до 45°C і збільшувався при температурі вище 50°C. Ступінь релаксації також різко змінився, але тільки при більш високій температурі (56—60°C), нижче якої він залишався майже постійним (98—99%). Це пов'язують із перебігом основних фізико-хімічних реакцій, що мають місце для крохмалю і білків вище за цю температуру. Процес супроводжувався набуттям тістом стану в'язко-пружної рідини і властивостей, більш притаманних твердому тілу.

Ковальов з колегами (1999) [31] досліджували розповсюдження теплоти в тісті-хлібі за допомогою датчиків теплового потоку, що мають товщину 1—1,5 мм, які закладалися між пластами тіста на глибині від верхньої поверхні, мм: 0; 0,5; 1,0; 3,0; 4,0; 11,0; 25. Зразок масою 0,3 кг підігрівався зверху. Автори фіксують наявність западини у кривих теплового потоку $q = q(\tau)$ на глибинах 0,5; 1,0; 3,0 мм при температурі відповідного шару 110°C, що пояснюють збільшенням температури тіста внаслідок конденсації пари, яка мігрує із зони випаровування. При температурі цих шарів 120°C досягається локальний максимум кривої, після чого вона починає постійно знижуватися до завершення прогрівання. Крива, що відповідає поверхні ТЗВ (0 мм), стрімко, протягом 1 хв, піднімається до максимуму близько 2200 Вт $м^{-2}$, що настає при температурі поверхні 70°C, потім плавно знижується майже лінійно до 1200 Вт $м^{-2}$ при 20 хв прогрівання. Питома витрата теплоти на прогрівання верхньої частини ТЗВ, за підрахунками авторів, складає 190 кДж $кг^{-1}$.

На нашу думку, інтерпретація кривих теплового потоку, що відповідають глибинам 0,5; 1,0 і 3,0 мм, не зовсім коректна і потребує іншого пояснення, насамперед щодо феномену появи западини, яка за температури шару близько 110°C не може бути наслідком конденсації пари. Альтернативна інтерпретація цього феномену дана нами у другій частині статті.

Висновки

Проведене дослідження літературних джерел виявило, що процес внутрішнього тепломасообміну, який має місце під час випікання масивних виробів, є достатньо вивченим, існує велика кількість праць, спрямованих на отримання все більш адекватних математичних моделей, і дослідження в цьому напрямі тривають. З іншого боку, попри консенсус серед науковців щодо значної ролі масообміну при прогріванні тіста-хліба, існує розбіжність методологічного характеру, яка торкається врахування чи неврахування в математичній моделі феномену термовологопровідності. Зазвичай, моделі, в яких не враховується

термовологопровідність, оперують експериментально визначеними «ефективними», а не точними з позицій фізичної моделі параметрами. На нашу думку, це є своєрідним компромісом, спрямованим, з одного боку, на полегшення математичного розв'язання задачі, з іншого — на уникнення необхідності експериментального визначення деяких інших важких для дослідження параметрів (наприклад, термоградієнтного коефіцієнта).

Також проведений аналіз показав, що існують два підходи до розв'язання рівнянь математичної моделі тепломасопереносу. Один з них (умовно «західний») більше покладається на сучасні комп'ютерні засоби (зокрема, CFD — обчислювальну гідродинаміку), інший «східний» — для спрощення рівнянь і полегшення отримання результату передбачає більш широке застосування теорії подібності.

Література

1. Будрин Д. В., Назаров И. С. Таблицы и формулы: Расчет металлургических печей. Свердловск ; Москва: Уральское обл. гос. изд-во, 1933. 42 с.

2. Лисовенко А. Т. Процесс выпечки и тепловые режимы в современных хлебопекарных печах. М.: Пищевая пром-сть, 1976. 214 с.

3. Гинзбург А. С., Громов М. А., Красовская Г. И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: Справочник. Изд. Второе, доп. и перераб. М.: Пищевая промышленность, 1980. 288 с.

4. Ильясов С. Г., Красников В. Б. Методы определения оптических и терморадиационных характеристик пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность. 1972. 175 с.

5. Rask C. Thermal properties of dough and bakery products: a review of published data. *Journal of Food Engineering*. 1989. Vol. 9 (3). P. 167—193.

6. Pulris E., Salvadori V. O. Bread baking as a moving boundary problem. Part 1: Mathematical modeling. *Journal of Food Engineering*. 2009. Vol. 91(3). P. 428—433.

7. Pulris E., Salvadori V. O. Bread baking as a moving boundary problem. Part 2: Model validation and numerical simulation. *Journal of Food Engineering*. 2009. Vol. 91(3). 434—442.

8. Zanoni B., Peri C., Gianotti R. Determination of the Thermal Diffusivity of Bread as a Function of Porosity. *Journal of Food Engineering*. 1996. Vol. 26. P. 497—510.

9. Jury V., Monteau J., Comiti J., Le-Bail A. Determination and prediction of thermal conductivity of frozen part baked bread during thawing and baking. *Food Research Internatinal*. 2007. Vol. 40 (7). P. 878—882.

10. Ajasa, Afis A., Adenowo and others. Thermal Conductivity of Food Products using: A Correlation Analysis Based on Artificial Neural Networks (ANNs). *Advances in Bioscience and Bioengineering*. 2014. Vol. 2, (2). P. 14—24.

11. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. М-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 536 с.

12. Кирик И. М., Кирик А. В. Результаты исследований процесса выпечки тестовых заготовок в пароконвекционном аппарате. *Материалы XIV международной научно-практической конференции «Современные проблемы техники и технологии пищевых производств»*: Научные труды АлтГТУ. Барнаул, 2012. С. 227—231.

13. Гинзбург А. С. Теплофизические основы процесса выпечки. М.: Пищепромиздат, 1955. 474 с.

14. Михелев А. А., Ицкович Н. М. Расчет и проектирование печей хлебопекарного и кондитерского производства: Учебник для техн. спец. вузов пищ. пром-сти. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Пищевая пром-сть, 1968. 487 с.

15. De Vries, U., Sluimer P., Bloksma A.H. A quantitative model for heat transport in dough and crumb during baking. In: *«Cereal Science and Technology in Sweden, Proceedings of an*

International Symposium», 13—16 June, ed. N. G. Asp. Ystad, Sweden, Lund University. 1989. P. 174—188.

16. Zanoni B., Peri C., Pierucci S. A. Study of the bread-baking process — I: a Phenomenological Model. *Journal of Food Engineering*. 1993. Vol. 19. P. 389—398.

17. Сидоренко С. І. До питання про внутрішнє тепломасоперенесення при випіканні хліба. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2008. № 25, Ч. 2. С. 63—64.

18. Zanoni B., Pierucci S.A., Peri C. Study of the Bread Baking Process — II: Mathematical Modeling. *Journal of Food Engineering*. 1994. Vol. 23. P. 321—336.

19. Khater E.G., Bahnasawy A.H. Heat and Mass Balance for Baking Process. J. *Bioprocess Biotech*. 2014, 4: 190 doi: 10.4172/21559821.1000190.

20. 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.

21. Tong C.H., Lund D.B. Microwave heating of baked dough products with simultaneous heat and moisture transfer. *Journal of Food Engineering*. 1993. Vol.19. P. 319—339.

22. Lucas T., Grenier D., Doursat C., Wagner M. Modelling of bread baking with a new, multi-scale formulation of evaporation-condensation-diffusion and evidence of compression in the outskirts of the crumb. *Journal of Food Engineering*. March 2015. Vol. 149. P. 24—37.

23. Dessev T., Jury V., Le-Bail A. The effect of moisture content on short infrared absorptivity of bread dough. *Journal of Food Engineering*. 2011. Vol. 104. P. 571—576.

24. Теличкун Ю. С., Теличкун В. І., Горцепаєв В. Ю.. Розрахунок зміни об'єму хліба при випіканні. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2008. № 25, Ч. 2. С. 59 — 61.

25. 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.

26. Десик М. Г., Теличкун Ю. С., Литовченко І. М., Теличкун В. І. Математичне моделювання прогріву тістової заготовки циліндричної форми. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2016. Т. 22, № 4. 134—140.

27. Гинзбург А. С. Теплофизические основы процесса выпечки. М.: Пищепромиздат. 1955. 474 с.

28. Брязун В. А., Аднодворцев М. Ф., Йон П. Эффективность применения STIR-технологии для выпечки пшеничных хлебобулочных изделий. *Хлебопечение России*. 2009. № 2. С. 22—25.

29. 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.

30. Vanin F. M., Lucas T., Trystram G., Michon C. Biaxial extensional viscosity in wheat flour dough during baking. *Journal of Food Engineering*. Nov. 2018. Vol. 236. С. 29—35.

31. Ковальов О. В. Теличкун В. І., Олійник Н. В. Теплопоглинання в процесі випікання хліба. *Харчова і переробна промисловість*. 1999. № 5—6. С. 19.