

Možnosti aplikácie teórie prechodných procesov toku tepla na ohrievanie a chladenie potravín

A. ŠEPITKA

V potravinárskej technickej praxi sa stretávame s obidvoma spôsobmi toku tepla, t. j. s tokom tepla za ustáleného aj za neustáleného stavu. Pri toku tepla za ustáleného stavu ostáva teplota v ľubovoľnom bode telesa počas celého procesu stálou ($dt/dr = 0$). Je to prípad vedenia a priechodu tepla cez izolácie, ohrievacie a chladiace zariadenie a pod. Pri tomto treba brať do úvahy tvar telesa a okrajové podmienky, ktoré hrajú rozhodujúcu úlohu v celom procese vedenia tepla. Výpočtové rovnice priestupu tepla vedením pre rôzne formy telies (rovná stena, valcová stena a pod.) sú dostatočne známe [1, 2, 3].

V poslednom čase je intenzívne matematicko-analyticky rozpracovávaný neustálený spôsob toku tepla, ktorý umožňuje kvalitatívne sledovanie rozloženia teplotného poľa v ohrievanom (ochladzovanom) materiáli. Sú to prípady blanširovania, pasterizácie, sterilizácie, všeobecne tepelného spracovania potravín a pri niektorých fázach sušenia, a to najmä v prvých fázach tepelnej operácie. Teoreticky sa počíta, že je potrebný značne dlhý čas než sa ustáli štacionárny tok tepla a pominú všetky vplyvy prechodných javov.

Pri štúdiu podstaty biochemických a fyzikálno-chemických zmien v surovine rastlinného alebo živočíšneho pôvodu pod vplyvom tepelného spracovania, tepelnej dehydratácie, sa nezaobídeme bez súčasného štúdia a analýzy teplotného poľa v študovanom materiáli a bez náležitého štúdia zákonitostí tepelného procesu v záujme jeho optimalizácie. Aj hľadanie spôsobov skrátenia doby tepelného pôsobenia, možnosti pritom optimálneho využitia tepelnej energie, sa nezaobíde bez vážneho štúdia týchto javov.

Štúdium rozloženia teplotného poľa pri tepelnom spracovaní potravín cestou experimentu je pre obťažnosť merania teploty v jednotlivých uvažovaných bodoch dnes takmer nemožné. Ak chceme, aby režim tepelného spracovania potravín bol vedecky opodstatnený pre každý konkrétny prípad, musíme sa uchýliť k matematicko-analytickému hodnoteniu teplotného poľa pri tepelnom spracovaní potravín.

V ďalšom chceme poukázať na schodnosť cesty matematicko-analytického riešenia nadhodených problémov.

Matematická teória tepelnej vodivosti vychádza z experimentálnych skúseností, ktoré ukazujú, že tepelný tok medzi dvoma povrchmi je priamo úmerný rozdielu teplôt medzi nimi. Pri dosiahnutí ustáleného stavu množstvo tepla Q , ktoré preteká za čas τ cez plochu S dosky o hrúbke x sa rovná

$$Q = \lambda S \tau \frac{t_1 - t_2}{x}, \quad J \quad (1)$$

pričom λ je koeficient tepelnej vodivosti ($W/(m \cdot \text{deg})$), t_1 a t_2 — teploty na povrchu dosky.

Rovnica (1) vyjadruje základný Fourierov zákon tepelnej vodivosti za ustáleného stavu, najmä po jeho kvantitatívnej stránke.

Z rovnice (1) môžeme vyjadriť povrchovú hustotu tepelného toku i ako množstvo tepla, ktoré prechádza jednorozmerne jednotkovou plochou za jednotku času

$$i = \frac{Q}{S \tau} = -\lambda \frac{t_1 - t_2}{x} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}, \quad W/m^2 \quad (2)$$

resp. zmenu hustoty tepelného toku v smere prúdenia tepla

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (3)$$

Rovnice (2) a (3) platia aj pre neustálený tok tepla, kedy teplota t s časom τ sa mení.

V limitnom prípade pre tepelný tok ∂i za čas $\partial \tau$ cez jednotkovú plochu na úseku ∂x (t. j. v hmote $\rho \partial x$) môžeme pre tepelnú bilanciu napísať vzťah

$$\partial i \partial \tau = c \rho \partial x \partial t, \quad (4)$$

kde $c \rho$ = objemová tepelná kapacita, $J/(m^3 \cdot \text{deg})$.

Časovú zmenu teploty v hmote $\rho \partial x$ môžeme vyjadriť výrazom, vyplývajúcim z rovnice (4) takto:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c \rho} \frac{\partial i}{\partial x}. \quad (5)$$

Ak dosadíme do rovnice (5) za $\partial i / \partial x$ výraz z rovnice (3) dostaneme parciálnu diferenciálnu rovnicu pre jednorozmerný tok tepla v izotropnej pevnej látke:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \rho} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = f(a), \quad (6)$$

kde $a = \lambda / \rho c$. Túto konštantu Kelvin nazval koeficientom tepelnej difúzie a Maxwell koeficientom teplotnej vodivosti. V rovnici znamenajú:

λ = koeficient tepelnej vodivosti, $W/(m \cdot \text{deg})$,

ρ = hustota látky, kg/m^3 ,

c — špecifické teplo látky, $J/(kg \cdot \text{deg})$,

a — koeficient teplotnej vodivosti, m^2/s .

Z rovnice (6) vyplýva, že rýchlosť ohrevu látky pri ostatných rovnakých podmienkach je závislá iba od koeficientu teplotnej vodivosti a , t. j. od termických charakteristík látky λ , ρ a c , ktoré kvôli jednoduchosti budeme považovať za nezávislé od polohy uvažovaného bodu a teploty látky.

V tabuľke (1) uvádzame termické charakteristiky niektorých látok, ktoré z potravinárskeho hľadiska sú zaujímavé, a z nich vypočítané koeficienty teplotnej vodivosti. Z tabuľky môžeme napr. vypočítať, že koeficient teplotnej vodivosti skla ($a = 3,4$) je 2 krát tak veľký ako koeficient teplotnej vodivosti pastovitej látky ($a = 1,8$), čo znamená, že sklo sa bude pri sterilizácii 2-krát tak rýchlo ohrievať ako jeho pasto-

Tabuľka 1. Termické charakteristiky niektorých látok

Látka	Špecifická hmota, ρ kg/m ³	Špecifické teplo, c kJ/(kg . deg)	Objemová tepelná kapacita, c_v kJ/(m ³ . deg)	Koeficient tepelnej vodivosti λ W/(m . deg)	Koeficient teplotnej vodivosti, α . 10 ⁷ m ² /s
voda (0 °C)	999,8	4,218	4216,9	0,552	1,31
vzduch (0 °C)	1,2516	1,007	1,260	0,0243	192,9
vzduch (100 °C)	0,9156	1,009	0,9238	0,03105	336,1
vodná para (100 °C)	0,5780	1,9008	1,0986	0,02384	217,0
vodná para (200 °C)	0,4515	1,9594	0,8847	0,03256	368,0
meď	8930	0,3885	346,9	372,2	1072,2
hliník	2700	0,8876	239,7	203,5	849,2
železo	7876	0,4647	366,0	73,3	200,2
sklo	2500 až 3900	0,7201	180 až 280	0,60 až 0,81	3,36 až 2,90
ľad	920	2,102	1934	1,745	9,02
jablka	750	3,852	2889	0,4186	1,45
zemiaky	1100	3,60	3960	0,58 až 0,62	1,5 až 1,6
mrkva	1010	3,90	3939	0,60 až 0,61	1,6 až 1,62
pastovité látky					1,80
cukorný sirup (20 °C)					
15 °Bg	1060	3,768	3994	0,5582	1,39
30 °Bg	1130	3,475	3927	0,50	1,27
60 °Bg	1290	2,763	3565	0,3837	1,07

vitá náplň a pre urýchlenie procesu sterilizácie treba hľadať spôsoby urýchlenia prenikania tepla nie v skle, ale v pastovitej hmote.

Ak privedieme do styku dve látky, ktoré majú spočiatku rôzne teploty, pri dostatočne dlhom kontakte začne sa ich teplota vyrovnávať. Do tohto času teplotné pole obidvoch látok sa mení s časom. Hneď pri dotyku dvoch látok, ktoré majú rôznu teplotu, alebo látky a plynného alebo kvapalného média, vzniká v každom z nich tok tepla. U pevnej látky výmena tepla nastáva tesne pod jej povrchom, preto tvar látky bude mať podradnejšiu úlohu v porovnaní s jej termickými vlastnosťami. Neštacionárnosť tepelného procesu je zvlášť výrazná najmä pri krátkom styku dvoch látok. V technickej literatúre sú tieto prípady výmeny tepla, rozdelenia teplotného poľa, okamžitého toku tepla, celkového toku tepla a koeficientu priestupu tepla dosť málo spracované.

Pri konkrétnom riešení uvedených otázok pre ohrev (resp. ochladzovanie) potravín vyjdeme z tohto zjednodušujúceho predpokladu: pri neštacionárnom ohrievaní potravinárskych surovín alebo produktov či už stykom s pevnou ohrievacou látkou, kvapalným alebo plynným médiom, je priestup tepla z látky alebo média do potravinu značne veľký, čo znamená, že pri konštantnej teplote ohrievacieho prostredia, vzhľadom na nízky koeficient tepelnej vodivosti potravinu, teplota povrchu ohrievanej potravinu a teplota tesne pod povrchom, je konštantná.

Rozdiel teploty zvoleného miesta (bodu) potraviny t a teploty jej ohrievaného povrchu t_0 môžeme vyjadriť v bezrozmernom tvare veličinou

$$Y = \frac{t - t_0}{t_1 - t_0},$$

pričom t_1 je počiatočná teplota potraviny pred ohrievaním. Potom $(t_1 - t_0)$ značí teplotný spád v počiatočnom okamihu ohrievania. Hodnota t sa mení v intervale t_1 až t_0 . Pre Y platia tieto okrajové hodnoty:

ak $t = t_0$ (uvažovaný bod potraviny nadobudne teplotu prostredia), $Y = 0$;

ak $t = t_1$ (teplota uvažovaného bodu sa oproti počiatočnej nezmení), $Y = 1$. Všetky hodnoty Y sa pohybujú v intervale 0 až 1.

Aby sme mohli kvalitatívne vyjadriť rozdelenie teplotného poľa v látke o určitej teplote, ktorá je ponorená do média o inej konštantnej teplote, potrebujeme riešiť diferenciálnu rovnicu (6). Jednou z ciest presného partikulárneho riešenia diferenciálnej rovnice (6), ktorú pre náš prípad neštacionárneho ohrievania potravín zvolíme, je riešenie v tvare Gaussovej funkcie chýb. Táto funkcia má tvar

$$G(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi \quad (7)$$

a často je označovaná symbolom $\text{erf } x$. Pre Gaussovú funkciu chýb platia tieto vzťahy:

$$G(0) = 0 \quad (8)$$

$$G(\infty) = 1 \quad (9)$$

$$G(-x) = -G(x) \quad (10)$$

$$G'(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2}, \quad (11)$$

ktoré použijeme pri našom prípade riešenia neštacionárneho toku tepla. Obecným riešením rovnice (6) je potom výraz:

$$t = \text{AG} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right) + B, \quad (12)$$

pričom x v Gaussovej funkcii predstavuje v riešení výraz $x/(2\sqrt{a\tau})$, A a B sú konštanty. Ak zavedieme Fourierovo kritérium $\text{Fo} = a\tau/x^2$, rovnica (12) dostane tvar

$$t = \text{AG} \left(\frac{1}{2\sqrt{\text{Fo}}} \right) + B, \quad (13)$$

ktorý je obecným riešením diferenciálnej rovnice (6).

Pre určenie konštant A a B je potrebné zvoliť okrajové (počiatočné) podmienky.

Počiatočné podmienky pre študovaný neštacionárny tok tepla v látkach o roznej teplote, ktoré sa navzájom dotýkajú, môžeme napísať takto: (obr. 1):

$$x = 0, \quad t_{x=0} = t_0 \quad (14a)$$

$$x \rightarrow \infty, \quad t_{x \rightarrow \infty} = t_1 \quad (14b)$$

$$\tau = 0, \quad t_{\tau=0} = t_1 \quad (14c)$$

Pre uvedené okrajové podmienky dostaneme:

$$t_{x=0} = AG(0) + B = t_0 \quad (15)$$

$$t_{x \rightarrow \infty} = AG(\infty) + B = t_1 \quad (16)$$

Z rovnice (15) pre B vyplýva: $B = t_0$

Z rovnice (16) dostávame: $A + B = t_1$; $A = t_1 - t_0$.

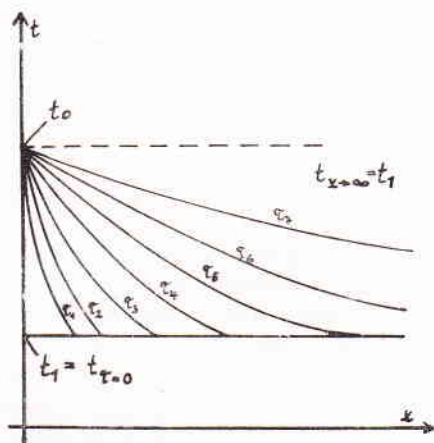
Rovnicu (13) pre naše okrajové podmienky môžeme prepísať na tvar

$$t = (t_1 - t_0)G\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo}}\right) + t_0 \quad (17)$$

alebo

$$Y = \frac{t - t_0}{t_1 - t_0} = G\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo}}\right) = G\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) = G\left(\frac{x^2}{4a\tau}\right) \quad (18)$$

Z rovnice (18) vyplýva, že pre akúkoľvek látku, čas potrebný na to, aby sa daná teplota dosiahla v nejakom bode látky, je priamo úmerný štvorcu vzdialenosti tohto bodu od povrchu látky. Okrem toho čas potrebný na to, aby sa dosiahla v danom bode príslušná teplota, je nepriamo úmerný koeficientu teplotnej vodivosti. Ak poznáme koeficient teplotnej vodivosti a môžeme pre ľubovoľný čas τ určiť na základe rovnice (18) teplotné pole v látke (obr. 1).



Obr. 1. Rozloženie teplotného poľa v závislosti od času τ pri neustálenom toku tepla

Derivovaním rovnice (17) podľa času dostaneme rýchlosť ohrievania v ľubovoľnom bode.

$$-\frac{\partial(t - t_0)}{\partial\tau} = \frac{(t_1 - t_0) \cdot x}{2\sqrt{\pi a\tau^3}} \exp\left(-x^2/4a\tau\right), \quad (19)$$

alebo derivovaním podľa x dostaneme teplotný gradient v ľubovoľnom bode

$$\frac{\partial(t - t_0)}{\partial x} = -\frac{(t_1 - t_0)}{\sqrt{\pi a\tau}} \exp(-x^2/4a\tau) \quad (20)$$

Napr. jablko, pre ktoré koeficient teplotnej vodivosti $a = 0,000\,145\text{ m}^2/\text{s}$, o teplote $t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$, po vhození do vody teplej $t_0 = 100\text{ }^\circ\text{C}$, dosiahne v ňom teplota vo vzdialenosti $x = 0,01\text{ m}$ (1 cm) od povrchu hodnotu $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$ za 7,8 minúty; v medi, pre ktorú koeficient teplotnej vodivosti $a = 0,107\text{ m}^2/\text{s}$, to isté nastane za 0,61 sekundy.

Rovnica (18) charakterizuje rozdelenie teplôt v neštacionárne ohrievanej látke. Bude nás zaujímať okamžitý tok tepla cez jednotkový povrch dotyku dvoch látok ($x = 0$). Pre riešenie okamžitého toku tepla použijeme rovnicu (2).

Ak do rovnice (2) dosadíme za člen $\partial t/\partial x$ výraz z rovnice (20) a riešime rovnicu pre $x = 0$, pre okamžitý tok tepla cez jednotkovú plochu povrchu dostaneme výraz

$$q = -\frac{\lambda(t_1 - t_0)}{\sqrt{\pi a \tau}}, \quad (21)$$

ktorý úpravou prejde na tvar

$$q = -\frac{1}{\sqrt{\pi \tau}} \sqrt{\lambda c_Q} (t_0 - t_1), \quad W \quad (22)$$

Výraz $\sqrt{\lambda c_Q}$ sa často v odbornej literatúre uvádza ako koeficient prenikania tepla, alebo koeficient tepelnej aktivity. Pri $\tau \rightarrow 0$, okamžitý tok sa blíži k nekonečnu.

Celkové množstvo tepla, ktoré za celý čas dotyku prejde do látky cez jednotkovú plochu dostaneme integráciou rovnice (22).

$$q_0^r = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\tau} \sqrt{\lambda c_Q} (t_0 - t_1), \quad J \quad (23)$$

Cez celý povrch látky prejde

$$Q_0^r = q_0^r \cdot S = S \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\tau} \sqrt{\lambda c_Q} (t_0 - t_1), \quad J \quad (23a)$$

Rovnice (18, 19, 20, 22 a 23) boli odvodené za predpokladu, že výmena tepla medzi látkami alebo látkou a kvapalným resp. plyným médiom sa deje neštacionárne, čo znamená, že rozmer látok navzájom sa dotýkajúcich je v smere tepelného toku značne (nekonečne) veľký alebo že doba dotyku oboch telies je natoľko krátka, že na opačnom konci dotyku (t. j. v strede látky) nepozorujeme žiadnu alebo značnejšiu zmenu teploty.

Nakoniec mohli by sme si dopredu určiť podmienky, za ktorých prípustnú chybu neprekročíme. Napr. predpokladajme, že povrch látky vzdialenej od jej stredu na vzdialenosť d ($x = d$) sa dostane do styku s veľkým množstvom kvapalného média o konštantnej teplote t_0 . Ďalej predpokladajme, že koeficient priestupu tepla α , ktorý charakterizuje priestup tepla medzi kvapalným médiom a pevnou látkou je dostatočne veľký (radu aspoň 10^3), takže vzhľadom na malý koeficient tepelnej vodivosti λ potraviny (radu 10^{-1}), udržiava sa na povrchu látky konštantná teplota, ktorá je rovná alebo veľmi blízka teplote kvapalného média (t_0). Potom môžeme odvodené vzťahy aplikovať iba na ten úsek tepelného časove vymedzeného procesu, pokiaľ teplota (t_1) v strede látky sa nezmení, resp. sa zmení na predtým stanovenú hodnotu, ktorá je určitým percentom z rozdielu teploty povrchu látky t_0 a jej počiatočnej teploty t_1 (t. j. z rozdielu $t_0 - t_1$ pri $\tau = 0$ a $x \rightarrow \infty$). Určíme, že táto zmena teploty pri $x = d$ nemá prevýšiť 5 %. Potom podľa rovnice (18) dostaneme

$$\frac{t_x - d - t_0}{t_1 - t_0} = G \left(\frac{1}{2 \sqrt{Fo}} \right) = G \left(\frac{d}{2 \sqrt{a\tau}} \right) = 0,95$$

(Hodnoty Gaussovho integrálu sa pohybujú v hraniciach 0 až 1). Týmto sme dostali vrchnú hranicu použitia rovnice rozdelenia teplôt v potravinách pre náš prípad. Z tabuliek Gaussových integrálov (tab. 2, alebo obr. 2) zistíme, že Gaussov integrál má hodnotu

$$0,95 \text{ pre } Fo = \frac{a\tau}{x^2} = \frac{a\tau_{max}}{d^2} = 0,13. \text{ Z toho}$$

$$\tau_{max} = \frac{0,13 \cdot d^2}{a}, \text{ s.}$$

Tabuľka 2. Hodnoty Gaussovho integrálu chýb (Y) jeho derivácie (Y') a Fourierovho kritéria (Fo).

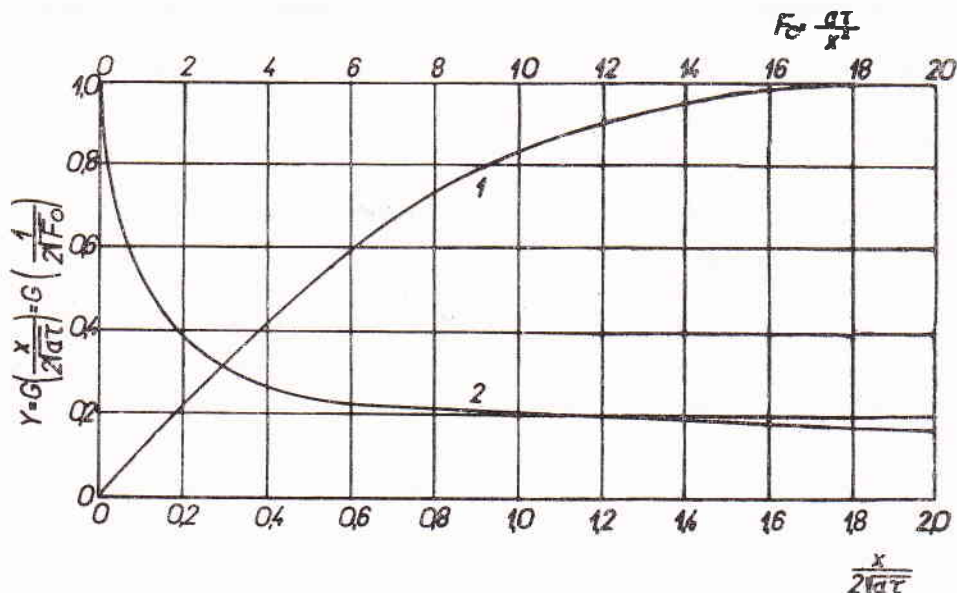
$\frac{x}{2 \sqrt{a\tau}}$	$Y = G \left(\frac{x}{2 \sqrt{a\tau}} \right)$	$Y' = G' \left(\frac{x}{2 \sqrt{a\tau}} \right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-\frac{x^2}{4a\tau} \right)$	$Fo = \frac{a\tau}{x^2}$
0	0	1,128	∞
0,1	0,1125	1,117	25
0,2	0,2227	1,084	6,25
0,3	0,3286	1,031	2,78
0,4	0,4284	0,961	1,56
0,5	0,5205	0,878	1,00
0,6	0,6039	0,787	0,695
0,7	0,6778	0,691	0,51
0,8	0,7421	0,595	0,39
0,9	0,7969	0,502	0,309
1,0	0,8427	0,415	0,25
1,5	0,9661	0,119	0,111
2,0	0,9953	0,0207	0,0625
∞	1,0	0	0

Takto sme dostali maximálnu dobu vykonávania tepelného procesu za uvedených podmienok, pri ktorom môžeme počítať rozloženie teplotného poľa v látke podľa odvodených vzťahov. Maximálne doby tepelného procesu τ_{max} (sekúnd), pri ktorých možno použiť odvodené rovnice pre neustálený tok tepla, sú v závislosti od hrúbky látky (d , cm), resp. polomeru a koeficientu teplotnej vodivosti (a , m^2/s), ktorý sme pre potravinárske látky zobrali ako stredný $a = 1,5 \cdot 10^{-7} m^2/s$, tieto:

d , cm	τ_{max} pre $a = 1,5 \cdot 10^{-7} m^2/s$
0,1	0,86 sekúnd
1,0	86,6 sekúnd
5,0	2166 sekúnd
10,0	8660 sekúnd

Pri väčšej hodnote a , pochopiteľne, sa skracuje úmerne doba τ_{max} , pre ktorú ešte platia odvodené rovnice.

Pri výpočtoch ohrievania alebo chladenia pevnej látky v kvapaline alebo v plyne sa zavádza koeficient priestupu tepla α [W/(m² . deg)]. My sme pri našich úvahách považovali pre naše prípady tento koeficient za dostatočne veľký na to, aby sa teplota povrchu pevnej látky veľmi nelíšila od teploty média. Jednako jeho skutočná hodnota bude závisieť od času.



Obr. 2. Graf funkcie $Y = G \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$ (krivka 1) a funkcie $Y = f(F_0)$ (krivka 2)

Pre priestup tepla z kvapalného (plynného) média do pevnej látky platí vzťah

$$Q = S\alpha(t_0 - t_1), \quad J \quad (24)$$

Po dosadení rovnice (24) do rovnice (23a) dostaneme pre koeficient priestupu tepla výraz

$$\alpha = \frac{2}{\sqrt{\pi\tau}} \sqrt{\lambda_{oc}}, \quad W/(m^2 \cdot \text{deg}) \quad (25)$$

Z rovnice 25 je vidieť, že koeficient priestupu tepla nepriamo úmerne závisí od doby tepelného procesu $\sqrt{\tau}$ a čím táto doba je kratšia, tým väčšiu hodnotu má α .

Okrem uvedeného, rovnica (18) dáva nám predpoklady pre experimentálne stanovenie koeficientu teplotnej vodivosti a . Zo zmerania teploty v bode x_1 v čase τ_1 pri neustálenom toku tepla v látke, môžeme z tabuľky Gaussovej funkcie chyby sta-

noviť hodnotu $\frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_1}}$ a z nej hodnotu koeficientu teplotnej vodivosti a .

Použitie odvodených rovníc pre potreby výskumu a praxe si vyžaduje znalosť termických vlastností potravín, ktoré sa v poslednom čase intenzívne študujú aj na našom ústave.

Zoznam použitých symbolov

Q	= množstvo tepla, J
λ	= koeficient tepelnej vodivosti, W/(m . deg)
S	= plocha, m ²
τ	= čas, s
t	= teplota, deg
x	= vzdialenosť, m
i	= povrchová hustota tepelného toku, W/m ²
c	= špecifické teplo, J/(kg . deg)
ρ	= hustota, kg/m ³
a	= koeficient teplotnej vodivosti, m ² /s
Fo	= Fourierovo kritérium (bezrozmerné číslo)
q	= okamžitý tok tepla, W
α	= koeficient prístupu tepla, W/(m . deg)
Y	= pomer rozdielu teplôt (bezrozmerné číslo)
$\exp x$	= e^x

Literatúra

1. Kossaczky E., Surový J., Chemické inžinierstvo I, SVTL Bratislava a SNTL Praha 1963
2. Charm S. E., The Fundamentals of Food Engineering, The AVI Publishing Co. Inc. 1963
3. Ciborowski J., Inżynieria chemiczna, II. wydanie, Warszawa 1955.
4. Carslaw H. S., Jaeger I. C., Teploprovodnost tverdyh tel, Moskva 1964

Súhrn

V práci sa poukazuje na možnosti použitia fyzikálno-matematickej teórie neustáleného toku tepla na štúdium rozdelenia teplotného poľa v potravinách počas tepelného spracovania, okamžitého toku tepla, celkového toku tepla a koeficientu prístupu tepla.

Возможности применения теории нестационарных процессов тока тепла для нагрева и охлаждения пищевых продуктов

Выводы

В работе отмечается на возможности применения физикоматематической теории неуставившегося тока тепла для изучения разделения температурного поля в пищевых продуктах во время термического действия на них, мгновенного тока тепла, общего тока тепла и коэффициента теплопередачи.

Applikationsmöglichkeiten der Theorie der vorübergehenden Prozesse des Wärmedurchflusses auf die Erwärmung und Kühlung von Lebensmitteln

Zusammenfassung

Im vorliegenden Artikel wurde auf die Möglichkeiten der Verwendung einer physikalisch-mathematischer Theorie des unterbrochenen Wärmeflusses auf das Studium der Verteilung des Wärmefeldes in Lebensmitteln bei ihrer Wärmebehandlung, des momentanen Wärmeflusses, des gänzlichen Wärmeflusses und des Koeffizienten des Wärmedurchtrittes hingewiesen.