

Методика визначення температурних потоків у зоні дії валкових робочих органів

А. ДЕРКАЧ, аспірант, І. СТАДНИК, докт.техн.наук

Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

В. СУХЕНКО, д.окт.техн.наук, В.П. ВАСИЛІВ, канд.техн.наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація. Проаналізовано фактори впливу конструктивних особливостей валків на ефективність процесу перенесення теплоти в середовищі (тісті) за рахунок теплопровідності в тістонагнітальних машинах. Виконано розрахунок поширення теплоти за радіусом валка при дії в'язкого тертя в процесі нагнітання на ділянці поперечного перерізу робочої камери.

Ключові слова: тісто, нагнітання, теплопровідність, поширення теплоти, тепловий потік, валок, в'язке тертя.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОТОКОВ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ВАЛКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

Аннотация. Проанализированы факторы влияния конструктивных особенностей валков на эффективность процесса переноса теплоты в среде (тесте) за счет теплопроводности в тестонагнетательных машинах. Выполнен расчет распространения теплоты по радиусу валка при действии вязкого трения в процессе нагнетания на участке поперечного сечения рабочей камеры.

Ключевые слова: тесто, нагнетание, теплопроводность, распространение теплоты, тепловой поток, валок, вязкое трение.

METHODOLOGY OF DETERMINATION OF TEMPERATURE FLOWS IN THE ZONE OF ACTION OF VALVE WORKING SWATHS

Andrei P. Derkach, Igor Y. Stadnuk (Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil), **Vladislav Yu. Sukhenko, Volodimir P. Vasyliv** (National university of life and environmental sciences of Ukraine, Kiev)

Abstract. The factors of influence of design features of swaths on efficiency of heat transfer process due to heat conduction in machines for injection of the dough are analyzed. Calculation of the propagation of heat along the radius of the swaths under the effect of viscous friction during the injection process in the section of the cross section of the working chamber is performed

Key words: dough, whipping, thermal conductivity, heat distribution, heat flow, swaths, viscous liquid.

Серед теплових процесів, що застосовуються у виробництві, основне місце займає процес передачі теплоти від її джерела до оброблюваного матеріалу. Такими джерелами теплоти служать нагріті тверді, газоподібні чи рідкі речовини, вплив в'язкого тертя в середовищі та тертя на поверхні робочих органів. Теплопровідність обумовлюється тепловим рухом мікрочастинок тіла, тобто рухом мікроструктурних частинок речовини (молекул, атомів, іонів, електронів). Обмін енергією між рухомими частинками відбувається внаслідок їх безпосередніх зіткнень. При цьому молекули більш нагрітої частини тіла, що мають більшу енергію, передають частку енергії сусіднім частинкам з меншою енергією [1]. У газах перенесення енергії здійснюється за рахунок дифузії молекул і атомів, у рідинах і твердих діелектриках – пружними хвилями. У металах перенесення енергії здійснюється головним чином дифузією вільних електронів.

У практичних розрахунках розподіл таких складних процесів на елементарні явища не завжди можливий і доцільний. Зазвичай результат спільної дії окремих елементарних явищ приписується одному з них, яке і вважається головним. Вплив же інших (другорядних) явищ позначається лише на величині кількісної характеристики основного. Так, при поширенні теплоти у пористому тісті, основним явищем прийнято вважати теплопровідність, а вплив конвекції і теплового випромінювання у порах враховується відповідним збільшенням коефіцієнта теплопровідності.

Насправді ж ці явища відбуваються одночасно і, звичайно, впливають одне на друге. Конвекція, наприклад, часто супроводжується тепловим випромінюванням, а теплове випромінювання – теплопровідністю і конвекцією.

Аналітичні дослідження інформаційних джерел показали, що обсяг літератури, присвяченої вивченню впливу валкових робочих органів на температурні потоки, вкрай обмежений і публікації відносяться, в основному, до останнього десятиліття. Наявних в літературі відомостей недостатньо для розробки методів математичного моделювання температурних потоків у тісті під дією навіть простих (рівномірне розтягування-стискання) видів валкового навантаження, не говорячи вже про складні процеси в'язкого тертя в тісті.

Теплофізичні властивості тіста (теплопровідність, теплоємність) визначають характер і швидкість перебігу теплових процесів, які застосовують для одержання продуктів з новими якісними показниками. Складні деформації, наявність фазових переходів, а також біологічний характер походження роблять визначення теплофізичних характеристик дуже складними і здебільшого досить наближеним процесом. Теплопровідність тіста залежить не лише від його стану, а й від напрямку теплового потоку відносно дії валків.

Процес нагрівання тертям при нагнітанні тіста валками та інших технологічних процесах, активно досліджується як експериментально, так і теоретично [2].

Існують чотири методи розрахунку виділення тепла при терті. Два з них засновані на коефіцієнті тертя, третій - на експериментальному визначенні розсіювання потужності, і четвертий - на зворотній моделі теплопровідності для оцінки виділення тепла [1, 2, 3].

Мета роботи: виконати розрахунок поширення теплоти при дії в'язкого тертя в процесі нагнітання тіста з використанням математичного моделювання, що ґрунтується на вирішенні зворотної задачі теплопровідності.

Будь-яке поле (у нашому випадку температурне) можна характеризувати поверхнями з постійним потенціалом. Швидкість зміни температури між цими поверхнями можна визначити відношенням різниці температур Δt до відстані між поверхнями. З математики відомо, що ця швидкість є максимальною у напрямі, перпендикулярному до поверхні.

Визначення температурних потоків при проходженні процесу нагнітання валками відіграє важливу роль для розрахунків, конструювання формувального, розкочувального, змішувального обладнання. Одер-

жані дані дають відповідь на ряд запитань про можливість терморегулювання процесу дії валків на тісто. Тому нами запропонована методика визначення температурних перепадів у валковому вузлі формувальної машини.

Аналітичне моделювання полягає у побудові та дослідженні математичних моделей. В його основу покладено ідентичність форми рівнянь та однозначність співвідношень між змінними в рівняннях, які описують оригінал та модель. Для визначення виділення тепла на поверхні тертя (границі розділу валок-тісто) виконали побудову зворотної моделі теплопровідності. Розрахунковим шляхом визначили температуру нагріву тіста у зоні контакту з валками та на основі отриманих даних визначили осьове зусилля потоку. Оскільки градієнт температур у твердому тілі визначається за експериментальними вимірами, то тепловий потік можна розрахувати як добуток коефіцієнта теплопровідності твердого тіла на градієнт температур на поверхні. У зворотному завданні теплопровідності використовували метод кінцевих різниць для оцінки теплового потоку $q(t)$ на границі розділу при терті, за умови, що відомі значення перехідної температури на поверхні валка.

Експериментальні дані по визначенню температури нагрівання валка в процесі нагнітання, одержали за допомогою термопар, які розташовані в зоні взаємодії. Зміну температури фіксували три термопари, що закріплені на поверхні валка відповідно на відстані 5; 15 і 25 мм від його торця (рис.1). Дані використали для розрахунку теплового потоку на поверхні в'язкого тертя.

При проходженні процесу дискретної дії валків на середовище, виділення тепла на межі розділу відбувається приблизно рівномірно. Цикл досить короткий, і втрати тепла на випромінювання й конвекцію незначні. Тому можна припустити, що бічні поверхні валка пере-

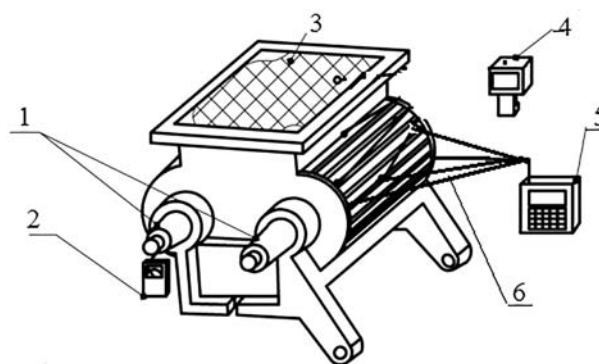


Рис. 1. Схема експериментальної установки визначення температурних потоків

1- валки; 2- тахометр; 3- тісто; 4- тепловізор; 5- потенціометр; 6- термопари.

бувають в адіабатичному граничному стані, і що розподіл температури по площині, паралельній поверхні тертя, є рівномірним. Таким чином, температура в цій площині, апроксимується одним значенням у точці перетинання при одномірному аналізі методом кінцевих різниць.

Основним елементом експериментальної установки є розроблений валок вузла нагнітання тіста, який має ряд нових конструктивних рішень, спрямованих на утворення якісної в'язкої течії в період нагнітання. Відповідно ця течія має більш удосконалені технологічні параметри, що в кінцевому результаті впливає на якість продукції і зниження питомих енерговитрат.

Проаналізовані фактори впливу конструктивних особливостей валків на ефективність процесу нагнітання і розкачування підтвердили, що в робочій камері відбувається в основному процес перенесення теплоти в середовищі (тісті) за рахунок теплопровідності. Самі валки разом із середовищем є багатошаровою циліндричною стінкою, яка являє собою лише і взаємного контакту. У цьому випадку термічний опір багатошарової циліндричної стінки дорівнює сумі опорів окремих шарів. Перший шар є стінка валка, а наступний шар – середовище (тісто), яке обробляється. Середовище умовно можна поділити на декілька шарів. На рис. 2 наведена схема поперечного перерізу валка в робочій камері, яка заповнена середовищем для нагнітання, та розподіл температури за радіусом валка.

Розподіл температури по товщині циліндричної стінки (валок і середовище на його поверхні) логарифмічно залежить від координати r . На основі закону Фур'є щільність теплового потоку q визначається із рівняння:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dr} = \frac{\lambda (T_1 - T_2)}{r \ln (r_2/r_1)} = \frac{\lambda (T_1 - T_2)}{r \ln (r_2/r_1)},$$

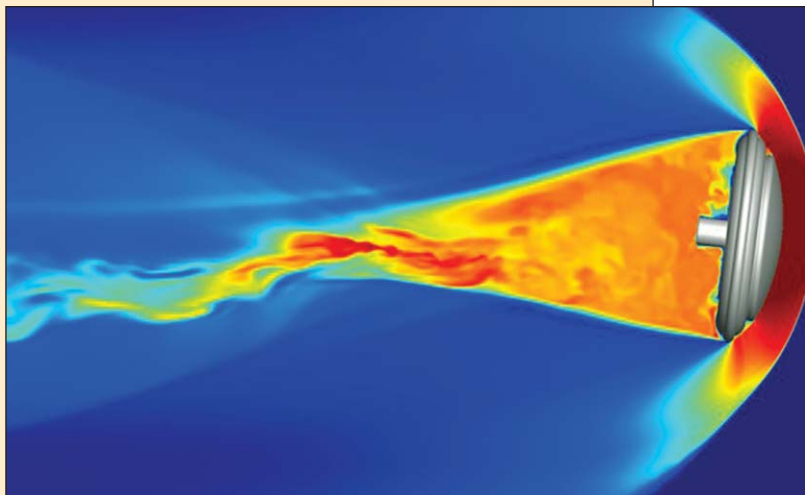
де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки валка, Вт/мК.

На основі проведених цілого ряду досліджень встановлено, що кількість теплоти, яка надходить і проходить через циліндричну стінку, віднесена до одиниці довжини циліндра, може бути визначена за формулою:

$$Q = qA = q2\pi r = \frac{2\pi\lambda (T_1 - T_2)}{r \ln (r_2/r_1)},$$

де $A = q2\pi rl$, при цьому Q залежить від r , оскільки теплота акумулюється в середовищі, що обробляється.

Як було сказано, що процес перенесення теплоти при валковій нагнітання є теплопередачею через багатошарову циліндричну стінку. Тому термічний опір дорівнює сумі опорів окремих шарів. На основі цього



можна записати рівняння для визначення кількості тепла, що утворюється під час зовнішнього тертя і проходить крізь середовище як багатошарову циліндричну стінку:

$$\frac{Q}{l} = q_l = \frac{T - T_{\infty}}{\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}},$$

де n – кількість шарів.

Для отримання рівняння, що описує поширення теплового потоку утвореного в результаті існуючої температури середовища відповідно до рецептури і додаткової температури в'язкого тертя із зовнішнім тертям при фрикційному контакті до поверхні валка, необхідно знайти кількість теплоти, яка проходить через цей шар. Визначення зміни температурних потоків у шарі тіста дає змогу розрахувати кількість виділеної теплоти за один цикл нагнітання.

Отримати необхідні результати способами термопар для аналітичного розрахунку вкрай складно. Перспектива визначення температурних режимів аналітичним шляхом спонукала пошуки нових технічних рішень. Розв'язання вище приведених аналітичних рішень вимагає досить точного виміру температур при складному монтуванні термопар. Ця ситуація привела до ідеї, за якою реалізація такого напрямку може помітно підсилюватися за рахунок використання тепловізійної зйомки за допомогою тепловізора Fluke Ti25 (рис.1).

Експериментальні дослідження тепловізійної зйомки за допомогою тепловізора Fluke Ti25 допомагають провести апробації результатів аналітичних досліджень та феноменологічного узагальнення. Перебіг перехідних процесів у часі визначався електронним засобом відліку часу з використанням спеціальних програм. За результатами вимірювань температури з

використанням ліцензійного програмного забезпечення компанії Fluke, що входить до комплексу поставки тепловізора, а саме, програмного комплексу SmartView 2.1, дало змогу встановлювати різницю потенціалів (рис. 2).

На рис. 2 зображено заміри температурних перепадів на ділянці затиювання, часткового перемішування та нагнітання. Аналіз одержаних даних приводить до очікуваного висновку про зростання температурних потоків в системі за висоти рідинно-газової фази. Водночас відображено фіксований ефект перехідного процесу, за яким стабілізація швидкості температурних перепадів відбувається на висоті 0,25-0,3 м над фрекційною контактною площиною тісто-валок.

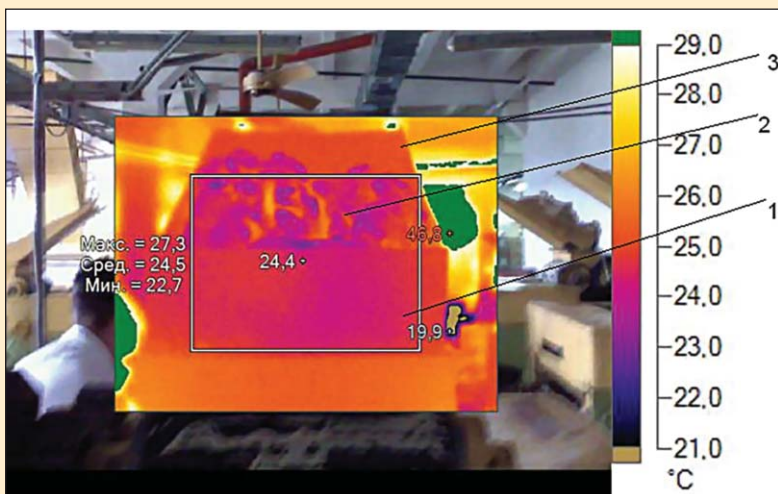


Рис. 2. Температурне поле тіста в нагнітальному вузлі
1- валок; 2- тісто; 3- бункер.

Теплова оцінка процесу течії у валковій зазорі особливо важлива для виробництва бубликової продукції. Розглянемо одновимірний процес теплопровідності на циліндричній стінці валка з радіусом r_1 і зовнішнім радіусом шару тіста r_2 ; коефіцієнт теплопровідності тіста є постійна величина (рис. 3).

В розрахунках теплових процесів поверхня валка може залишатися постійною, коли додержується ізо-термічна умова. У таких умовах розподілення температури в січенні тіста виражається змінною, а температура поверхні валка залишається постійною за рахунок «стікання» теплоти в навколишнє середовище. На поверхні стінки вище згаданим дослідним шляхом визначили температуру.

Для опису впливу режимних характеристик роботи валка на температурні параметри побудовані графічні залежності. На рис. 4 показана зміна температури згідно розв'язку рівняння по визначенню її розподілу по товщині r тіста при затиюванні валками.

Аналіз графічних залежностей показав характер впливу режимних параметрів у межах інтервалів варіювання, що досліджувались. Із графічних інтерпретацій результатів даних відповідно до виведених формул, наведених на рис. 4, 5 встановлено, що температура середовища відповідає режиму початкової стадії затиювання – $23,8^\circ\text{C}$ із завантажувального бункера, і є істотно нижчою від температурного оптимуму при стисканні $25,9^\circ\text{C}$ та нагнітанні $26,2^\circ\text{C}$. Поверхня валка після подачі тіста на формування має температуру $26,9^\circ\text{C}$. Таким чином, на показники якості нагнітання впливають не конкретні числові значення режимних параметрів, а їх поєднання. Тому в числі заходів по обмеженню негативних впливів температур

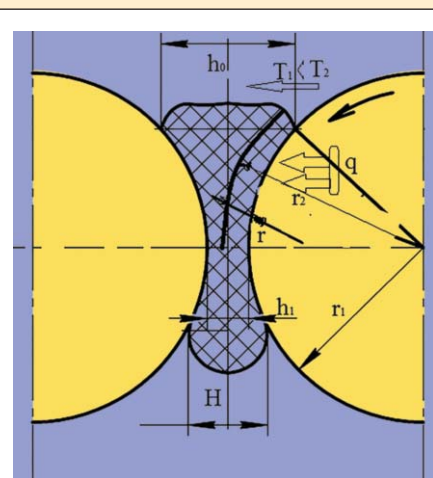


Рис. 3. Схема для визначення розподілу температури.

необхідно застосовувати ступінчасті режими зниження температур у наближенні до значень останніх, які б відповідали наступним режимам нагнітання.

Нагрівання поверхні валка призводить до того, що завдяки законам деформації і циркуляції в об'ємі се-

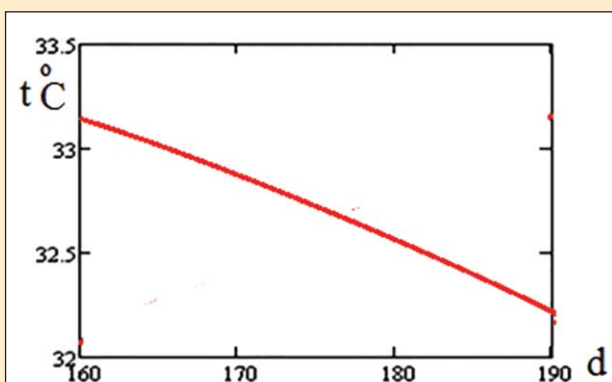


Рис. 4. Зміна температури тіста по товщині його шару на валку

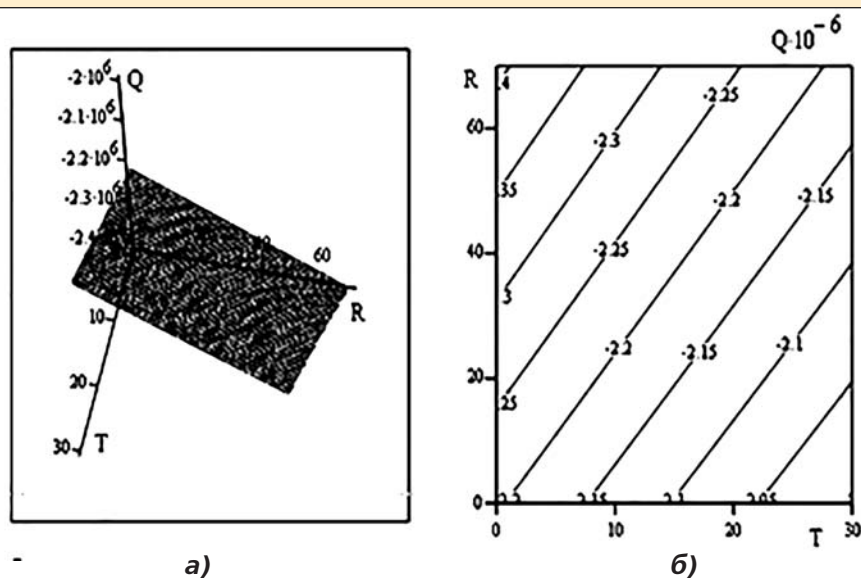


Рис. 5. Залежності функції Q від температури T і радіусу шару тіста:

а) поверхня відгуку; б) лінії рівних рівнів

редовища буде найбільша температура. Це протидіє активному масообміну в стиснутому об'ємі середовища валками та впливає на створення тиску відриву тіста від валків. Ліквідація цього недоліку може досягатися при умовах миттєвого (максимального) тиску відриву, або при мінімальному значенні.

Очевидно, що зі збільшенням кута (діаметр валка) зтягування маси тіста в об'ємі робочої частини камери зростає, так само як і поверхня теплопередачі. Ця особливість вказаних співвідношень має важливе значення для випадків, за яких температурний перепад обмежується технологічними особливостями процесу виробництва бубликової продукції.

Дріжджове тісто дуже чутливе до стрибкоподібного зниження температури [3-6]. Водночас, відчутних змін від короткочасного нагрівання до відповідних температур 34-28°C, при яких може розпочатися синтез протеїнів, не відбувається. Необхідний досить малий період процесу, щоб середовище повернулося до попереднього звичайного стану. При невиконанні умов обмеження температурних перепадів тісто виділяє у зовнішнє середовище амінокислоти і нуклеотиди. Розмноження їх уповільнюється або, навіть, повністю припиняється. Саме присутність мікробіологічної складової в середовищах означає необхідність обмеження різниці температур на валковій поверхні теплопередачі. Для керування температурним режимом важливим є підтримання початкової і максимальної температур.

Висновки

Ефективне функціонування схеми нагнітання тіста забезпечує правильний підбір конструктивних параметрів валків, вибір технологічних характеристик та гідродинамічних параметрів потоку.

Контроль за зміною теплоти, що виділяється при нагнітанні валками допомагає визначити зношення валка. Це дає змогу також встановити механічні властивості тіста, що сприяє підвищенню ефективності роботи машини. Таким чином, наведений спосіб дозволяє контролювати теплові зміни рифлених валків та транспортуємого тіста до мат-

риць з протисканням через отвори насадок без його структурної зміни.

Література

1. **Стадник, І.Я.** Науково-технічні основи процесів та розробка обладнання для безлопатевого замішування тіста: автореф. дис. ...докт. техн. наук: спец. 05.18.12 "Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв" / Стадник Ігор Ярославович; НУХТ. – К., 2014. – 40 с.
2. **Соколенко, А.І.** Енергетичні трансформації і енергозбереження в харчових технологіях: монографія / А.І. Соколенко, А.А. Мазаракі, В.А. Піддубний та ін. – К.: Фенікс, 2012. – 484 с.
3. **Нащокин, В.В.** Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. – М.: Высшая школа, 1980. – 469 с.
4. Визначення потужності валкової тісторозкаточної машини / Стадник І.Я., Деркач А.В., Василів В.П. // Сборник статей научно-информационного центра «Знание» по материалам XII международной заочной научно-практической конференции: «Развитие науки в XXI веке». - Харьков: НИЦ «Знание», Ч.2, - 2016 – С.36-41.
5. **Рабинович О.М.** Сборник задач по технической термодинамике / О.М. Рабинович. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.
6. **Соколенко, А.І.** Інтенсифікація масообмінних процесів в харчових технологіях / А.І. Соколенко, О.Ю. Шевченко, В.А. Піддубний. – К.: Люксар, 2008. – 443 с.