

Teoretické základy využitia mikrovlnového ohrevu v potravinárskom priemysle

M. GRODOVSKÝ

Finálna úprava a uchovávanie potravín vyžaduje často aplikáciu tepla, ktoré je potrebné, aby inaktivovalo enzýmy a zničilo nežiadúce mikroorganizmy. Teplom sa menia aj fyzikálne a zmyslové vlastnosti potravín, ako je farba, konzistencia a chuťnosť. Okrem želateľných zmien prebiehajú pritom i neželateľné, ako sú napr. straty nutritívne významných látok.

Medzi želateľné zmeny patria:

1. fyzikálna zmena povrchu, zmena konzistencie,
2. deštrukcia mikroorganizmov (pasterizácia, sterilizácia),
3. deštrukcia enzýmov pôsobujúcich kazenie potravín,
4. zvýšenie prístupnosti živín (stráviteľnosti mäsa a škrobu), zvýšenie chutnosti,
5. deštrukcia nevítaných zložiek potravín (avidín vo vaječnom bielku, trypsínový inhibítor v strukovinách a pod.).

Medzi neželateľné tepelné zmeny patria straty aminokyselín, denaturácia bielkovín, zmeny cukrov a tukov, straty vitamínov a minerálií.

Tieto straty sú rozdielne, závisia okrem výšky použitej teploty od jej trvania, ďalej od pH prostredia, prítomnosti kyslíka, vlhkosti, ochranných látok a iných faktorov. Z aminokyselín sú termolabilné najmä lyzín a treonín. Termolabilite jednotlivých cukrov a tukov sa venuje pozornosť skôr vzhľadom na reakčné splodiny a ich toxicitu, napr. prepaľované tuky. Z vitamínov sú nestálejšie tie, ktoré sú rozpustné vo vode, ako vitamín B₁ — tiamín, kyselina askorbová, vitamín D a kyselina pantoténová. Značné straty týchto vitamínov nastávajú najmä počas prania a blanšírovania, keď sa vyplaví aj najviac minerálií.

Úsilie zmenšiť alebo vylúčiť tieto straty pri tepelnom spracovaní potravín viedlo k hľadaniu nových, progresívnych zdrojov tepla, ktoré by skrátili čas potrebný na tepelnú úpravu. Vhodná na to sa ukázala mikrovlnová energia. Pôsobením mikrovlnovej energie možno podstatne skrátiť čas tepelného pôsobenia oproti klasickým aplikáciám tepla. Tento nový spôsob — aplikácia mikrovlnovej energie — vyvolal na jednej strane prehnané, neodôvodnené nádeje, na druhej strane však i obavy a nedôveru, ako všetky novinky. Neuškodí preto, keď si v krátkosti objasníme fyzikálnu povahu nového zdroja tepla a jeho možné účinky na biologické systémy, či živé alebo používané ako potrava.

Uvažujme o účinku mikrovĺn na molekulovej úrovni. Veľkosť poškodenia alebo všeobecne zmeny organickej hmoty sú kvalitatívne i kvantitatívne priamo úmerné množstvu absorbovaných kvánt čiže častíc, ktoré sú nositeľmi energie, prípadne sú úmerné ionizácii, ktorú absorbované kvantá spôsobia v molekule.

Kinetická energia rýchlych častíc, ako sú elektróny, neutróny, prípadne fotóny (istého konkrétneho množstva energie svetla alebo iného elektromagnetického vlnenia), vyjadruje sa zvyčajne v elektrónvoltoch (eV). Množstvo energie je potom vyjadrené vzťahom

$$E = h \cdot \gamma = 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot 1/\lambda ,$$

kde E je pohltená energia v eV,

h — Planckova konštanta,

γ — frekvencia žiarenia,

λ — vlnová dĺžka žiarenia v cm.

Zo vzťahu vidíme, že kvantum energie je nepriamo úmerné vlnovej dĺžke; teda čím bude vlnová dĺžka použitého žiarenia kratšia, tým bude účinok prenikavejší. Hmota absorbuje elektromagnetické žiarenie vo forme oddelených kvánt energie, pričom účinok závisí najmä od množstva energie obsiahnutého v jednom kvante. Energia kvánt jednotlivých typov elektromagnetického žiarenia je v tab. 1.

Z údajov v tabuľke vidíme, že mikrovlny sú na energiu veľmi chudobné, sú približne stotisíckrát slabšie ako viditeľné svetlo.

Na porovnanie, koľko energie treba na rozrušenie chemickej väzby, je v tab.

Tab. 1 — Energia rozličných typov elektromagnetického žiarenia

Typ žiarenia	Vlnová dĺžka λ cm	Energia kvanta eV
Gama žiarenie	10^{-10}	1 240 000
Žiarenie X (rtg)	10^{-9}	240 000
Ultrafialové svetlo	$3 \cdot 10^{-5}$	4,1
Viditeľné svetlo	$5 \cdot 10^{-5}$	2,5
Infračervené svetlo	10^{-2}	0,012
Mikrovlny	10	$12 \cdot 10^{-5}$
Rádiové vlny	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^{-8}$

Tab. 2 — Energia niektorých chemických väzieb

Väzba	Energia (eV)
H—OH	5,2
H—CH ₃	4,5
H—NHCH ₃	4,0
H ₃ C—CH ₃	3,8
C ₆ H ₅ CH ₂ —COOH	2,4

2 energia niektorých bežných chemických väzieb. Pri porovnaní obidvoch tabuliek vidíme, že chemické väzby môže rozrušiť iba ultrafialové svetlo alebo žiarenie s kratšou vlnovou dĺžkou, čiže energeticky bohatšie. Infračervené žiarenie rozrušuje už iba celkom slabé chemické väzby približne na úrovni vodíkových mostíkov.

Na to, aby sa absorbovaná mikrovlnová energia vyrovnala čo do účinku na chemické väzby aspoň viditeľnému svetlu, je potrebné, aby molekula materiálu súčasne absorbovala 10^5 mikrovlnových kvánt. Uvažujme, že 0,5 kg nejakej potravy absorbuje mikrovlnovú energiu v množstve 1 kW (pri vyšších hodnotách môže materiál prihorieť, prípadne nastanú iné komplikácie). 1 kW zodpovedá $6,24 \cdot 10^{21}$ eV/s. Keďže energia mikrovlnového žiarenia (jedného kvanta) je $1,2 \cdot 10^{-5}$ (tab. 1), 1 kW zodpovedá $5,2 \cdot 10^{26}$ kvánt/s. Pri priemernej molekulovej váhe 100 obsahuje 0,5 kg hmoty asi $3 \cdot 10^{24}$ molekúl. Dopadá teda pri aplikácii mikrovlnového žiarenia 170 kvánt na jednu molekulu za sekundu. Aby sa to vyrovnalo účinku viditeľného svetla, je potrebné, ako sme spomenuli, minimálne 10^5 kvánt (o toľko menej energie nesie jedno kvantum mikrovlnovej energie, vlastne žiarenia, ako kvantum viditeľného svetla). V inom prípade má molekula čas vyrovať sa s týmto energetickým šokom premenou pohltenej energie na teplo a tepelným vyrovnaním s okolím. Deje sa to zvýšenou transláciou alebo vibráciou molekuly, čo má za následok zvýšenie teploty. Z uvedených úvah vidíme, že pri aplikácii mikrovlnovej energie na molekulu sa mení pohltená energia prednostne na teplo bez toho, aby dochádzalo k chemickým zmenám, ionizácii alebo tvorbe radikálov. Na vznik týchto látok je potrebné žiarenie s omnoho vyššou energiou kvanta.

Áký je teda rozdiel medzi mikrovlnovým ohrevom a konvenčnými spôsobmi? Klasické spôsoby aplikácie tepelnej energie spočívajú vo vedení alebo sálaní tepla, pričom tepelný gradient teploty klesá od povrchu telesa smerom dnu. Klasickým príkladom je pečenie chleba: kým vrchná vrstva sa mení na kôrku, škrob vplyvom teploty 180–200 °C sa mení na dextríny, stred chleba nemá vyššiu teplotu ako 70–80 °C. Preto tepelné deje, pri ktorých sa má dosiahnuť vyššia teplota v celom objeme hmoty (chlieb, mäso a pod.), pre pomerne malú teplotnú vodivosť trvajú pomerne dlhý čas. Pri aplikácii vysokofrekvenčnej energie sa našiel spôsob, ako podstatne skrátiť čas potrebný na tepelné spracovanie potravín. Mikrovlnové žiarenie prestupuje totiž celý objem ohrievanej hmoty a v závislosti od jej elektrických vlastností vyvoláva rovnomernú teplotu odrazu v celom objeme. Pre potravinársky priemysel prichádzajú do úvahy dve formy vysokofrekvenčnej energie, a to dielektrický ohrev, ktorý pracuje s frekvenciou žiarenia v rozmedzí 10^6 – 10^8 Hz/s a s mikrovlnovým žiarením, čiže vlnením s frekvenciou 10^9 Hz, teda v oblasti centimetrových vln. Dielektrický ohrev sa využíva na rozmrazovanie rýb, vytápanie surovej slaniny, sušenie chmeľu, praženie kakaových bôbov a na iné tepelné operácie, ako to podrobne opisuje v svojom príspevku dr. Demetzky.

V našom ústave (Výskumný ústav potravinársky SPA v Bratislave) experimentujeme s mikrovlnovým ohrevom, preto sa zmienim o niektorých teoretických aspektoch tohto spôsobu, pričom praktické pokusy sú náplňou prednášky Ing. Vašicovej.

Ako som spomenul, mikrovlnové žiarenie pracuje v oblasti frekvencie 10^9 Hz/s, čiže v oblasti centimetrových vln. Keďže v tejto oblasti pracujú aj rádiové a televízne vysielacie, vymedzili sa pre mikrovlnový ohrev frekvencie 915

1250, 2375, 5800 a 22 125 MHz. Prakticky sa však využívajú iba prvé tri frekvencie, pretože so zvyšujúcim sa kmitočtom klesá aktívna hĺbka prenikania žiarenia, a tým aj tepelný efekt.

Pre vysokofrekvenčné vlnenie platia zákony elektromagnetického poľa, ktoré sú vyjadrené Maxwellovými rovnicami. Pre množstvo mikrovlnovej energie premenenej na teplo platí vzťah

$$N = 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot E^2 f \epsilon \operatorname{tg} \delta \text{ W/cm}^3,$$

kde E je intenzita poľa (V/cm),

f — frekvencia (Hz/s),

ϵ — relatívna dielektrická konštanta hmoty,

$\operatorname{tg} \delta$ — stratový uhol, ktorý vyjadruje schopnosť ožarovanej hmoty absorbovať žiarenie.

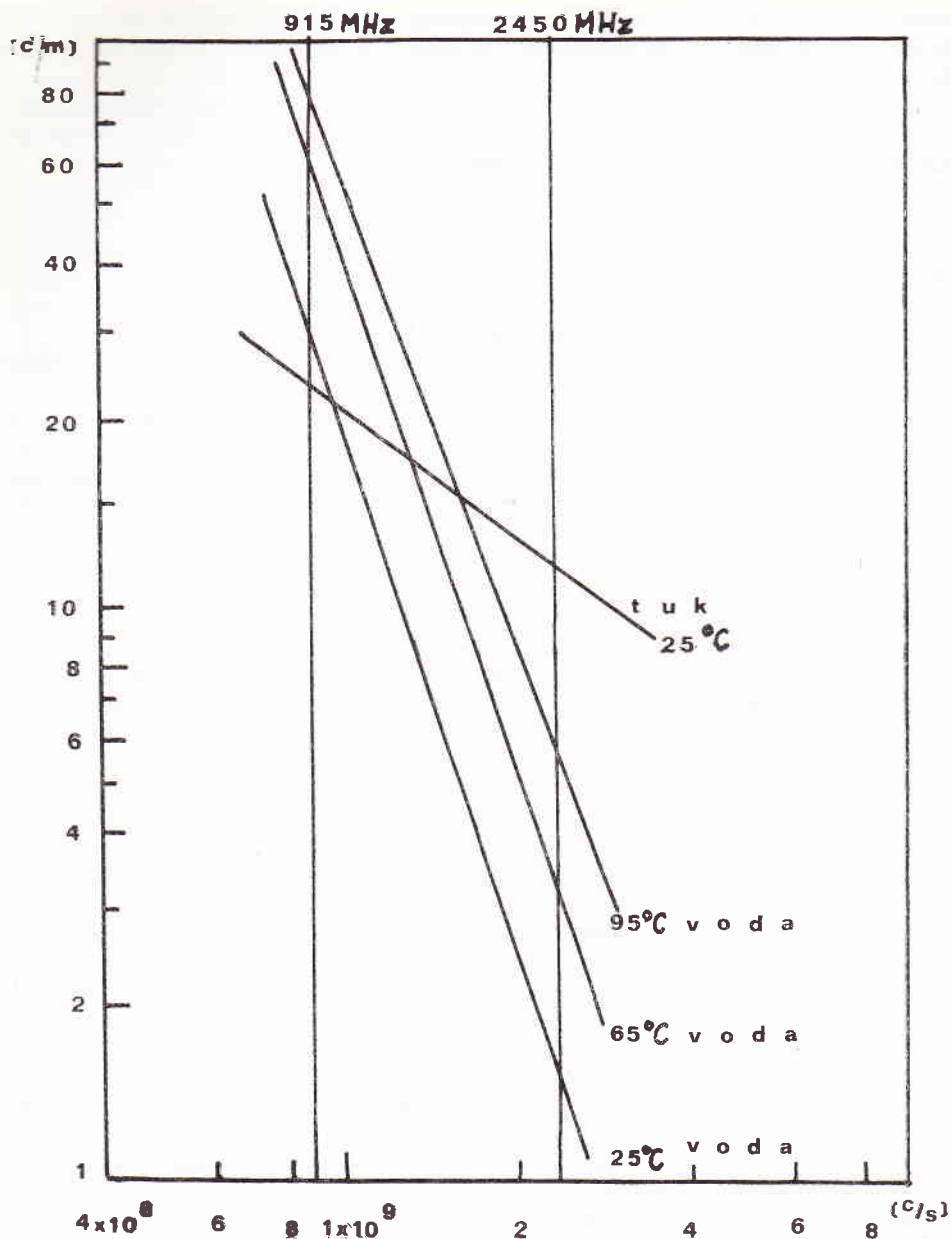
Ako zo vzorca vidno, intenzita elektrického poľa najviac vplýva na množstvo pohltenej a na teplo premenenej energie. Pri zvyšovaní tejto veličiny sme však obmedzení tým, že pri vyšších hodnotách E prostredie ionizuje, prípadne môže nastať koronárny výboj, ktorý môže poškodiť spracúvaný materiál alebo zariadenie (magnetron). Ostatné veličiny v rovnici sú materiálové vlastnosti, ktoré určujú vhodnosť materiálu na mikrovlnový ohrev. Z voliteľných veličín nám ešte ostáva frekvencia žiarenia. Jej zvyšovaním by bolo možné zväčšovať dodávanú energiu ohrievanému materiálu, ale tu nás obmedzuje skutočnosť, že hĺbka vniku žiarenia pri tom istom materiáli je nepriamo úmerná frekvencii. Dodali by sme viac energie, ale ohrev by prebiehal viac na povrchu materiálu (zvyšovaním frekvencie sa blížime oblasti infravln). Keď označíme d ako hĺbku materiálu, v ktorej poklesne výkonová hustota na $1/e$ (e značí základ prirodzených logaritmov), čiže asi na 37% pôvodnej hodnoty, platí vzťah

$$d = \frac{1}{f e^{0,5} \operatorname{tg} \delta},$$

kde význam symbolov je ten istý ako v predchádzajúcom vzorci. Uvedený vzorec je zjednodušený a platí iba pre malé hodnoty $\operatorname{tg} \delta$, ale práve s takýmito hodnotami sa stretávame pri potravinách.

Na obr. 1 vidieť závislosť hĺbky vniku mikrovlnovej energie od použitej frekvencie žiarenia pre materiály tuk a vodu. Hĺbka vniku pre tuk je vyššia pri frekvencii 915 MHz/s, zníženie vstupujúcej energie na polovičnú hodnotu nastáva v hĺbke asi 30 cm, preto na vytápanie tuku bude vhodnejší tento kmitočet. Hmoty s vyšším obsahom vody je výhodnejšie ohrievať vyššími frekvenciami. Hĺbka vniku energie závisí aj od teploty média, teplejšie médium je pre žiarenie priístupnejšie, teda účinnosť ohrevu klesá (na rovnaký objem hmoty prípadne menej pohltenej žiarivej energie).

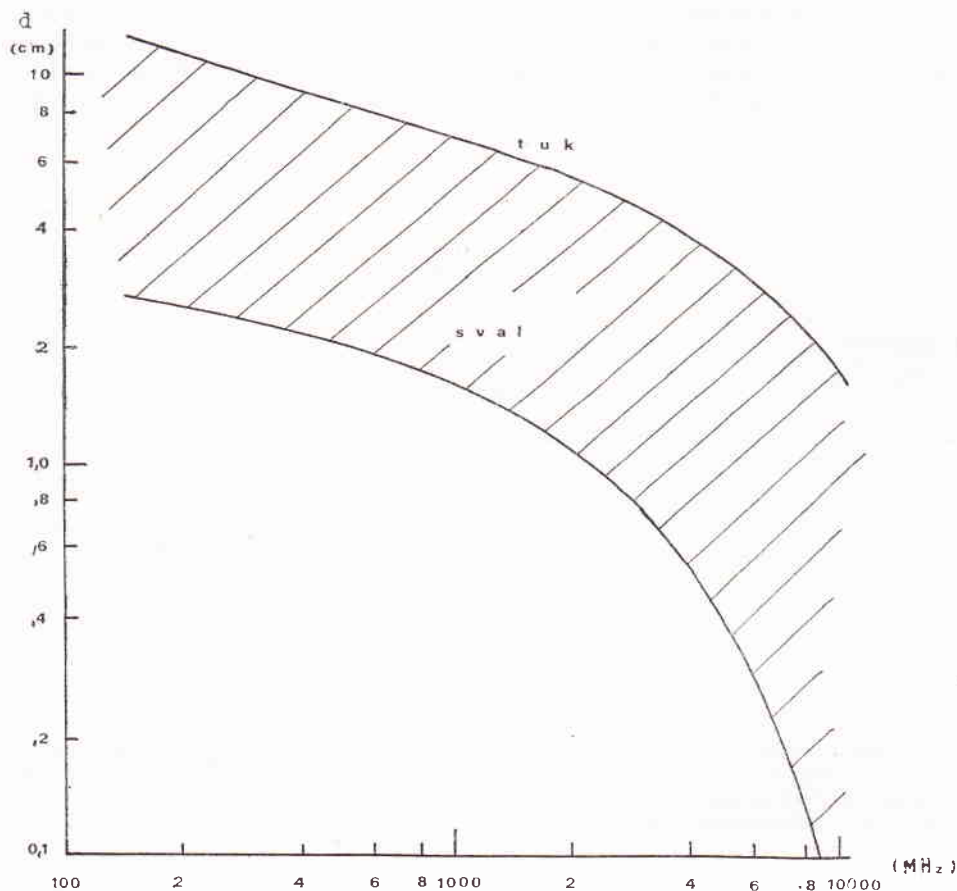
Na obr. 2 je závislosť hĺbky vniku žiarivej energie od frekvencie, a to pre tukové a svalové väzivo. Sval má následkom vyššieho obsahu vody vyššiu dielektrickú konštantu a vyšší stratový uhol, preto lepšie využíva — pohlcuje mikrovlnovú energiu. V rozmedzí bežne používaných frekvencií žiarenia je hĺbka vniku d pre svalovinu 1—2 cm, pre tukové vrstvy 8—10 cm, čiže premena energie na teplo, a tým tepelný účinok pohltenej žiarivej energie je pri tukových



Obr. 1. Závislosť hĺbky vniku žiarenia od jeho frekvencie.

vrstvách 6—8 ráz slabšia. Pri vysokých frekvenciách sa dopadajúce žiarenie celkom pohltí už v povrchových vrstvách v hĺbke niekoľkých mm, preto sa vyššie frekvencie nevyužívajú na ohrev potravín.

V súvislosti s mikrovlnovým ohrevom treba spomenúť a vyzdvihnúť, ako to už čiastočne vidieť aj na obr. 1, že dielektrické vlastnosti hmoty, ako je dielektrická konštanta a stratový uhol, nie sú konštantami v pravom zmysle slova, ale sú funkciami teploty a frekvencie. Platia preto iba pre danú teplotu a frekvenciu. Všeobecne možno povedať, že v rozsahu používaných frekvencií dielektrická konštanta so vzrastajúcim kmitočtom klesá, napr. pre surové



Obr. 2. Závislosť hĺbky vniku žiarenia do tukového a svalového tkaniva pri rozličných frekvenciách.

zemiaky z hodnoty 80 pri kmitočte 300 MHz na hodnotu 57 pre kmitočet 3000 MHz/s. So stúpajúcim kmitočtom klesá aj stratový uhol, napr. pre uvedené kmitočty z hodnoty 0,58 na hodnotu 0,27. Aj zvýšenie teploty alebo zníženie obsahu vody v materiáli má za následok zníženie týchto dielektrických hodnôt. Preto sa venuje zisťovaniu a meraniu dielektrických veličín v súvislosti

s mikrovlnovým ohrevom čoraz väčšia pozornosť, ako o tom svedčia aj články v odbornej a vedeckej literatúre.

Záverom možno konštatovať, že potravinársky priemysel dostal v mikrovlnovej energii nového pomocníka pre tepelné procesy, ako aj na zvýšenie hygieny. Na jeho plné uplatnenie treba vyriešiť niektoré teoretické otázky, ako napr. vlastnosti biologických materiálov pri aplikácii žiarení rozličnej frekvencie, vybrať pre jednotlivé materiály najvhodnejšie parametre, čo sa týka frekvencie, výšky ohrevu a jeho trvania, ochrany pracovníkov pri trvalej obsluhu vysokofrekvenčných zariadení, ekonomických otázok a pod. Dnes je použitie mikrovlnovej energie čiastočne aj módnou novinkou, ktorú skúsime aplikovať pre všetky vhodné, a možno i nevhodné účely. Prax overí, čo ostane trvale v používaní na prospech spoločnosti a na zlepšenie pracovných podmienok vo výrobe.

Literatúra

1. ROSEN, C. G.: Effects of microwaves on food and related materials. *Fd Technology*, 26, 1972, s 36—40, 55.
2. OKRESS, E. C.: Microwave power engineering. N. York-London, Academic Press 1968.
3. LOPEZ, A. — BAGANIS, N. A.: Effect of radio-frequency energy at 60 MHz of food enzyme activity. *Fd Sci.*, 36, 1971, s. 911—914.
4. PACE, V. E. — WESTPHAL, W. B. — GOLBLITH, S. A.: Dielectric properties of commercial cooking oils. *J. Fd Sci.*, 33, 1968, s. 30—36.
5. PACE W. E. — WESTPHAL, W. B. — GOLDBLITH, S. A. — DYKE, van D.: Dielectric properties of potatoes and potato chips, *J. Fd Sci.* 33, 1968, s. 37—42.

Súhrn

Na základe porovnania energie jednotlivých druhov elektromagnetického žiarenia a energie niektorých chemických väzieb sa poukazuje na využiteľnosť v praxi. Obširnejšie sa vozvädzajú možnosti aplikácie mikrovlnového ohrevu v potravinárskom priemysle s poukázaním na oblasti, kde je potrebné výskumom doplniť chýbajúce dáta.

Теоретические основы использования микроволнового нагрева в пищевой промышленности

На основании сравнения энергии различных видов электромагнитного излучения и энергии некоторых химических связей отмечается использование на практике. Более обширно приводятся возможности применения микроволнового нагрева в пищевой промышленности, ссылаясь на области, где необходимо дополнить недоставаемые данные исследованием.

The theoretical principles of microwave heating exertion in the food industry

Summary

On the basis of a comparison of electromagnetic radiation single sorts energy and of some chemical bindings energy is referred to utilizability in the praxis. More in detail are developped the possibilities of microwave heating application in the food industry with reference to areas, where is necessary by research to supplement the data being lacking.