

# Intenzifikácia chladenia chleba a ostatných pekárenských výrobkov

L. CHRIAŠTEL

Donedávna sa zo všetkých častí výrobného procesu v pekárni najmenej pozornosti venovalo chladeniu chleba a ostatných pekárenských výrobkov. So zvyšovaním mechanizácie a postupným zavádzaním automatizácie v pekárňach treba zdokonaľiť aj tento proces. Objavili sa rozličné návrhy, ktoré mali urýchliť a zmechanizovať chladenie. V tridsiatych rokoch existovalo v USA niekoľko chladiacich tunelov. Tieto zariadenia sa postupne zdokonaľovali. Konštrukcie sú v podstate dvojaké: otvorené, v ktorých chlieb chladne voľne na dlhých dopravníkoch, a uzavreté s núteným obehom chladiaceho vzduchu upraveného na požadovanú teplotu a vlhkosť. Aby sa ušetril priestor, bývajú dopravné dráhy niekoľkokoposchodové, zavesené na strope a v pôdoryse majú tvar písmena U.

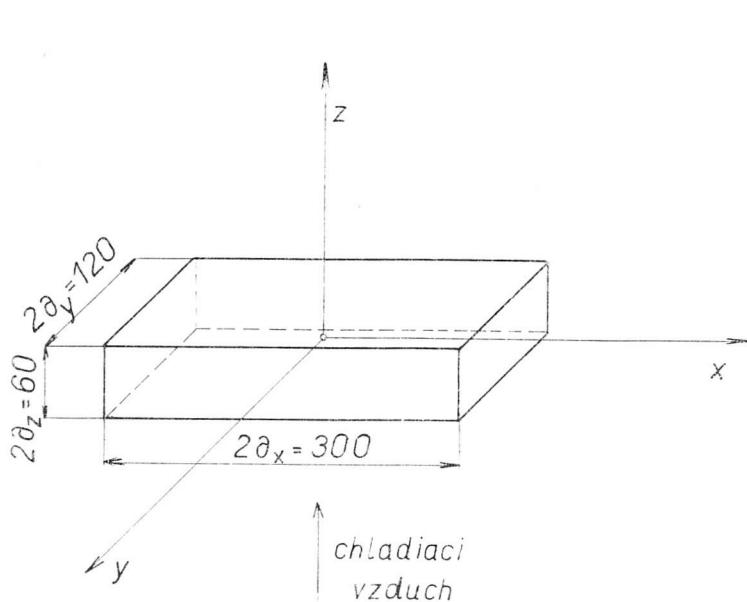
Taylor [1] vo svojom článku uvádza chladiaci tunel "Axiflow" fy Spooner Engineering Co., Ltd., ktorý vychladí 10 800 kusov chleba — hmotnosť jedného je 0,8 kg — za 160 min. Chlieb vchádza zospodu, prechádza tunelom, ochladzuje sa, zbavuje sa časti vody a ochladený vychádza z hornej časti tunela. Chladiaci vzduch sa odťahuje z atmosféry a upravuje na 85% relatívnej vlhkosti. Vzduch z komory odsáva druhý ventilátor. Pozrime sa bližšie na tento proces chladenia chleba. Experimentálne sme zistili, že pri voľnom chladení 1 kg slovenského výberového chleba zo 100 na 25 °C sa odparí 0,02 kg vody. Na jej odparenie sa využije časť fyzického tepla materiálu. Podľa vzťahu, ktorý uvedieme, týmto odparením sa zníži teplota chleba o 20 °C. Zvyšné množstvo tepla sa odvedie chladiacim vzduchom. Ak predpokladáme vstupnú teplotu vzduchu 21 °C a výstupnú teplotu vzduchu 29 °C (podľa údajov v [1]) a protiprúdový pohyb vzduchu vzhľadom na chlieb, môžeme predpokladať výstupnú teplotu chleba 25 °C. Potom potrebné množstvo vzduchu bude

$$V = 11,8 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Na dopravu tohto množstva treba ventilátor s elektromotorom o výkone 30—40 kW.

Chladenie chleba je nestacionárnym dejom vedenia tepla. Uvažujme, ako zvyšovanie rýchlostí prúdenia vzduchu prispieva na zintenzívnenie tohto procesu. Pre naše výpočty si zjednodušíme tvar zleba na hranol o rozmeroch

300 × 120 × 60 mm s jednotnou začiatočnou teplotou v celom objeme  $T_0$  (obr. 1). Ďalej predpokladajme, že prostredie okolo chleba má konštantnú teplotu  $T_f$ , že tepelno-fyzikálne veličiny  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$  sú konštantné a rovnaké pre celý objem, podobne i súčiniteľ prestupu tepla  $\alpha$  z povrchu chleba do vzduchu je konštantný na celom povrchu. Tepelno-fyzikálne veličiny chleba uvádza Ginzburg [10]; sú odlišné pre striedku a kôrku. Pri vlhkosti 42,5% hm. v striedke  $\rho = 545 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,249 \text{ W/mK}$  a v kôrke  $\rho = 420 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,055 \text{ W/mK}$ .



$$Fo_x = \frac{\lambda \cdot t}{\rho \cdot c \cdot a_x^2}$$

$$Bi_x = \frac{\alpha \cdot a_x}{\lambda}$$

Rozdielnosť vlastností kôrky a striedky značne komplikuje celý výpočet. Účelom našich úvah nie je však presne určiť čas chladnutia. Chceme tu predovšetkým poukázať na to, že aj keď chladenie núteným pohybom vzduchu urýchľuje proces (ktorý však i tak trvá viac ako 2 hod.), je z hľadiska podstatného zintenzívnenia omnoho výhodnejšie urobiť zásah do samého chleba. Pre naše ďalšie úvahy a výpočty preto celkom postačia tieto údaje:  $c = 2,5 \text{ kJ/kgK}$  (lit. [2]),  $\rho = 500,0 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,2 \text{ W/mK}$ . Súčiniteľ prestupu tepla z povrchu chleba do prostredia  $\alpha$  pre voľnú konvekciu si určíme z nomogramu [3]. Pre strednú teplotu vzduchu  $25^\circ\text{C}$  a charakteristický rozmer — hrúbka 6 cm,  $\alpha = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Pri nútenom prúdení si  $\alpha$  určíme z kritériálneho vzťahu  $Nu = f(Re, Pr)$ . Pri

$$d_e = \frac{4 \cdot S}{O} = \frac{4 \cdot 6 \cdot 12}{36} = 8 \text{ cm},$$

bude pri rýchlosti vzduchu 5 m/s  $\alpha = 22,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  a pri rýchlosti vzduchu 10 m/s  $\alpha = 39,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Teória nestacionárneho ochladzovania hranola je podrobne rozpracovaná v literatúre, napr. v [4]. Určíme si, ako sa bude meniť teplota v strede fiktívneho tvaru chleba po hodinových intervaloch pri voľnom ochladzovaní a pri nútenom ochladzovaní prúdom vzduchu o rýchlostiach 5 a 10 m/s. Pre zmenu teploty s časom v hranole platí

$$\frac{T - T_f}{T_0 - T_f} = \left( \frac{T - T_f}{T_0 - T_f} \right)_x \cdot \left( \frac{T - T_f}{T_0 - T_f} \right)_y \cdot \left( \frac{T - T_f}{T_0 - T_f} \right)_z, \quad (1)$$

kde

$$\left( \frac{T - T_f}{T_0 - T_f} \right)_x = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cdot e^{-\mu_i^2 \cdot Fo} \cdot \cos \left( \mu_i \frac{x}{\delta_x} \right) \quad (1a)$$

a podobne v smere  $y$  a  $z$ . Pri odvodení tejto rovnice sa vychádza z Fourier–Kirchhoffovej rovnice v kartézskej súradnicovej sústave, pričom sa neuvažuje konventívny člen. Ďalej sa postupuje Fourierovou metódou.

Konštantu  $\mu_i$  si určíme z charakteristickej transcendentnej rovnice

$$\cotg \mu = \frac{\mu}{Bi}. \quad (2)$$

Jej hodnoty sú tabelizované v závislosti od Biotovho čísla. Podobne je to s konštantou  $A$  (pozri [4]).

Pre náš prípad sa rovnica (1a) zjednoduší, pretože uvažujeme s teplotou v strede chleba. Vtedy  $(x/\delta_x) = 0$  a  $\cos [\mu_i \cdot x \cdot \delta^{-1}] = 1$ ; podobne je to i v smere  $y$  a  $z$ . Po dosadení príslušných konštánt dostávame teploty chleba v rozličných časoch (tab. 1).

Tabuľka 1

Čas (h)	Teplota chleba (°C)		
	voľne chladený	chladený vzduchom s rýchlosťou prúdenia	
		5 m/s	10 m/s
1	80	57	51
2	57	34	31
3	43	28	26
4	35	26	25
5	31	25	25

Z tabuľky vidieť, že zrýchľovanie pohybu vzduchu z 5 na 10 m/s neprináša skoro nijaké urýchlenie chladnutia. Podobne by to bolo pri ďalšom zvyšovaní rýchlosti chladiaceho vzduchu. Tento rozbor nám ukazuje, že ďalšie zintenzívnenie procesu pri ofukovaní nie je prakticky možné — čas chladnutia sa prakticky pohybuje od 2 do 3 hod.

Uvedený príklad (aj keď zjednodušuje skutočné deje — zanedbáva odparovanie vlhkosti i difúziu stránku), dobre vystihuje podstatu deja — rozhodujúcim činiteľom sú tepelno-fyzikálne vlastnosti chleba, keďže k prestupu tepla

v ňom dochádza iba vedením. Ak chceme výrazne urýchliť chladenie, musíme urobiť zásahy do tej časti sústavy, ktorá podstatne vplýva na daný proces. V našom prípade je to sám chlieb. Preto sa objavili riešenia, ktoré pomocou tenkých dutých ihlíc — trysiek vháňajú chladiaci vzduch priamo do striedky chleba (pozri [2, 5]), pričom sa chlieb nastrčí na ihly. Tento spôsob je však z prevádzkového hľadiska veľmi náročný a investične nákladný; porušuje sa i celistvosť kôrky.

Podstatné zintenzívnenie procesu predstavuje vákuové chladenie chleba a ostatných pekárenských výrobkov. Roku 1929 sa po prvý raz skúšalo v prevádzke [2]. Chladilo sa v dvoch stupňoch: chlieb prechádzal cez tunel, kde sa ochladzoval vlhkým vzduchom o nastavenej teplote a vlhkosti, z tunela vstupoval do vákuovej komory, v ktorej sa dochladzoval na požadovanú teplotu.

Všeobecný záver z použitia tohto typu chladenia bol, že je veľmi účinné a rýchle a predstavuje značnú intenzifikáciu procesu. Dochádza pri ňom však k väčšiemu úbytku vlhkosti z produktu a pri rýchlom odťahu vzduchu z komory môže nastať deštrukcia chleba, preto sa od tohto spôsobu chladenia chleba na istý čas upustilo. Medzitým sa však vákuové chladenie začalo používať v iných odvetviach potravinárskeho priemyslu. Patent na vákuové chladenie šalátu udelili roku 1944 v USA [6]. Ďalej sa použilo i na chladenie húb a niektorých záhradných plodov [6, 7]. Tento spôsob umožňuje zachovať sviežosť zeleniny a ovocia. Používa sa najmä pri transporte na dlhšie vzdialenosti. Výhody vákuového chladenia sú:

1. je rýchle — trvá 10—20 min.;
2. zaručuje rovnomerné schladenie po objeme — maximálne rozdiely sú do 1 °C;
3. s produktmi je ľahká manipulácia — možno chladit v debničkách;
4. je lacné a zariadenie sa ľahko ovláda;
5. nepoškodzujú sa pri ňom plody, pretože teplotu možno ľahko kontrolovať. Je výhodné najmä pri produktoch, ktoré sa nesmú zmraziť;
6. strata vlhkosti je malá.

Začiatkom tohto desaťročia sa začala vákuovým chladením chleba a ostatných pekárenských výrobkov intenzívne zaoberať anglická firma Tweedy of Burnley Ltd. a podarilo sa jej problém úspešne vyriešiť. Nadmernému úbytku vlhkosti zabránili výskumníci tejto firmy tak, že skrátili čas pečenia — napr. pri viedenskom chlebe z 25 na 17 min. Skrátenie je pri jednotlivých výrobkoch rozličné a pohybuje sa od 4 do 10 min. Ak by sme produkt so skráteným časom pečenia nechali chladnúť konvenčným spôsobom (voľnou alebo nútenou konvekciou), chlieb by sa vlastnou váhou zdeformoval a nebol by celkom vypečený. Pri vákuovom chladení prebehne dopečenie chleba vo vákuovej komore. Týmto predčasným vytiahnutím chleba z pece sa zabráni nadmernej strate vlhkosti.

Chlieb ochladený vákuovým spôsobom má rovnomerne rozdelenú vlhkosť, podobne sa okamžite vyrovná i teplota v celom objeme. Pri chlebe chladenom konvenčným spôsobom je rozdiel medzi obsahom vody v strede striedky a v kôrke 12%, kým pri vákuovo chladenom chlebe je to 1—6%. Skúšky so skladovaním vákuovo chladeného chleba ukázali ďalšie výhody tejto metódy:

1. produkt sa chladí v sterilnom vákuovom prostredí a po skončení cyklu sa atmosferický vzduch prepúšťa cez mikrobiologický filter;

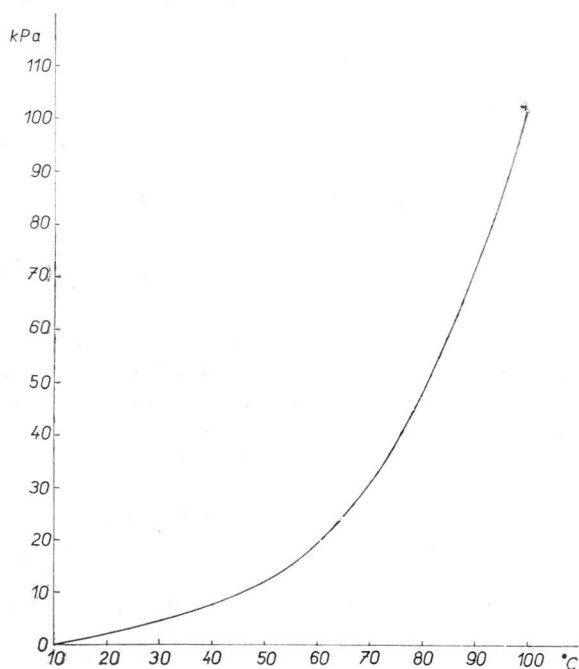
2. po výstupe chleba z komory nehrozí nebezpečenstvo, že by došlo k regenerácii baktérií — teplota je nižšia ako teplota priaznivá pre ich rozmnožovanie;

3. ak sa aj počas plniaceho cyklu dostanú niektoré baktérie so vzduchom do komory, výveva ich odtiahne spolu so vzduchom.

Skúšky so skladovaním vákuovo chladeného chleba ukázali, že životnosť sa predĺžila dvojnásobne, t. j. z 11 na 21 dní. Vákuovací proces trvá 0,5—4 min. (podľa druhu výrobku), predstavuje teda značnú intenzifikáciu v porovnaní s konvenčným spôsobom chladenia. Je to v dôsledku varu vody, ktorý nastáva v celom objeme chleba.

Vákuovým chladením chleba sa zaoberá i nórsky patent [8].

Pozrime sa bližšie na tento progresívny spôsob chladenia z fyzikálneho hľadiska. Predovšetkým treba spomenúť, že sa pohybujeme v oblasti nízkeho vákuu, t. j. nad 133 Pa (nad Knudsenovou oblasťou). Horúci produkt sa vloží do vákuovej komory a odsávaním vzduchu dochádza k nepretržitému varu vody. Určitému tlaku zodpovedá určitý bod varu. Túto závislosť teoreticky vystihuje Clausius—Clapeyronova rovnica, avšak pre vodnú paru máme k dispozícii výsledky presných meraní (obr. 2).



Obr. 2.

Zdrojom tepla na vyparovanie vody z materiálu je v tomto prípade sám materiál, tým zároveň dochádza k znižovaniu jeho teploty.

Kvôli zjednodušeniu najprv predpokladajme, že vo vákuovej komore máme horúcu vodu o začiatkovej teplote  $T_1$  a hmotnosti  $m_{v1}$ . Množstvo odparenej vody pri klesnutí tlaku na  $p_2$ , čomu zodpovedá teplota  $T_2$ , si určíme takto:

pri infinitezimálnej zmene teploty vody sa vyparí množstvo vody  $dm_p$ . Platí tepelná bilancia

$$(m_v - dm_p) \cdot c_v \cdot dT = r_v \cdot dm_p, \quad (3)$$

pričom zanedbávame zmenu entalpie vzduchu a vodnej pary a predpokladáme konštantnosť špecifického tepla. Platí

$$dm_p = dm_v. \quad (4)$$

Pre zmenu výparného tepla vody s teplotou možno v rozmedzí 0—100 °C odvodiť závislosť

$$r_v = 2490 - 2,3 T, \quad (5)$$

ktorú sme si určili z tabuliek nasýtenej vodnej pary z [3]. Po dosadení (4) a (5) do (3), zanedbaní člena druhého poriadku, integrácií a úprave dostaneme množstvo vody, ktoré zostalo v komore

$$m_{v2} = m_{v1} \left( \frac{2490 - 2,3 T_2}{2490 - 2,3 T_1} \right)^{-(c_v/2,3)}. \quad (6)$$

Ak máme vákuovú komoru s objemom parného priestoru  $V = 4,4$  l, do ktorej vlejeme 0,6 kg vody, bude množstvo vyparenej vody vypočítané zo vzorca (6) pri jej ochladení zo 70 na 26 °C

$$m_p = m_{v2} - m_{v1} = 0,600 - 0,556 = 0,044 \text{ (kg)},$$

pričom

$$c_v = 4,19 \text{ kJ/kgK}.$$

Pokusom za týchto podmienok pri barometrickom tlaku 99,90 kPa a konečnom tlaku 3,53 kPa v tepelne zaizolovanej nádobe sme získali 0,042 kg vody.

Pri chlebe, ktorý chladíme vákuovým spôsobom, určíme si množstvo vyparenej vody pri zmene teploty z  $T_1$  na  $T_2$ . Platí tepelná bilancia

$$(m_v + m_s - dm_v) \cdot c \cdot dT = dm_v \cdot (2490 - 2,3 \cdot T), \quad (7)$$

pričom sme použili rovnaké zjednodušenia ako pri odvodzovaní vzťahu (6)

Po roznásobení a úprave (7) dostaneme diferenciálnu rovnicu

$$\frac{dm_v}{dT} = \frac{(m_v + m_s) \cdot c}{2490 - 2,3 \cdot T}. \quad (8)$$

Jej riešením získame konečné množstvo vody v chlebe po znížení teploty na  $T_2$ :

$$m_{v2} = (m_{v1} + m_s) \cdot \left( \frac{2490 - 2,3 T_2}{2490 - 2,3 T_1} \right)^{-(c/2,3)} - m_s. \quad (9)$$

Pri slovenskom výberovom chlebe s hmotnosťou 1 kg je  $m_{v1} = 0,47$  kg,  $m_s = 0,53$  kg,  $T_1 = 100$  °C,  $T_2 = 20$  °C, z [2]  $c = 2,5$  kJ/kgK.

Potom

$$m_{v2} = 1 \cdot \left( \frac{2490 - 2,3 \cdot 20}{2490 - 2,3 \cdot 100} \right)^{-(2,5/2,3)} - 0,53,$$

$$m_{v2} = 0,92 - 0,53 = 0,39 \text{ (kg)}$$

a množstvo vyparenej vody

$$m_p = m_{v1} - m_{v2} = 0,08 \text{ (kg)} .$$

Ako sme už spomenuli, voľným chladnutím na vzduchu sa stratí 0,02 kg vlhkosti.

Prechod pár pórami zo striedky chleba cez kôrku a do parného priestoru vákuovej komory prebieha o niečo pomalšie ako pri vákuovom varení samej vody. Dochádza tu k istému oneskoreniu. Ak sa odťahuje vzduch veľmi rýchlo, môže toto oneskorenie zapríčiniť taký rozdiel tlakov vo vnútri chleba a v parnom priestore komory, že dôjde k porušeniu kôrky. V patente [8] sa odporúča maximálna rýchlosť poklesu tlaku 8 kPa/s do tlaku 50 kPa, potom môže byť väčšia.

Vákuové chladenie chleba a ostatných pekárenských výrobkov je veľmi perspektívna metóda. Umožňuje podstatne skrátiť proces od pece po expedíciu, a preto bude znamenať značný prínos pri intenzifikácii a automatizácii pekárenskej výroby.

### Použité skratky

$A$	konštanta	
$c$	merné teplo chleba	(kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$c_v$	merné teplo vody	(kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$d_e$	ekvivalentný priemer	(m)
$m_p$	hmotnosť vodných pár	(kg)
$m_s$	hmotnosť sušiny	(kg)
$m_v$	hmotnosť vody	(kg)
$O$	zmáčaný obvod	(m)
$p$	tlak	(Pa)
$r_v$	výparné teplo vody	(kJ kg <sup>-1</sup> )
$S$	plocha	(m <sup>2</sup> )
$t$	čas	(h)
$T$	teplota materiálu v istom čase	(°C)
$T_f$	teplota okolitého vzduchu	(°C)
$V$	objem	(m <sup>3</sup> )
$x, y, z$	súradnice	
$\alpha$	koeficient prestupu tepla	(W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )
$\delta$	hrúbka	(m)
$\lambda$	koeficient tepelnej vodivosti	(W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$\rho$	hustota	(kg m <sup>-3</sup> )

### Indexy

0,1	začiatočný stav
2	konečný stav

### Bezrozmerné kritériá

Nu	Nusseltovo číslo
Re	Reynoldsovo číslo

Pr	Prandtlovo číslo
Fo	Fourierovo číslo
Bi	Biotovo číslo

## Súhrn

Článok sa zaoberá rozličnými druhmi chladenia chleba, pričom sa zameriava najmä na intenzifikáciu. Na konkrétnych príkladoch porovnáva výhodnosť jednotlivých spôsobov chladenia. Podrobne sa zaoberá najmä vákuovým chladením chleba, ktoré podstatne urýchľuje tento dej. Odvodzujú sa v ňom výpočtové vzťahy pre množstvo vyparenej vody.

## Literatúra

1. TAYLOR, E. G.: Baking Ind. J., 12, 1970, s. 30—36.
2. EUVERARD, M. R.: The Bakers Digest, 6, 1972, s. 46—49, 65.
3. PAVLOV, K. F. — ROMANKOV, P. G. — MALKOV, M. P. — NOSKOV, A. A.: Příklady a úlohy k přednáškám o pochodech a přístrojích chemické technologie. Praha, SNTL 1953 (český překlad).
4. ZELNÍK, A. — MADLO, V.: Tepelné pochody. I. Úlohy tepelnej vodivosti. Bratislava, SVŠT 1976.
5. Franc. patent 1260912.
6. LONGMORE, A. P.: Food Trade Rev., 12, 1970, s. 29—31.
7. Canad. Food Ind., 2, 1971, s. 17, 18.
8. Nórsky pat. 132670.
9. BRADSHAW, W.: The Bakers Digest, 2, 1976, s. 26—31.
10. GINZBURG, A. S.: Piščevoja promyšlennost'. Praha 1960 (archív VÚPP Praha).

## Интенсификация охлаждения хлеба

### Выводы

Статья трактует о различных видах охлаждения хлеба и вместе с тем ориентируется главным образом на интенсификацию. На конкретных примерах сравнивает выгодность отдельных способов охлаждения. Подробно занимается особенно вакуумным охлаждением хлеба, значительно ускоряющим этот процесс. Выведения также вычислительные зависимости для количества испаренной воды.

## The intensification of bread cooling

### Summary

The study deals with various kinds of bread cooling with a view mainly to intensification. On concrete examples the advantage of single cooling kinds is compared. In detail especially the vacuum bread cooling, which essential speeds up this action, is treated. The calculation relations for quantity of evaporated water are also in this study derived.