Termokinetika fluidného zmrazovania

K. MEČÁRIK

Pre bobuľovité drobné produkty sa javí najvýhodnejší spôsob zmrazovania fluidné zmrazovanie, pri ktorom sa zmrazovaný produkt zmrazí za pár minút pri zachovaní biologických, tvarových a chuťových vlastností. Výhody tohto spôsobu zmrazovania sú nesporné (L1) až na obmedzenia na niektoré druhy produktov (hrach, pomfrity, černice, maliny atď.).

Z konštrukčného hľadiska sú tieto zariadenia veľmi jednoduché s malou možnosťou porúch. Skonštruovalo sa niekoľko druhov týchto zariadení, z ktorých práve čs. patent „Rotofluid" je svojím spôsobom zhotovenia unikátny a pre svoju jednoduchú konštrukciu a širokú použiteľnosť patrí k najlepším výrobkom tohto druhu na svete.

Napriek širokej použiteľnosti fluidného zmrazovania tepelné pochody prebiehajúce pri tomto druhu zmrazovania nie sú dostatočne preskúmané a doposiaľ je veľmi málo podkladov pre výpočet fluidných zmrazovacích zariadení a pre určenie ich základných výkonových parametrov. Jedným zo základných parametrov, ktoré určujú rýchlosť zmrazovania, je prestup tepla medzi chladiacim vzduchom a fluidizujúcim produktom. V nasledujúcej časti urobíme rozbor tohto problému.

1. Základné termokinetické vzťahy vedenia tepla

Pre tok tepla v homogénnom telese bez vnútorných zdrojov tepla platí obecná diferenciálna rovnica vedenia tepla (L3, str. 126)

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \qquad \ldots (1)$$

ktorá je riešiteľná pri známych počiatočných a hraničných podmienkach pre niektoré jednoduché tvary telies. Riešením tejto diferenciálnej rovnice pri počiatočných podmienkach $T(x, y, z, \tau_0) = T_0$ a hraničných podmienkach III. radu (L3, str. 127)

$$\Delta T_s(\tau) + \frac{\alpha}{\lambda} [T_c - T_s(\tau)] = 0 \qquad \ldots (2)$$

dostaneme pre guľu, hranol a valec vzťahy pre pomerné ochladenie (L2, kap. IV).
Guľa polomeru R

$$\frac{T(r\,.\,\tau)-T_o}{T_c-T_o}=1-\sum_{n=1}^{\infty}A_n\,\frac{R\sin\mu_n\dfrac{r}{R}}{r\,\mu_n}\exp(-\mu^2_n\,F_o) \qquad \ldots (3)$$

Hranol o rozmeroch $2\,R_1 \times 2\,R_2 \times 2\,R_3$

$$\frac{T(x,y,z,\tau)-T_o}{T_c-T_o}=1-\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty}A_n\,.\,A_m\,.\,A_k\,.\,\cos\mu_n\frac{x}{R_1}\,.$$

$$.\,\cos\mu_m\frac{y}{R_2}\,.\,\cos\mu_k\frac{z}{R_3}\,.\,\exp\left[-\left(\frac{\mu^2_{n,1}}{R_1^2}+\frac{\mu^2_{m,2}}{R_2^2}+\frac{\mu^2_{k,3}}{R_3^2}\right)\right]a\,.\,\tau \qquad \ldots (4)$$

Valec o polomere R a dĺžky 2L

$$\frac{T(r,z,\tau)-T_o}{T_c-T_o}=1-\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}A_n\,.\,A_m\,.\,I_o\left(\mu_n\frac{r}{R}\right).$$

$$\cos\mu_m\frac{z}{L}\,.\,\exp\left[-\left(\frac{\mu_n^2}{R^2}+\frac{\mu_m^2}{L^2}\right)a\,\tau\right] \qquad \ldots (5)$$

Príslušné veličiny A_n, A_m, A_k, μ_n, μ_m, μ_k sú tabelárne spracované v uvedenej literatúre a sú funkciou Biotovho kritéria.

Riešenia (3), (4), (5) možno napísať v obecnom tvare

$$\frac{T_c-T}{T_c-T_o}=\sum_{n=1}^{\infty}\prod_{1}^{3}A_{n,i}\;\Phi\left(\mu_{n,i}\frac{x_i}{R_i}\right)\exp\left(-\mu^2_{n,i}\frac{R_v^2}{R_1^2}\right)Fo_v \qquad \ldots (6)$$

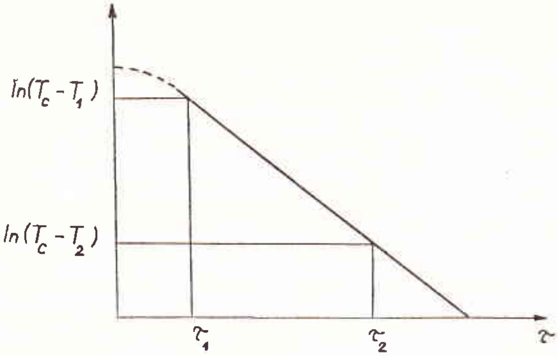
Ak berieme do úvahy nerovnosť $\mu_{1,i} < \mu_{2,i} < \mu_{3,i} < \ldots < \mu_{n,i} < \ldots$, ktorá má prudko stúpajúcu tendenciu, potom existuje také číslo $Fo_v > Fo_1$, pri ktorom ostatné členy radu vzhľadom na prvý člen radu sú zanedbateľné, môžeme nekonečný rad ohraničiť iba prvým členom. Počítajúc od čísla Fo_1, závislosť medzi $(T_c - T)$ a času τ bude exponenciálna. Logaritmovaním rovnice (6) pre dva rozdielne časy τ_1 a τ_2 dostaneme pre ľubovoľný bod telesa

$$m=\frac{\ln(T_c-T_1)-\ln(T_c-T_2)}{\tau_2-\tau_1} \qquad \ldots (7)$$

kde *m* značí rýchlosť regulárneho režimu

$$m=\sum_{1}^{3}\left(\mu_{1,i}\frac{R_v}{R_i}\right)^2\cdot\frac{a}{R_v^2} \qquad \ldots (8)$$

Z rovníc (3), (4), (5) vidieť, že pre určenie pomerného ochladenia častice vo fluidnej vrstve je nutné poznať tepelné vlastnosti produktu (teplotnú a tepelnú vodivosť) a súčiniteľ prestupu tepla α.



Obr. 1. Regulárny tepelný režim

2. Súčasné predpoklady k riešeniu

Výpočet súčiniteľa prestupu tepla α sa obvykle robí za predpokladu, že medzná vrstva je určená charakterom obtekania, t. j. Reynoldsovým kritériom. V tomto prípade je Nusseltovo kritérium funkciou

$$Nu = f\,(Re, Pr) \qquad \ldots (9)$$

Tento predpoklad nie je celkom správny, ako tomu nasvedčujú mnohé merania a rozbory prestupov tepla vo fluidných zariadeniach (L4). Pre potreby fluidného zmrazovania funkcia (9) je postačujúca. Analýzou kriteriálnych rovníc platiacich pre prestup tepla vo fluidnej vrstve boli vybrané 4 kriteriálne vzťahy, ktorých rozsah platnosti vyhovuje podmienkam fluidného zmrazovania (veľkosť častice, rozsah Re kritéria). Rovnice boli zostavené do tabuľky 1 s označením rozsahu platnosti. V tabuľke 2 sú vynesené hodnoty súčiniteľov prestupu tepla α vypočítané z uvedených vzťahov. Napriek dôslednému výberu kriteriálnych rovníc hodnoty súčiniteľa prestupu tepla podľa jednotlivých

Tab. 1

číslo	Literatúra	Empirický vzťah	Platnosť v rozmedzí
1	5	$Nu = 0{,}62\ Re^{0{,}5}$	$Re < 150,\ 30000 >$
2	6	$Nu = 0{,}26\ Re^{0{,}6}$	$Re < 1200,\ 100000 >$
3	7	$Nu = 0{,}032\ Re^{0{,}9}$	$Re < 200,\ 10000 >$
4	8	$Nu = 0{,}943\ Re^{-1} \cdot Ar^{0{,}69} \cdot Pr^{0{,}33}$	$Re \cdot Ar^{-0{,}4} > 2{,}15$

Tab. 2

Produkt	$d_{ekv} \cdot 10^3$ m	w m/s	$Re \cdot 10^{-3}$	$Ar \cdot 10^{-7}$	α W/m^{2}deg			
					1	2	3	4
Hrach	8,5	3,2	2,52	3,88	80	73	97	80
Višňa	19	3,2	5,63	44,5	53	53	88	115
Sliva	30	3,2	8,83	171	42	44	83	170

vzťahov sa od seba líšia až o 100 %, hlavne pre produkty väčších priemerov. Najlepšie výsledky sa dosiahli s kriteriálnymi vzťahmi č. 1 a 2, ktoré sú v súlade s experimentálne nameranými hodnotami (L9) pre dané rýchlosti vzduchu.

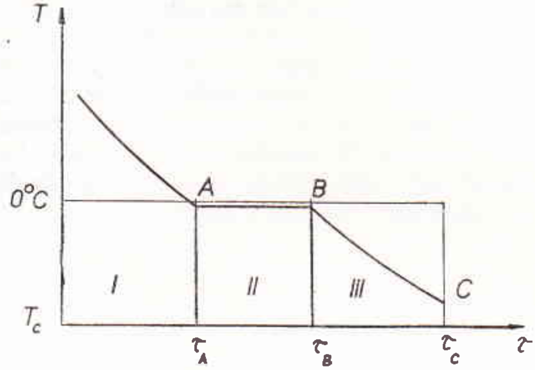
3. Metódy skúmania súčiniteľa prestupu tepla

Proces zmrazovania fluidizujúcej častice môžeme rozdeliť do 3 oblastí:

a) v oblasti I v čase $\tau = 0$ bude mať produkt teplotu T_0 danú svojím počiatočným stavom. Od hodnoty $Fo > Fo_I$ nastúpi regulárny tepelný režim s rýchlosťou režimu m_I až do bodu A;

b) druhá oblasť II je proces skupenskej premeny kvapaliny obsiahnutej v produkte;

c) tretia oblasť III je oblasť podchladenia produktu na žiadanú teplotu do bodu C.



Obr. 2. Obecný priebeh teploty zmrazovania produktu

Teória regulárneho režimu dáva možnosť určiť súčiniteľ prestupu tepla α medzi produktom a obtekajúcim vzduchom nestacionárnou metódou regulárneho režimu. Prístroj umožňujúci zisťovať súčiniteľ prestupu tepla je tzv. alfakalorimeter a pozostáva zo skúmaného telesa, galvanometra a termočlánku. Po nabehnutí regulárneho režimu pri $Fo > Fo_I$ v dvoch časových intervaloch

τ_1 a τ_2, ktoré patria do intervalu $< \tau = 0, \tau_A >$ alebo $< \tau_B, \tau_C >$ určia sa teploty T_1 a T_2 a rýchlosť regulárneho režimu m. Rovnicu (8) môžeme prepísať do tvaru

$$\frac{1}{\sum_{1}^{3} \left(\mu_{1,i} \cdot \frac{R_v}{R_i} \right)^2 \frac{1}{R_v^2}} = \frac{a}{m} \qquad \ldots (10)$$

Ak výraz na ľavej strane rovnice označíme K, dostaneme (L10)

$$K = \frac{a}{m} \qquad \ldots (11)$$

Pri známej hodnote teplotovej vodivosti môžeme určiť koeficient formy K pre guľu, hranol a valec

Guľa polomeru R

$$K = \frac{R^2}{\mu_1^2} \qquad \ldots (12)$$

Hranol o rozmeroch X . Y . Z

$$K = \frac{1}{\left(\frac{2\, \mu_{1,x}}{X} \right)^2 + \left(\frac{2\, \mu_{1,y}}{Y} \right)^2 + \left(\frac{2\, \mu_{1,z}}{Z} \right)^2} \qquad \ldots (13)$$

Valec polomeru R a dĺžky Z

$$K = \frac{1}{\left(\frac{\mu_{1,r}}{R} \right)^2 + \left(\frac{2\, \mu_{1,z}}{Z} \right)^2} \qquad \ldots (14)$$

Hodnoty koreňov $\mu_{1,x}$; $\mu_{1,y}$; $\mu_{1,z}$; sú tabelárne spracované (L3. kap. IV) v závoslistiach od Biotovho kritéria. Ak poznáme tepelné vlastnosti skúmaného telesa, môžeme pomocou koreňov určiť Bi kritérium, a teda i súčiniteľ prestupu tepla α, pre ktorý platí vzťah $\alpha = R \,.\, Bi/\lambda$.

Súhrn

Proces fluidného zmrazovania z hľadiska tepelného je proces nestacionárny. Rýchlosť zmrazovania je závislá od tepelných vlastností produktu, jeho veľkosti, tvaru a súčiniteľa prestupu tepla z chladiaceho vzduchu na produkt. Všetky tieto faktory pri skúmaní termokinetických pochodov fluidného zmrazovania je nutné zahrnúť do vzťahov pre výpočet chladiaceho času. Vzťahy (3, 4 a 5) umožňujú určiť priebeh teplôt produktu v oblasti I a III pri známej hodnote súčiniteľa prestupu tepla α. Vypočítané hodnoty súčiniteľa prestupu tepla, ako vidieť z tabuľky 2, sa pohybujú pre ten istý prípad v širokom rozmedzí. Najlepšie výsledky sa dosiahli s kriteriálnymi rovnicami č. 1 a 2

$$Nu = 0{,}62\ Re^{0{,}5}$$
$$Nu = 0{,}26\ Re^{0{,}6},$$

ktoré pre približné určenie prestupu tepla sú postačujúce. Presnejšie výsledky môžeme získať meraním na daných produktoch a ich vyhodnotením metódou regulárneho režimu.

Zoznam použitých označení

a	—	teplotná vodivosť (m^2/s)
K	—	koeficient formy (m^2)
L	—	dĺžka (m)
R	—	priemer, rozmer (m)
R_v	—	obecný rozmer telesa (m)
T	—	teplota telesa v ľubovoľnom bode a čase τ (deg)
		T (x, y, z, τ) — teplota telesa ako funkcia času a súradníc (deg)
T_0	—	počiatočná teplota telesa (deg)
T_s	—	teplota povrchu telesa (deg)
T_c	—	teplota okolia (deg)
w	—	rýchlosť vzduchu vo vrstve (m/sec)
α	—	súčiniteľ prestupu tepla (W/m^2deg)
τ	—	čas (sec)
Ar	—	Archimedovo kritérium (—)
Fo	—	Fourierovo kritérium (—)
Nu	—	Nuseltovo kritérium (—)
Re	—	Reynoldsovo kritérium (—)
Pr	—	Prandtlovo kritérium (—)

Literatúra

1. Sedlák, Mečárik, Ďuriač, Kabát, Intenzifikácia konzervačných procesov zmrazovaním, Výskumná správa, Bratislava (1967)
2. Lykov, Teorija teplopravodnosti, Moskva (1966)
3. Šorin, Sdílení tepla, Praha (1968)
4. Beránek, Sokol, Fluidní technika, Praha (1966)
5. Fedotov, Teoria i rasčet processa sušky vo vznešnom sostojanii, Moskva (1955)
6. Krjuková, Nekatorije voprosy teploobmena gaza s časticami, JFŽ (1958), č. 4
7. Lykov, Teplo- i masoobmen v procesach sušky (1958)
8. Zabrodskij, Gidrodinamika i teploobmen v psevdoživevnom sloje (1963)
9. Economics of present and future freezing methods, Ashre Journal, jún (1967), str. 36
10. Kondratjev, Regularnij teplovoj režim, Moskva (1964)

Термокинетика флюидизационного замораживания

Выводы

Процесс флюидизационного замораживания с точки зрения теплоты является не стационарным процессом. Скотость замораживания зависит от теплотных свойств продукта, его величины, формы и коэффициента перехода тепла из охлаждающего воздуха на продукт. Все эти факторы при исследовании термокинетических процессов флюидизационного замораживания можно включить в зависимости для вычисления времени охлаждения.

Зависимости (3, 4 и 5) позволяют определить протекание температур продукта в области I. и III. при известной величине коэффициента прохода тепла -. Вычисленные величины коэффициента прохода тепла как это приведено в таблице № 2 колеблются

в этом же самом случае в широком рубеже. Самые лучшие результаты получились с критериальными уравнениями № 1 и 2

$$\Pi_U = 0{,}62 \text{ Pe}^{0{,}5}$$
$$\Pi_U = 0{,}26 \text{ Pe}^{0{,}6}$$

которые для приблизительного определения прохода тепла достаточны. Точнейшие результаты можно приобрести измерением на данных продуктах и их оценкой методом регулярного режима.

Thermokinetics of fluid freezing

Resumé

The process of fluid freezing is, from the thermic point of view, a non-stationary process. The freezing-rate depends upon the thermic characteristics of the product, upon its size, its shape, and upon the coefficient of heat transfer between the blast air and the product. All of these factors of evaluation of the thermokinetic processes in fluid freezing are to be taken into account in calculating the freezing time. Relations (3, 4 and 5) allow the determination of progression in product temperautres in the domains I and III, with the known value of the coefficient of heat transfer α. The calculated values of the coefficient of heat transfer, as may be seen from table 2, are spread, in the same case, over a wide range. The best results were obtained by applying the criterial equations Nr. 1 and 2,

$$\text{Nu} = 0.62 \text{ Re}^{0.5}$$
$$\text{Nu} = 0.26 \text{ Re}^{0.6}$$

which, for an approximate determination of the coefficient of heat transfer, are quite adequate.

More accurate results can be obtained by completing measurements on the given products and the evaluation of them with the method of regular regime.