

більшою площею бокової поверхні зазнають значно менших напружень в корпусі. Напруження на ділянках леза ножа суттєвим чином залежать від кута нахилу різальної кромки до напрямку дії лобового тиску, леза з більшим значенням зазначеного кута (більшої кривизни) володіють більшою міцністю.

Висновки. Більшу міцність ножа забезпечує одностороннє заточування леза, а не двостороннє симетричне. Напруження при односторонньому заточуванні леза до двох разів менші за напруження при двосторонньому симетричному заточуванні. У випадку двостороннього заточування ніж підлягає деформаціям лише в площині його корпусу, до того ж, при односторонньому заточуванні тиск подачі чашею дещо компенсує навантажувальну дію лобового тиску. Запропонована конструкція дає можливість покращити вихід готово продукту.

Список використаних джерел:

1. Інноваційне обладнання м'ясопереробних виробництв : підручник / О.М. Чепелюк, О.М. Гавва, І.Г. Бабанов та ін. ; Нац. ун-т харч. технол. – К. : Видавництво «Сталь», 2021. – 805 с.

2. Монтаж, експлуатація, діагностика та ремонт обладнання м'ясопереробних підприємств : підручник / І.Г. Бабанов, О.М. Гавва, О.І. Бабанова та ін. – К.: Видавництво «Сталь», 2015. – 600 с.

3. Інноваційне обладнання галузі (Обладнання м'ясопереробних і молокопереробних виробництв) [Електронний ресурс] : метод. рекомендації до вивч. дисц. та викон. лабораторних робіт для здобувачів освіт. ступ. "Магістр" спец. 133 "Галузеве машинобудування" освіт.-проф. програми "Інжиніринг харчових виробництв" / уклад. : О.М. Чепелюк, О.В. Ковальов, С.О. Удодов, І.Г. Бабанов ; Нац. ун-т харч. технол. – Київ : НУХТ, 2019. – 104 с. <http://library.nuft.edu.ua/ebook/file/36.126.pdf>.

УДК 001.891.57:664.149

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НВЧ-ОБРОБКИ ПАСТИЛО-МАРМЕЛАДНИХ ВИРОБІВ

Михайлов В.М., д.т.н., проф., Шевченко А.О., к.т.н., доц.,

Прасол С.В., к.т.н., доц., Демченко В.О., аспірант

(Державний біотехнологічний університет)

До перспективних методів тепло-масообмінної обробки відносять обробку в НВЧ-полі. Енергія електромагнітних коливань надвисоких частот внаслідок низки переваг, що виявляються при

взаємодії з продуктами, отримала останнім часом застосування в різних технологічних процесах. НВЧ-енергія володіє багатьма специфічними особливостями. Так, здатність проникати в товщу продукту і можливість великої концентрації енергії в одиниці об'єму дозволяють здійснити рівномірний і швидкий нагрів речовини без небажаних перепадів температури.

У нашій роботі ми розглядаємо математичну модель НВЧ-обробки пастило-мармеладних виробів. У процесі нагрівання тепломасоперенесення в продукті, що переміщується зі швидкістю V у полі НВЧ із напруженістю E і частотою f , температура продукту у середньому зростає від $t_o = 20$ °С до $t_k = 120$ °С, а вологість знижується від $W_o = 70...91\%$ до $W_k = 4...30\%$. Це призводить до зміни електро- і теплофізичних властивостей продукту. У цих умовах побудова і вирішення повної системи рівнянь тепломасоперенесення в продукті значно ускладнюється і можлива лише за умов порівняння з геометрією НВЧ-нагрівання. Тому, для побудови спрощеної математичної моделі, що є теоретичною основою для технологічних розрахунків, введено низку допущень з відповідним обґрунтуванням.

Насамперед, прийемо, що перенесенням теплоти і вологи в напрямку переміщення продукту за рахунок теплопровідності і дифузії можна знехтувати порівняно з тепломасоперенесенням, викликаним рухом продукту в зоні впливу НВЧ-нагрівання. У масі продукту умовно виділимо невеликий обсяг у вигляді циліндра довжиною 1 см у напрямку V і площею поперечного перерізу 1 см². За максимального градієнта температури в продукті 10 К/см (фактичний градієнт в умовах розглянутого процесу, зазвичай, не перевищує $100/20=5$ К/см, оскільки довжина зони НВЧ-нагрівання складає не менш 20 см) через перетин виділеного обсягу продукту тепловий потік проходить в один бік потужністю не більше:

$$Q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta X} S. \quad (1)$$

Орієнтовано в межах 0,01...0,1Вт.

Теплова потужність, що виділяється в цьому обсязі унаслідок поглинання НВЧ-енергії близько 3 Вт. Виділення вологи з продукту в процесі теплової обробки через протікання технологічного процесу відбувається переважно в напрямку, перпендикулярному вектору V і її перенесенням у напрямку руху продукту.

Зроблені допущення побудови системи рівнянь тепломасоперенесення в продукті істотно спрощуються. Виділимо в масі продукту деякий малий об'єм ΔV і будемо стежити за його переміщенням зі швидкістю в зоні НВЧ-нагрівання протягом години.

Безупинно відбувається перемішування продукту, що рухається, у ньому, практично, не виникають градієнт температури і вологості в напрямку, перпендикулярному до вектора. Тому, для обраного об'єму можна скласти диференціальні рівняння балансу для кількості тепла і маси вологи, у яких основні параметри – температура і вологість.

Складемо спочатку рівняння балансу для маси вологи в продукті. Найпростішим з можливих підходів є використання загального рівняння масовіддачі у вигляді

$$dM' = \beta(U - U_{\text{сер}})\Delta S d\tau, \quad (2)$$

де dM' – маса речовини (вологи), що віддається за годину dt через бічну поверхню ΔS з розглянутого об'єму продукту AV у навколишнє середовище під дією різниці концентрацій ($\text{кг}/\text{м}^3$) вологи (U) у товщині продукту (у «ядрі потоку» продукту, що рухається) і поза ним ($U_{\text{сер}}$). Оскільки процес нагрівання закінчується при вологовмісті продукту, що ще набагато перевищує вологість навколишнього повітря, тоді надлишок маси вологи з об'єму продукту дорівнює $dM = dM'$, ураховуючи це перепишемо рівняння (2) у вигляді

$$dM = -\beta \cdot U \cdot \Delta S \cdot d\tau. \quad (3)$$

Коефіцієнт масовіддачі β у процесі виходу вологи з продукту – коефіцієнт вологовіддачі – залежить від багатьох чинників, зокрема, від способу нагрівання, що визначає характер видалення вологи. Через деяку зміну структури продукту в процесі його обробки можлива також і зміна величини β згодом у ході процесу; у умовах безупинного перемішування продукту, транспортуючим шнеком, у розглянутому процесі цим змінюванням у першому наближенні можна знехотити.

Під час транспортування продукту шнеком об'єм ΔV , можна представити як полий циліндр із внутрішнім радіусом r (стрижня шнека), зовнішнім радіусом R (лопати шнека) і деякою довжиною Δl (різниця визначає усереднену товщину h кулі напівфабрикату, що не повинна перевищувати характерну глибину проникнення НВЧ-поля в продукт). При такій геометрії задачі $\Delta V = \pi(R^2 - r^2)\Delta l$, $\Delta S = 2\pi R\Delta l$. Для m маємо:

$$m = \beta \frac{2\pi R\Delta l}{\pi(R^2 - r^2)\Delta l} = \beta \frac{2R}{R^2 - r^2} = \beta \frac{2R}{(R+r)(R-r)} \quad (4)$$

Якщо, зокрема, $R - r = h \ll r + R$, то приблизно маємо:

$$m \approx \frac{\beta}{h} . \quad (5)$$

У результаті рівняння за початкової умови $U(r=0)=U_0$:

$$U = U_0 e^{-mr} . \quad (6)$$

Густина зволоженого пористого напівфабрикату пов'язана з його вологістю W співвідношенням

$$\rho = \frac{\rho_c(1-p)}{1-W} = \frac{V}{W} . \quad (7)$$

Опис процесу видалення вологи з продукту в специфічних умовах нагрівання на основі загального рівняння масовіддачі дозволяє вирішити систему рівнянь тепломасоперенесення, що істотно спрощує розв'язання цієї системи.

Для одержання опорних розрахункових даних для практичної реалізації, виникла необхідність у визначенні ε' і ε'' основних характеристик, тому що відповідно до теорії НВЧ-поля виділяється теплотужність.

$$q = \varepsilon_0 \varepsilon'' \omega E = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon'' f E^2 . \quad (8)$$

Численні дані свідчать про те, що діелектричні властивості визначаються вмістом у них вільної вологи з високими значеннями, причому величина ε'' пропорційна $\omega/(1-\omega)$ тобто об'ємної вологості:

$$\varepsilon'' = AU = A(1-p)\rho \frac{\omega}{1-\omega} . \quad (9)$$

Коефіцієнт пропорційності A залежить від структури продукту і розподілу в ньому вологи.

Глибина проникнення у продукт, визначається за формулою:

$$\Delta = 9,65 \cdot 10^{11} / (f \sqrt{\varepsilon''} \cdot \text{tg} \delta) . \quad (10)$$

Висновки. Таким чином, математична модель дозволяє визначити глибину проникнення в продукт та отримати опорні характеристики для розрахунку обладнання НВЧ-нагрівання. Аналітичний огляд стану і теоретичні моделі представлених процесів дозволили провести планування експериментальних робіт, які необхідні для повної науково-обґрунтованої концепції обробки пастило-мармеладних виробів у полі НВЧ.