

Rozmrazovanie mikrovlnovou energiou

A. VAVRÍK

Rozmrazovanie v potravinárstve

V potravinárskej výrobe v prevažnej miere treba zmrazené výrobky v priebehu určitých výrobných operácií rozmrazovať. Ak sa rozmrazovanie neurobí kvalitne, utrpí tým akosť tovaru. Zmrazený produkt sa kazí rovnako ako rozmrazený, preto treba potravinu vytiahnuť z rozmrazovača o niečo skôr, ako je úplne rozmrazená a nechať jej tak určitú rezervu chladu. V zásade poznáme dve skupiny rozmrazovacích metód. Pri prvej skupine sa teplo odovzdáva potravine cez jej povrch, a to teplými sálavými zdrojmi, vzduchom, teplou vodou, teplými doskami alebo podtlakovou parou. V druhej skupine sa teplo v hmote vytvára buď odporovým elektrickým ohrievaním, buď dielektrickým, prípadne mikrovlnovým ohrevom. Metódy prvej skupiny sa u nás zatiaľ používajú prednostne.

Rozmrazovanie vonkajším ohrevom

Doba rozmrazovania týmto spôsobom je úmerná:

- rozmeru a tvaru výrobku,
- tepelnej vodivosti výrobku,
- rozdielu teplôt medzi povrchom výrobku a médiom, ktoré výrobok obklopuje,
- rýchlosti pohybu média vzhľadom na povrch výrobku,
- vlhkosti obklopujúceho média.

Pretože tepelná difúzia do rozmrazeného materiálu je menšia ako pri zmrazenom, majú všetky tieto metódy nevýhodu v tom, že sa prestup tepla s postupom rozmrazovania progresívne znižuje. Pri všetkých spôsoboch rozmrazovania povrchovým ohrevom je vhodné naprogramovať tepelný spád tak, že sa začína so zvýšenou teplotou obklopujúceho média, ktorá sa potom zníži po dosiahnutí určitej teploty povrchu výrobku. Teploty sú tu však nízke, aby sa zabránilo povrchovému poškodeniu potraviny. Čas rozmrazovania citelne predlžuje obalový materiál, najmä hrubé kartóny.

Rozmrazovanie masla konvekciou

Maslo sa vyrába buď v spotrebiteľskom balení pre obchodnú sieť, buď na mraziarenské skladovanie v kartónoch o hmotnosti 20,50 kg, pri teplotách skladovania -18°C . Uskladňovanie trvá niekoľko mesiacov najmä v letných mesiacoch, keď sú prebytky masla.

Maslo zmrazené v kartónoch sa pred použitím rozmrazuje na vhodné technologické teploty. Pre prepracovanie na kontinuálnych zmaselňovačoch na spotrebiteľské balenie sa rozmrazuje blok masla tak, aby teplota v jadre bola minimálne 12°C . Teplota masla v jadre na spracovanie napr. v pečivárni je až 24°C .

Rozmrazovanie sa robí takmer zásadne voľnou konvekciou pri teplote okolia 18 až 29°C . Pri teplotách okolia 18°C býva maslo rozmrazované v paletách, potom pred spracovaním sa na jeden až dva dni rozložia bloky masla tak, aby sa zintenzívil postup rozmrazovania. Obrázok 1 znázorňuje bloky masla uložené na palete, ako aj na pracovnom stole bez obalu.



Obr. 1. Maslo uložené v blokoch na palete.

Výpočet teploty v strede bloku masla

Rozmrazovanie masla je nestacionárny dej vedenia tepla. Úloha sa dá riešiť ako rovinná stena ohraničená rovnobežnými povrchmi i ako jednosmerné teplotné pole. Pri riešení predpokladáme, že tepelno-fyzikálne veličiny λ , ρ , c sú konštantné a rovnaké pre celý objem. Podobne i súčiniteľ prestupu tepla

z povrchu bloku stien masla do vzduchu je konštantný. Výpočet sa urobil pre samostatný blok o rozmeroch $28 \times 28 \times 39$ cm a v palete o rozmere šírky steny 67 cm.

Fyzikálne veličiny pre maslo podľa [1, 4]:

$\rho = 0,870 \text{ kg/m}^3$ vrátane obalu,

$\lambda = 0,62 \text{ W/mK}$, odhad z porovnania s mäsom a tukom,

$c = 5,18 \text{ kJ/kg, K}$ je priemerná hodnota podľa obr. 4 pre teploty -18 až $+15^\circ\text{C}$,

$\alpha = 4,6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ podľa [3], odhad pre voľnú konvekciu,

$T_0 = -18^\circ\text{C}$, teplota zmrazeného masla,

$T_f = +20^\circ\text{C}$, teplota okolia,

$\delta = 0,14 \text{ m}$ (pre blok) a $0,34 \text{ m}$ (pre paletu).

Teória nestacionárneho ohrevu (ochladzovania) rovinnej dosky je podrobne rozpracovaná v [3].

Pre stred dosky platí tvar rovnice pre náš prípad

$$T_s = T_f + (T_0 - T_f)A e^{-\mu^2 Fo},$$

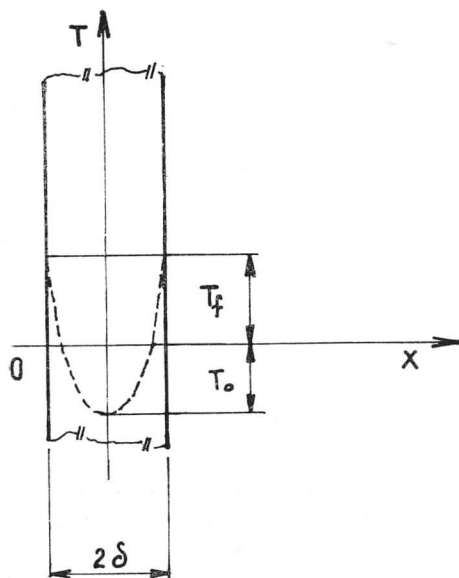
pričom

$$Fo = \frac{\lambda t}{\rho c \delta^2}.$$

Konštanta A a Fo sa určí z Biotovho čísla

$$Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda},$$

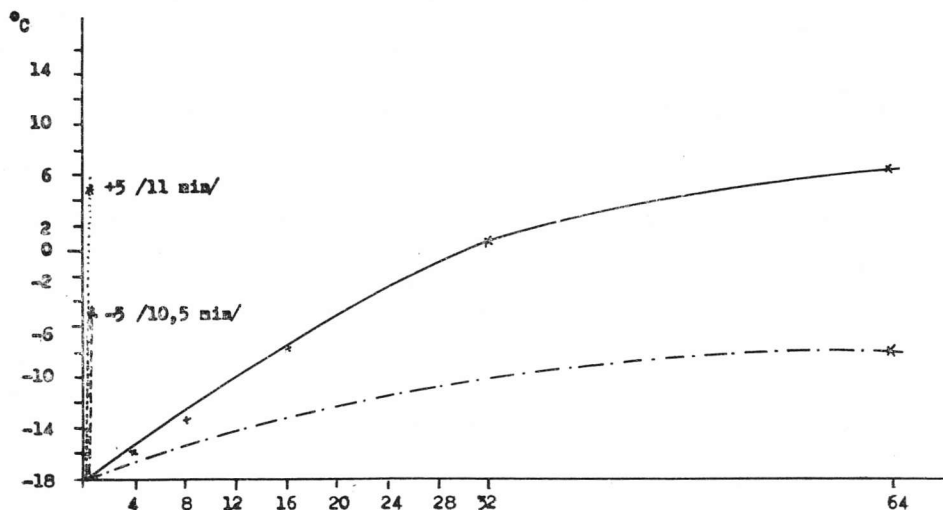
ktoré sú tabelizované v [3].



Obr. 2.

Vypočítané hodnoty teplôt pre samostatný blok masla

Čas (h)	4	8	16	32	64
Teplota (°C)	-16	-13,5	-7,5	+1	+6,5
Vypočítané hodnoty teplôt pre maslo v palette					
Čas (h)	15	32	64		
Teplota (°C)	-14	-10	-8		



Obr. 3. Priebek teploty pri rozmrazovaní blokov masla.

..... rozmrazovanie pomocou mikrovlnovej energie (príkon 10 kW); — — — rozmrazovanie pomocou mikrovlnovej energie (príkon 4 kW); ————— rozmrazovanie samostatného bloku voľnou konvekciou; — . — . — rozmrazovanie blokov masla v palette s voľnou konvekciou

Priebehy teplôt sú na obr. 3.

Použité označenia:

- A — konštanta
 C — merné teplo masla [$\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 t — čas [s]
 T_s — teplota v jadre bloku [K]
 T_f — teplota okolitého vzduchu [K]
 T_0 — teplota zmrazeného bloku [K]
 α — koeficient prestupu tepla [$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$]
 δ — hrúbka bloku masla [m]
 λ — koeficient tepelnej vodivosti [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 ρ — hustota [kg m^{-3}]

Bezrozmerné kritériá:
Fo — Fourierovo číslo
Bi — Biotovo číslo.

Uvedený výpočet i prax potvrdzujú, že rozmrazovanie blokov masla je v každom prípade veľmi zdĺhavé.

Pomalé rozmrazovanie spôsobuje neoperatívnu vo výrobe. Výroba, hoci má zmrazené maslo dovezené z mraziarne (napr. Pečivárne Sereď), nemôže ho ihneď použiť pri výrobe, ale musí ju prispôbovať podmienkam stavu teploty masla. Podchladené maslo (nedostatočne rozmrazené) vložené do zmaselňovačov, prípadne miešacích a homogenizačných zariadení, spôsobuje polámanie pákových miešadiel. Odstránenie uvedených nedostatkov zdĺhavého rozmrazovania možno vyriešiť využitím progresívnych technologických procesov s vnútorným ohrevom, ako je kontaktný, dielektrický a mikrovlnový ohrev.

Elektrické a dielektrické vlastnosti potravín

Rozličné tepelné procesy pri opracovaní surovín, ktoré majú prevažne malú tepelnú vodivosť, sťažujú zavedenie plnej mechanizácie a automatizácie výrobných procesov. V súčasnosti v úsilí intenzifikovať termické procesy v potravinárstve, pristupuje sa k využitiu elektrokotaktných metód a vysokofrekvenčných elektrických polí. Využitie týchto metód zrýchľuje procesy, zvyšuje produktivitu, znižuje výrobné plochy a zvyšuje kvalitu produkcie. Špecifickou prednosťou uvedených metód pred konvektívnymi metódami prívodu tepla je možnosť dostatočne rýchlo a rovnomerne vo vnútri celého objemu produktu tento prehrievať. Ohrev v ideálnych podmienkach sa uskutočňuje bez teplotného gradientu $dT/dx = 0$, pričom materiál môže pohlcovať veľkú energiu v krátkych časových intervaloch. Funkčné okolité zariadenia (mikrovlnové komory) majú prakticky iba teplotu okolia.

Elektrofyzikálne vlastnosti materiálov

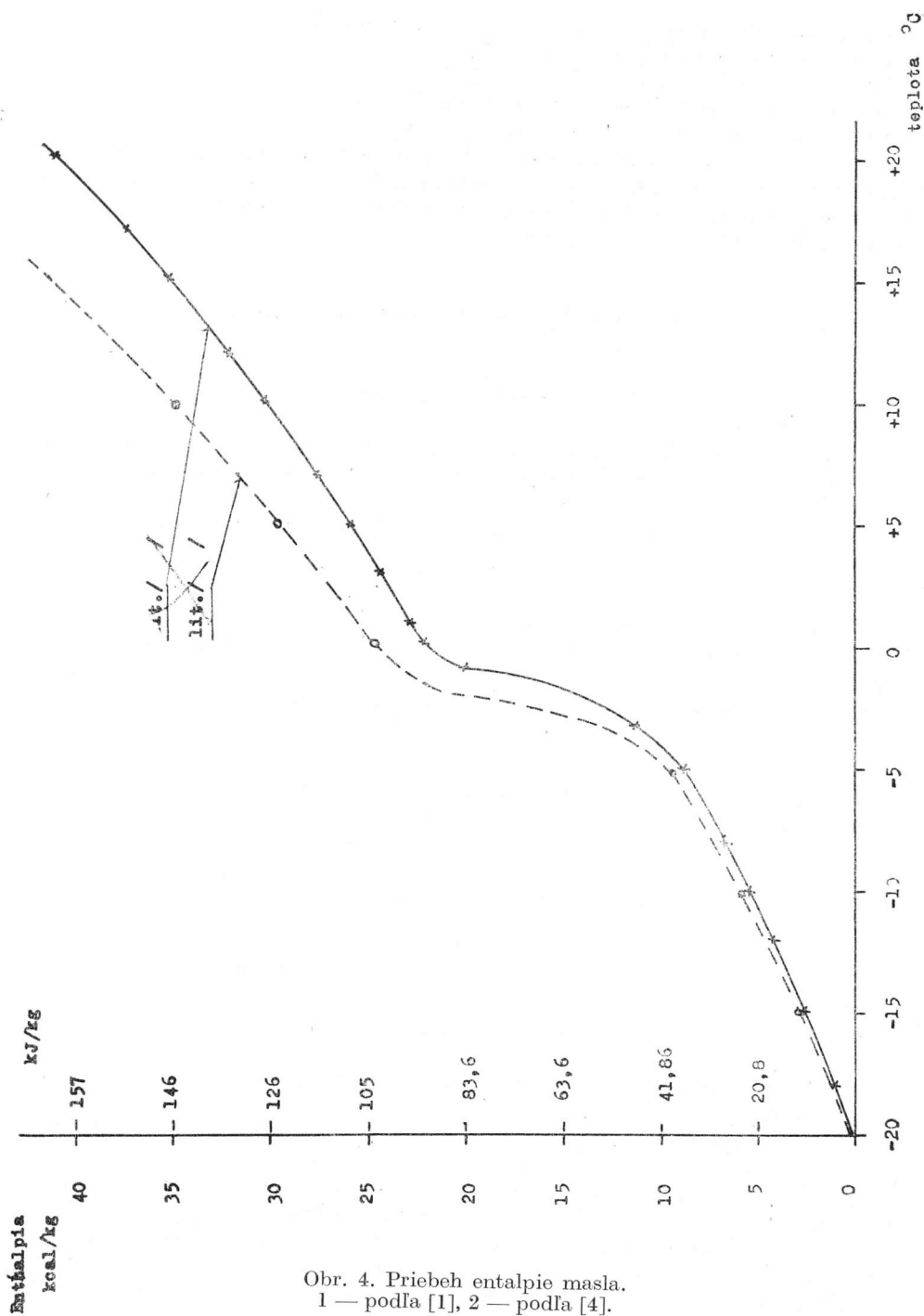
Elektrofyzikálne vlastnosti materiálov možno charakterizovať dvoma veličinami, a to dielektrickými konštantami ϵ' , ϵ_a a špecifickou vodivosťou χ (Ω^{-1} , cm^{-1}). Vzťah medzi pomernou a absolútnou dielektrickou konštantou je

$$\epsilon' = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0},$$

kde ϵ' — relatívna dielektrická konštanta materiálu, ϵ_a — absolútna dielektrická konštanta materiálu, ϵ_0 — absolútna dielektrická konštanta vákua.

Pri vzájomnom pôsobení elektromagnetického poľa a látky, charakterizovaným elektrickým odporom a viskozitou, vznikajú straty energie; v prvom prípade sú to odporové a v druhom dielektrické straty. Vzťah medzi týmito stratami je vyjadrený pomocou tangensu uhla strát $\text{tg } \delta$:

$$\text{tg } \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\chi}{\omega, \epsilon', \epsilon_0},$$



Obr. 4. Priebeh entalpie masla.
1 — podľa [1], 2 — podľa [4].

kde ε'' je faktor strát a $\omega = 2\pi f$, čo je uhlová rýchlosť.

Hodnota $\operatorname{tg} \delta$ umožňuje deliť materiály:

ak $\operatorname{tg} \delta \gg 1$, je materiál elektricky vodivý,

ak $\operatorname{tg} \delta \approx 1$, je materiál elektricky polovodič,

ak $\operatorname{tg} \delta \ll 1$, je materiál elektricky dielektrický.

Elektrické vlastnosti závisia aj od frekvencie poľa. Potravinárske produkty majú široký sortiment a možno medzi nimi nájsť dielektriká, vodiče a elektrolyty. V jednosmernom elektrickom poli sa nabité častice premiestňujú pozdĺž siločiar a dipólové molekuly sa orientujú.

Mikrovlnový spôsob rozmrazovania

Princíp mikrovlnového ohrevu

Interakciou vysokofrekvenčného poľa s látkou vzniká v látke teplo, nezávisle od jej tepelnej vodivosti. Tento jav je osobitne výrazný pri látkach so zlou (elektrickou) tepelnou vodivosťou.

Vysokofrekvenčný výkon, ktorý sa premení v látke na teplo, dáva vzťah

$$P = kfE^2\varepsilon \operatorname{tg} \delta ,$$

kde k — konštanta, f — frekvencia použitého zdroja, E — intenzita elektrického poľa, ε — dielektrická konštanta látky, $\operatorname{tg} \delta$ — tangens uhla dielektrických strát.

Energia potrebná na ohriatie G kilogramov látky o teplotný rozdiel ΔT (K)

$$P = G \Delta T c ,$$

kde P je energia v kJ, c — špecifické teplo v $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$.

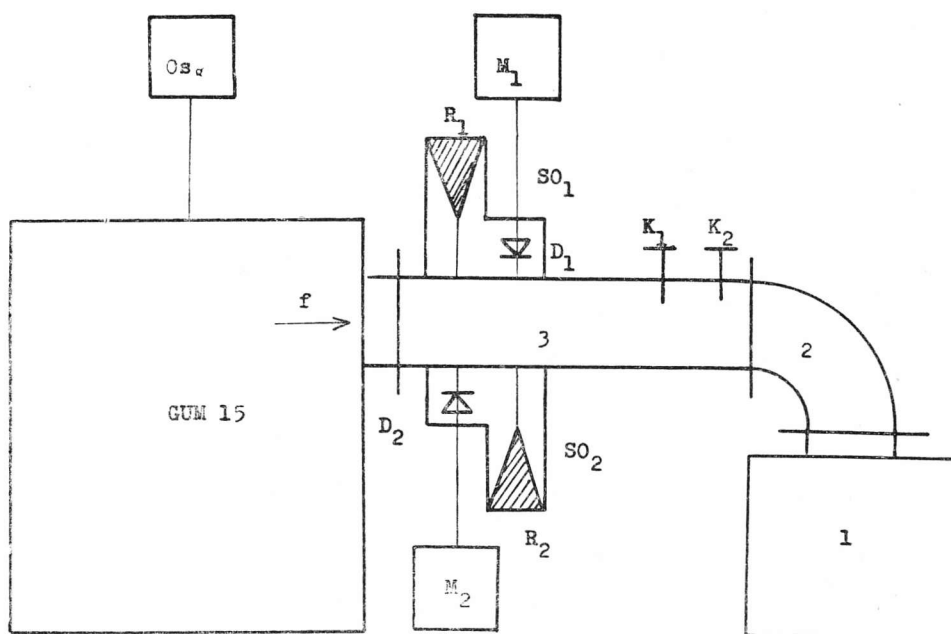
Energiu P musí dodať mikrovlnový generátor.

Experimentálna časť

Rozmrazovanie skladovaných blokov masla

Na vytvorenie podmienok pre rozmrazovanie blokov masla, ktoré sa používa v potravinárstve (rozmery $28 \times 28 \times 39$ cm) sa navrhol a vyrobil adaptér (obr. 5). Vzorky pred uložením do vlnovodu sa zmrazili na skladovaciu teplotu $-18,2$ a -14 °C.

Pri meraní sme postupovali tak, že sme pozdĺž vlnovodu vložili 4 vzorky masla o hmotnosti 25,4 kg. Vzorky boli v pôvodnom balení, t. j. v kartóne a pergamenovom papieri. Vzorky sme počas ohrevu vo vlnovode nepohybovali. Ohrev sme začali so zníženým výkonom magnetrónu, pričom jeho žeraviaci prúd bol 100 % nominálnej hodnoty. Oteplenie vzoriek sme merali po 5,5 minútach. Medzi dvoma ohrevmi bola prestávka 8 min na nameranie hodnôt. Prestávka na meranie je potrebná, pretože zatiaľ nemáme zariadenie na sní-



Obr. 5. Schéma adaptéra a jeho pripojenia na GUM 15.

1 — ohrievacia komora, 2 — vlnovodný ohyb, 3 — merací a ladiaci vlnovodný úsek, SO₁, SO₂ — smerové odbočky, R₁, R₂ — zakončovacie odpory, D₁, D₂ — detekčné diódy, M₁, M₂ — meracie zariadenie, K₁, K₂ — reaktančné kolíky, Os — osciloskop.

Tab. 1. Ohrev masla (3 vzorky à 25,4 kg + kartón) magnetrónom

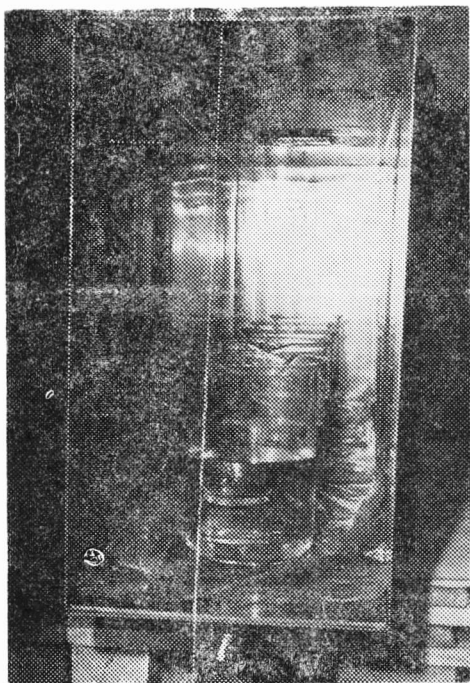
Čas ohre- vu (min)	Magnetron				Po- stup- ná vlna (μ A)	Od- raze- ná vlna (μ A)	Teploty vzoriek (°C)			Poznámka
	mag- netic- ké pole (A)	anó- dový prúd (A)	anó- dové na- pätie (kV)	prí- kon (kW)			1	2	3	
5,5	1,62	0,5	9,5	4,75	31,6	158	-6	-7	-5	Základná teplota vzoriek -18,2 °C prestávka Meranie vzoriek
8										
5	1,62	0,5	9,5	4,75	31,6	158	-3	-1	-3	

manie priebehu teplôt predmetov ohrievaných mikrovlnovou energiou. Name-
rané hodnoty uvádza tabuľka 1. (Hodnoty postupnej a odrazenej vlny sa odčítali
priamo z meracích prístrojov s rôznymi konštantami.)

Ďalšie typické merania s maslom sa urobili podobne, ale so zvýšeným výko-
nom magnetrónu a pri 50 % žeraviacom prúde. Zvýšený príkon energie do blo-
kov masla sa prejavil v intenzívnejšom stúpaní teploty (pozri obr. 3) (— kriv-

ka rozmrazovania pomocou mikrovlnovej energie, príkon 10 kW). Za 18 min sa dosiahla teplota vzoriek 6 °C. Vzorky sa vo vlnovode po každom meraní presúvali o jedno miesto dopredu, podobne ako predpokladáme v prevádzkovej praxi pohyb materiálu.

Na overenie ohrevu v jednotlivých častiach vlnovodu sa urobili pokusy so vzorkami 5×2 litre pitnej vody. Nádoby sa rozložili vo vlnovode pozdĺžne (obr. 6).



Obr. 6.

Na zhomogenizovanie poľa vo vlnovode sa do vlnovodu namontoval homogenizátor. Ďalšie pokusy sa urobili s 5×2 litrami vody. Nádoby sa rozložili vo vlnovode podobne ako pri predchádzajúcom meraní.

Zhodnotenie merania

Pri každom rozmrazovaní masla mikrovlnovou energiou je intenzita rozmrazovania veľmi vysoká oproti konvektívnemu spôsobu (pozri obr. 3). V princípe možno intenzitu rozmrazovania ešte zrýchlovať, pravda, na úkor homogenity ohrevu. V tomto smere bude potrebné urobiť ešte viac pokusov na zhotovenom adaptéri, prípadne urobiť úpravy na vlnovode, aby sa dosiahla maximálna homogenita ohrevu masla, postačujúca na ďalšie technologické spracovanie.

Problémom pri rozmrazovaní je, že kryštály ľadu sa menia na vodu, a tým vzorka mení svoje dielektrické vlastnosti. Dielektrické straty pri rozmraze-

nej vzorky sú väčšie ako pri zmrazenej. Vzniká snaha sústrediť energiu na rozmrazené oblasti rozmrazovanej vzorky. Preto treba upraviť intenzitu poľa v mikrovlnovom tuneli tak, aby väčšia intenzita bola na tej strane, kde budú zmrazené bloky vstupovať, a pri výstupe z tunela intenzitu znížiť. Na zrovnomenenie povrchových teplôt bude vhodné urobiť prípadne pokusy s povrchovým ofukovaním.

Na zrovnomenenie ohrevu sa javí možnosť cyklického prerušovania prívodu mikrovlnovej energie. Cyklické prerušovanie výkonu dovoľuje prevádzka magnetrónu. Ďalšie pokusy bude potrebné zamerať na dosiahnutie optimálneho režimu pri rozmrazovaní. Výsledky meraní pri doterajších pokusoch sú veľmi cenné pre návrh nového zariadenia. Podľa doterajších výsledkov pokusov a predbežných záverov treba orientovať vývoj zariadenia buď s magnetrónom o výkone 15 kW, buď vytvoriť viac blokov s magnetrónmami o výkone 2 kW.

Predbežný návrh zariadenia na rozmrazovanie masla

Pri predbežnom návrhu zariadenia vychádzame z úvah a výsledkov meraní uvedených v predchádzajúcich kapitolách. Energia potrebná na rozmrazenie bloku masla z -18 na $+15^{\circ}\text{C}$ o hmotnosti 25,4 kg je

$$\begin{aligned} P &= cG \Delta t = 1,263 \cdot 4,186 \cdot 25,4 \cdot 31, \\ &= 4166 \text{ kWs}, \\ &= 1,157 \text{ kWh}. \end{aligned}$$

Ak uvažujeme, že by sme chceli rozmraziť jeden blok masla za 6 minút, potom treba privádzať elektrický výkon vo forme mikrovlnovej energie

$$N = \frac{P}{t} = \frac{4166}{360} = 11,57 \text{ kW}.$$

Špecifická teplota masla sa pokladá za priemernú hodnotu z priebehu entalpie od -18 do $+15^{\circ}\text{C}$ (pozri obr. 1). Pre tepelný výkon 11,57 kW možno v návrhu využiť magnetrón o výkone 15 kW alebo 6 magnetrónov o výkone 2 kW. Ak uvažujeme celkovú energetickú účinnosť zariadenia 0,52 %, potom na rozmrazovanie jedného bloku masla by sa spotrebovalo

$$P' = \frac{P}{\eta} = \frac{1,157}{0,52} = 2,22 \text{ kWh}.$$

Cena energie na rozmrazenie jedného bloku masla je 77 halierov a na 40 blokov (1000 kg) 31,— Kčs (ak 1 kWh stojí 35 hal.). Uvedené výkonové úvahy vychádzajú z podmienok pečiarne, kde je maximálna spotreba masla do 1000 kg na jednu prevádzkovú smenu. V prípade využitia zariadenia na rozmrazovanie blokov masla pre potreby v mliekárskom priemysle budú potrebné vyššie výkony. Pri konečnom návrhu prototypového zariadenia treba vychádzať z podmienok konkrétnej realizácie.

Záver

Predbežné pokusy s rozmrazovaním pomocou mikrovlnovej energie ukázali, že táto energia je vhodná na rozmrazovanie blokov masla. Pri ďalších experimentoch bude potrebné hľadať optimálnu homogenitu elektromagnetického poľa v mikrovlnovom tuneli, ako aj homogenitu ohrevu.

Zariadenie bude pracovať s dobrou účinnosťou premeny elektrickej energie na tepelnú a s vyššou účinnosťou ako všetky zariadenia pracujúce na konvektívnom ohreve. Mikrovlnový ohrev potravín v domácnostiach i priemysle je už dosť rozšírený v niektorých krajinách. U nás jeho rozšírenie naráža na ekonomické problémy. S výstavbou atómových elektrární súvisí predpoklad, že v budúcnosti bude dostatok elektrickej energie (uhlie, nafta, zemný plyn sú vyčerpateľné).

Súhrn

V článku sa porovnáva konvektívny spôsob rozmrazovania blokov masla pri normálnej prevádzkovej teplote okolia 18 až 29 °C s mikrovlnovým. Urobil sa výpočet priebehu teploty v bloku masla pri konvektívnom rozmrazovaní, ktorý potvrdzuje potrebu dlhého času rozmrazovania. V článku sa ďalej uvádzajú spôsoby rozmrazovania a ohrievania v mikrovlnovom tuneli pri uvedenej frekvencii, ďalej návrh výkonu zariadenia a náklady na spotrebovanú energiu.

Literatúra

1. IBL, V.: Chladicí technika. Příprava a distribuce potravin.
2. VAVRÍK, A.: Uplatnenie dielektrického a mikrovlnového ohrevu pri rozmrazovaní. Bull. VÚP, Bratislava, XV, 1976, č. 4, s. 30.
3. ZELNÍK, A. — MADLO, V.: Tepelné pochody. Bratislava, Strojnícka fakulta SVŠT.
4. PLANK, R.: Handbuch der Kältetechnik. Berlin, Springer-Verlag 1960.
5. TOGOROV — CORBATOV: Fizičeskije metody obrabotky pisčevykh produktov. Moskva, Pischevaja promyšlennost 1974.
6. DORGELO, E. D.: Senderöhren für industrielle Zwecke. Phil. techn. Rundschau, 20, 1959, č. 9, s. 259.
7. PÜSCHNER, H.: Heating with Microwave. Fundamentals Components and Circuit Technique. 1966.
8. KVASIL, B.: Technické základy techniky centimetrových vln. Praha, SNTL 1957.
9. VOTRUBA, V. — MUZIKÁŘ, Č.: Theorie elektromagnetického pole. Praha 1958.
10. MEGLA, G.: Dezimeterwellentechnik. Leipzig, Fachbuchverlag 1955.
11. SVČ energetika. Tom. I. Generirovanije, peredača, vyprjamlenije. Moskva, Izd. Mir 1971. (Preklad z angl.)
12. SVČ energetika. Tom. II. Primenenije enerhii sverchvysokich častot v promyšlennosti. Moskva, Izd. Mir 1971. (Preklad z angl.)
13. HABOVČÍK, P. — BURÍN, M.: Mikrovlnová a kvantová elektronika. Bratislava, Elektrotechnická fakulta SVŠT (skriptá).
14. Magnetrony. Praha, Tesla VÚVET (katalóg).
15. Mikrovlnné průtokové aplikační zařízení. Praha, ZEZ, n. p. 1974 (opis a návod na obsluhu).
16. FRIČ — STARÝ — DOHNÁLEK: Vývoj magnetronů v Tesla — VÚVET, Praha. Slaboprúdový obzor, 1977, č. 1, s. 10.

Ваврик, А.

Размораживание микроволновой энергией

Выводы

В статье сравнивают конвекционный способ размораживания блоков сливочного масла при нормальной эксплуатационной температуре среды от 18 °С до 29 °С с микроволновой. Проведено вычисление протекания температуры в блоку сливочного масла при конвекционном размораживании, которое подтверждает необходимость длительного времени размораживания. В статье далее приводятся способы размораживания и обогрева в микроволновом туннеле при данной частоте, далее предложение мощности оборудования и затраты на потребляемую энергию.

Vavřík, A.

Microwave energy de-freezing

Summary

In the article convection de-freezing of butter blocks at normal operational surrounding temperature of 18 °C to 29 °C with microwave de-freezing is compared. Calculation of temperature course in butter block at convection de-freezing, which acknowledges a need of long time for de-freezing, was performed. Further are introduced methods of de-freezing and warming in microwave tunnel at stated frequency, design of equipment capacity and power costs.