

# Sušenie zeleniny fluidným spôsobom

A. ŠEPITKA

---

## Ú v o d

Sušenie je jedným z dôležitých spôsobov konzervovania zeleniny. Doterajšie pokusy ukazujú, že sušením možno dosiahnuť produkt, ktorý čo do výživnej hodnoty zodpovedá čerstvej zelenine. Dôležitými ukazovateľmi, ktoré charakterizujú výborné kulinárne a potravinárske vlastnosti sušenej zeleniny, sú jej farba, chuť, vôňa, napučiavanie a taktiež obsah vo vode rozpustných látok a vitamínov. Prípadné zhoršenie kulinárnych vlastností sušenej zeleniny sa pripisuje na vrub reakciám neenzymatického charakteru, t. j. reakciám medzi látkami, ktoré obsahujú karbonylovú skupinu (redukujúce cukry, kyselina askorbová a pod.) a aminokyselinami. Na intenzitu týchto reakcií má predovšetkým vplyv chemické zloženie suroviny (preto má význam výber vhodných sort na sušenie), spôsob prípravy suroviny na sušenie, tepelný režim sušenia a čas sušenia.

Z doterajších našich poznatkov pri štúdiu vplyvu termodynamických a vnútorných podmienok sušenia na kvalitu produktu môžeme urobiť uzáver, že sušenie v prefukovanej vrstve by bolo najperspektívnejšie. Vysoká intenzita procesu, jeho krátke trvanie, rovnomerné ohriatie každej častice sú predpokladom, aby sa získal vysokohodnotný produkt.

Druhým intenzívnym spôsobom sušenia potravín, ktorý má význam hlavne v príprave potravín vo forme prášku s vysokou organoleptickou a výživnou hodnotou a je pritom rýchlo rozpustný alebo rehydrujúci, je penové sušenie.

Obidvoma týmito spôsobmi sušenia, t. j. fluidným a penovým sa študijne zaoberáme [1, 2].

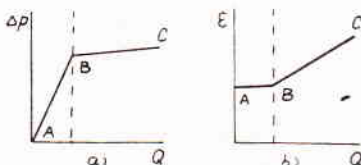
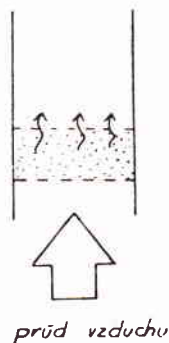
## Princíp fluidného sušenia

Na obr. 1 je znázornený prietok vzduchu cez sypký materiál. Unášacia sila vzduchu pôsobiaca na častice, stúpa s veľkosťou prietoku vzduchu. Len čo prietok vzduchu dosiahne určitú kritickú hodnotu, unášacia sila prekoná gravitačnú silu (váhu) častice a vrstva materiálu sa stáva tekutou (fluidnou). Tento stav sa označuje ako prah fluidizácie.

Vo smere prúdu vzduchu nastáva tlakový spád, ktorý rýchlo rastie až do výšky uvedeného prahu fluidizácie (bod B na obr. 2 a). Potom tlakový spád ostáva takmer konštantný, lebo nastáva zväčšenie medzier (porézności) medzi jednotlivými časticami, čím sa zväčšuje prietokový prierez pre prúd vzduchu (čiara B—C na obr. 2 b).

Ďalším zvyšovaním množstva prúdiaceho vzduchu zväčšuje sa poréznosť, až častice sú unášané prúdom vzduchu. Takto sa z fluidnej vrstvy stáva vrstva prúdová. Rozpätie rýchlosti vzduchu pre stav fluidizácie nie je veľké.

Blížšie podmienky pre fluidizáciu, ktoré berú do úvahy rýchlosť vzduchu,



Obr. 1. Prietok vzduchu cez sypký materiál.

Obr. 2. Závislosť tlakového spádu ( $\Delta p$ ) a porézności ( $\epsilon$ ) od množstva prúdiaceho vzduchu ( $Q$ )

poréznosť a priemer častíc (resp. ekvivalentný priemer častíc) sú znázornené na obr. III. Poréznosť je tu uvažovaná od  $\epsilon = 0,4$ , čo zodpovedá voľne sypanej vrstve do  $\epsilon = 1$ , čo zodpovedá podmienkam prúdenia častíc. Na krivke 1 a pod ňou pri  $\epsilon = 0,4$  leží oblasť bez fluidizácie. Na krivke 5 a nad ňou pri porézności  $\epsilon = 1$  leží oblasť práce prúdových (pneumatických) sušiarňí, ktoré pracujú v režime únosu. Medzi krivkami 1 a 5 leží oblasť fluidizácie.

V určitom intervale porézności ( $\epsilon = 0,55 - 0,75$ ) pracujú obyčajne priemyselné sušiarne polofluidné (polovznosové). Táto oblasť zahŕňa častice s priemerom od 30 až 40  $\mu$  do 6 až 7 mm (oblasť 2) a pre sušiarne kónického tvaru môže byť táto oblasť rozšírená do 25 až 30 mm (oblasť 3). Pri porézności vrstvy  $\epsilon = 0,75$  až 0,95 pracujú fluidné sušiarne (oblasť 4).

Vzduch prechádzajúci pri sušení cez fluidizujúcu vrstvu plní 3 úlohy: zabezpečuje prívod tepla, ďalej odvádzanie vlhkosti zo sušeného materiálu a jeho premiešavanie.

Zariadenia pre sušenie vo fluidnej vrstve, či už o konštantnom priemere alebo rozširujúce sa v smere vertikálnom, vďaka jednoduchosti konštrukcie, našli široké použitie v priemysle a čím ďalej tým viac sa presadzujú do potravinárskeho priemyslu a poľnohospodárstva. Typ fluidnej sušiarne je znázornený na obr. 4 (fy Büttner).

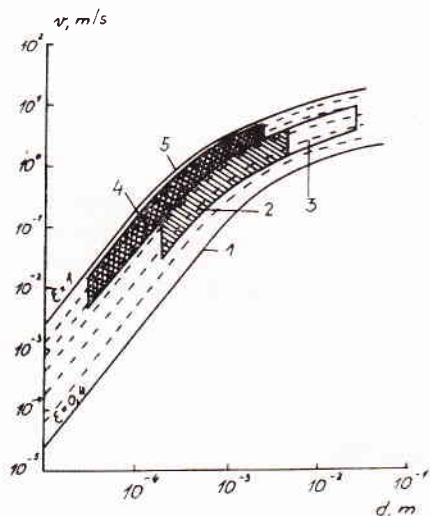
Nedostatkami fluidnej vrstvy v takýchto zariadeniach sú:

1. Nemožnosť zvýšenia rýchlosti vzduchu nad hodnotu hornej hranice fluidizácie;

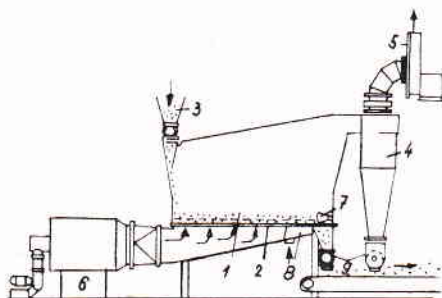
2. Obťažnejšie sa sušia polydisperzné materiály, čo si žiada určitú rovnomernosť krájania vhodnej veľkosti:

Uvedené nedostatky čiastočne kompenzuje možnosť zvýšenia výkonu týchto zariadení. Do istej miery spomínané nedostatky možno odstrániť použitím zariadenia, ktoré sa rozširuje po výške prierezu a takto sa potom môže pracovať aj v oblasti prúdenia častíc.

Za pomerne krátky čas vyvinuli sa konštrukčne mnohé typy fluidných sušiarňí, či už jednorazových alebo na nepretržitú prácu.



Obr. 3. Približná oblasť práce sušiarňí s prefukovanou vrstvou



Obr. 4. Schéma fluidnej sušiarne (Büttner)

- 1 — polovznosová vrstva; 2 — perforované dno; 3 — dávkovač; 4 — cyklón;  
5 — ventilátor; 6 — kalorifer; 7 — priehradka; 8 — zóna chladenia; 9 —  
vypúšťacie zariadenie

## Klasifikácia fluidných sušiarňí

V tabuľke 1 sa uvádza schéma klasifikácie fluidných sušiarňí.

Najrozšírenejšie sú komorové sušiarne, v ktorých fluidná vrstva sa vytvára na pevnom site rozdeľujúcim vzduch. Jednokomorové sušiarne sú veľmi jednoduché, no vo väčšine prípadov sa na sušenie potravín nehodia, lebo materiál sa suší a ohrieva nerovnomerne. Mnohokomorové sušiarne umožňujú získať vysušený produkt vysokej kvality. Sušiarne s postupným pohybom materiálu sú rozdelené na sekcie vertikálnymi priehradkami. Najčastejšie bývajú sekcie umiestnené nad sebou. Vo všetkých prípadoch materiál prechádza cez všetky sekcie a sušiaci vzduch sa privádza do každej sekcie zvlášť.

Najlepšie výsledky čo do rovnomernosti sušenia sa môžu získať v sušiarňach s núteným premiestňovaním sušeného materiálu po rozdeľovacom site.

Pri sušiarňach s konštantným režimom práce, keď sú základné parametre (teplota, vlhkosť a rýchlosť vzduchu) počas celého procesu sušenia konštantné, ťažko možno získať vysušený produkt vysokej kvality. V sušiarňach s premennými parametrami sušiaceho vzduchu, najmä s kontinuálnym režimom práce, premenný režim sušenia sa dosahuje prívodom vzduchu o rôznych termodynamických parametroch do každej zóny sušiarne.

V sušiarňach s cyklickým (oscilujúcim) režimom sušenia sušený materiál sa periodicky ohrieva a ochladzuje. Pre sušenie potravín takýto oscilujúci režim sušenia sa javí pri fluidnom sušení najslubnejšie.

V sušiarňach bez núteného mechanického premiestňovania a premiešavania materiálu proces sušenia treba vykonávať v druhom štádiu fluidizácie (vrenie), keď je zabezpečené energické premiešavanie vrstvy, čím sa zamedzí prehriatie a zhoršenie kvality sušeného materiálu pri nerovnomernom vrení, ktoré je v prvom štádiu fluidizácie.

Tabuľka 1. Schéma klasifikácie fluidných sušiarňí

Klasifikačný znak	Typ sušiarne
Konštrukcia	a) komorová b) pásová c) rotačná d) šneková e) vibračná
Počet sekcií	a) jednokomorová b) mnohokomorová
Spôsob premiestňovania materiálu	a) samovoľne v dôsledku prúdenia vrstvy b) s prinúteným premiestňovaním materiálu
Tvar sušiacej komory	a) s valcovou komorou b) s komorou pravouhlého prierezu c) s kužeľovou komorou
Režim práce	a) pretržitý b) nepretržitý c) polonepretržitý d) so stálym režimom e) s nestálym režimom f) s cyklickým režimom
Forma sušeného materiálu	a) zrnitý materiál b) pastovitý materiál c) kvapalný materiál
Spôsob prívodu tepla	a) konvektívny b) konduktívny c) kombinovaný

Pre prax má vážny význam určenie hranice existencie fluidizujúcej vrstvy (kritickej rýchlosti vzduchu a rýchlosti úletu) a taktiež stanovenie hydraulického odporu a porézności fluidizujúcej vrstvy. Pretože doteraz niet jedinej a dostatočne spoľahlivej výpočtovej formuly na určenie kritickej rýchlosti fluidizácie, musíme ju stanovovať experimentálne pre každý materiál a uvažované podmienky.

Pri sušení potravín sa menia nielen rozmery, tvar a hustota častíc, ale aj stav ich povrchu, s čím treba uvažovať pri výbere a regulovaní aerodynamického režimu práce sušiarne vo fluidnej vrstve.

Aby sme mohli číselne podchytiť proces sušenia a určiť veľkosť sušiarne pre sušenie s prefukovanou vrstvou, treba nám vedieť predovšetkým rýchlosti procesov výmeny tepla a vlhkosti. Sumárne rýchlosť sušenia závisí od intenzity výmeny tepla potrebného na ohriatie materiálu a odparovanie vlhkosti a od odporu vnútornej difúzie vlhkosti k povrchu vysušovanej častice.

Podľa poznatkov z nášho štúdia vplyvu termodynamických a vnútorných podmienok na priebeh sušenia môžeme súdiť, že sušenie s prefukovanou vrstvou prebieha prakticky medzi týmito dvoma krajnými stavmi [1, 4]:

1. Sušenie v podstate prebieha iba v perióde konštantnej rýchlosti, pričom teplota sušeného produktu je konštantná a rovná sa teplote vlhkého teplomeru. V tomto prípade proces sušenia a jeho rýchlosť určuje množstvo privádzaného tepla a rýchlosť jeho prívodu. Ako ukázali naše predchádzajúce pokusy, vhodnou úpravou vnútorných podmienok sušenia (napr. rozmermi krájania) možno dosiahnuť tento stav, i keď v niektorých prípadoch to bude iba určitá časť z celkovej dĺžky sušenia.

2. Druhým krajným prípadom je sušenie produktu, ktorý kladie značný termický odpor vnútornej difúzii vlhkosti z vnútorných častí produktu na povrch. V tomto prípade rýchlosť sušenia prakticky závisí iba od teploty a vlhkosti materiálu a takmer je bez závislosti od rýchlosti prúdenia a zmeny vlhkosti vzduchu (veľké rozmery krájania).

Štúdiu intezity výmeny tepla v prefukovanej vrstve bolo zasvätených už niekoľko experimentálnych prác. I. M. Fedorov [5] na základe svojich prác prišiel k záveru, že intenzita výmeny tepla v prefukovanej vrstve je taká veľká, že pri strednom rozmere častíc 3 mm sušiaci vzduch sa bude ochladzovať prakticky na teplotu sušeného produktu už pri mernom plnení vrstvy 80 kg/m<sup>2</sup>. V takýchto jednoduchých prípadoch výmenu tepla medzi vzduchom a sušeným produktom možno počítať aj pri neznámych koeficientoch priestupu tepla ( $\alpha$ ) z energetickej bilancie.

Pre iné zložitejšie prípady K. Kittenring a spol. dostal rovnicu pre Re 9 až 50

$$Nu = 0,0135 Re^{1,3}$$

Uvedená rovnica, ako aj iné podobné nezahrňuje všetky premenné, ktoré majú vplyv na koeficient výmeny tepla v prefukovanej vrstve.

Doterajšie výsledky mnohých autorov sú protichodné, čo sa týka vplyvu rôznych premenných na koeficient výmeny tepla v prefukovanej vrstve, či už ide o vplyv hrúbky vrstvy, rýchlosti vzduchu, usporiadania sita, počiatočnej vlhkosti materiálu a pod. Preto pri riešení praktických úloh sa nezaobíde riešiteľ bez vlastnej experimentálnej práce na konkrétnom uvažovanom ma-

teriáli, ktorý chce v predpokladanom type sušiarne a prefukovanou vrstvou sušiť.

Problémy výmeny tepla a kinetiky procesu sušenia v prefukovanej vrstve sa intenzívne študujú a potrvá istý čas, kým sa dospeje k všeobecnejším záverom a súvislostiam. Vzhľadom na rozdielne termofyzikálne vlastnosti a vlastnosti týkajúce sa výmeny vlhkosti nemožno poznatky zo sušenia jedného produktu prenášať pre riešenie praktických problémov na druhý produkt.

V záujme získania vlastných poznatkov pre praktické riešenie sušenia zeleniny s prefukovanou vrstvou študovali sme tento spôsob sušenia na laboratórnej fluidnej sušiarňi, ktorú nám zhotovili podľa zadania pracovníci Vzduchotechniky v Novom Meste nad Váhom.

### Experimentálna časť

Laboratórna fluidná sušiareň bola opatrená zariadením na meranie a reguláciu teploty cirkulujúceho vzduchu. Rýchlosť vzduchu bolo možno regulovať elektromagnetickým regulátorom otáčok ventilátora v rozmedzí 0 až 6 m/s. Okrem úplnej cirkulácie vzduchu bolo možné prísun čerstvého vzduchu regulovať nastaviteľnými klapkami. Aktívna plocha sušenia (síta) bola 0,07 m<sup>2</sup>.

#### Sušenie karotky a petržlenu

Na uvedenej sušiarňi sme študovali sušenie s prefukovanou vrstvou karotky a petržlenu. Zeleninu sme očistili a porezali na hranolky o rozmeroch 2×0,5×0,5 cm a blanšírovali 3 minúty vo vriacej vode. Po nastavení režimu práce fluidnej sušiarne odvážené množstvo zeleniny sme rovnomerne rozprestrelí na sito koša sušiarne. Pri rovnakých režimových parametroch, t. j. teplote vzduchu 70 °C a jeho rýchlosti 5 m/s, sme menili iba navážku mrkvy a petržlenu a tým aj hrúbku vrstvy. Jednotlivé vsádzky boli následovné: 14,3; 21,4; 28,5; 35,6; 42,7 kg/m<sup>2</sup>, čo zodpovedalo hrúbkam vrstvy u karotky 3; 4; 5,2; 6 a 6,5 cm a u petržlenu 2,5; 4,2 a 5 cm.

Mrkvu a petržlen sme počas sušenia vážili v týchto intervaloch: 15, 30, 60, 90, 150 a 210 minút.

Na základe zistenia úbytku na hmote a konečných rozborov sme vypočítali obsah vlhkosti počas sušenia a zostrojili krivky sušenia.

Krivky sušenia karotky uvádzame na obr. 5 a petržlenu na obr. 6.

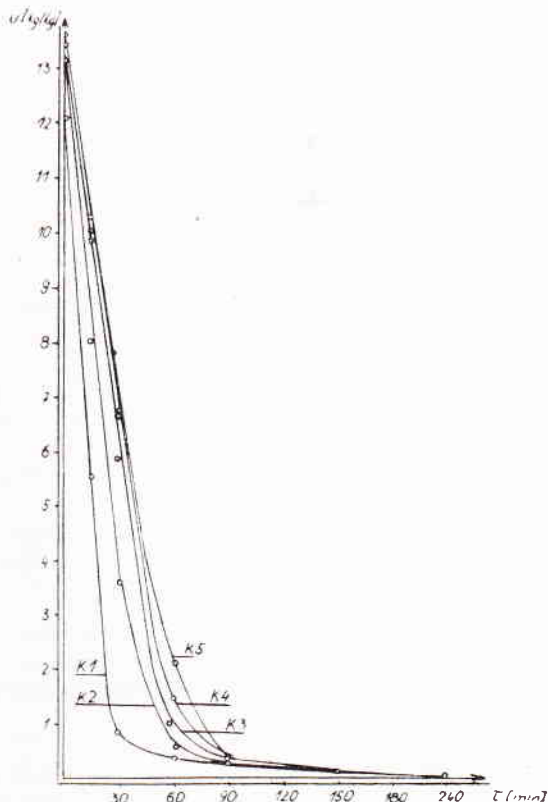
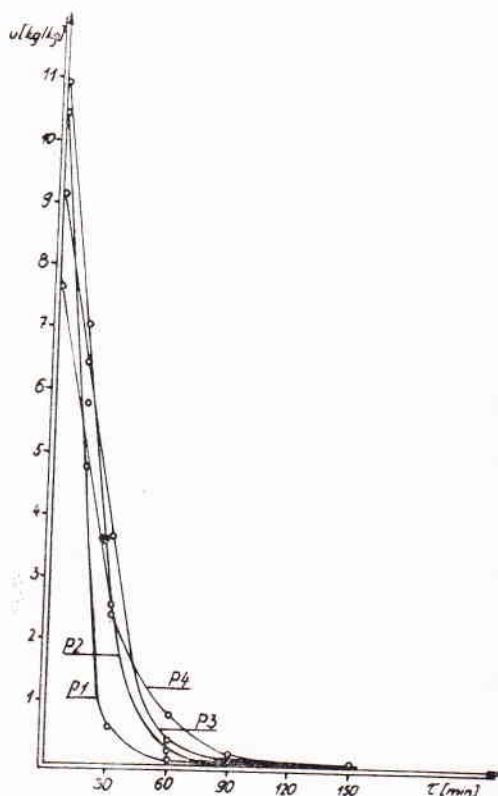
Jednou z predností sušenia s prefukovanou vrstvou v porovnaní s vrstvou kompaktnou je to, že merná vsádzka materiálu môže byť značná. Ak pri sušení v nepohyblivej vrstve na pásových, v tunelových a skriňových sušiarňach sa odporúča merná vsádzka od 5 do 17 kg/m<sup>2</sup>, pri sušení s prefukovanou vrstvou merné plnenie suroviny môže značne prekročiť túto hodnotu (najväčšie nami použité merné plnenie bolo 43 kg m<sup>-2</sup>) a predpokladáme, že môžeme dosiahnuť až 2—3-násobné hodnoty.

Z obr. 5 a 6 môžeme vyčítať, že konečnú vlhkosť, napr. 5 ‰, možno pri teplote sušiacieho média 70 °C dosiahnuť bez rozdielu použitej mernej vsádzky za 2,5 hodiny. Zvýšením teploty média, čo fluidizácia umožňuje, možno tento čas ešte viac skrátiť.

Vplyv vsádzky na rýchlosť sušenia je výrazný po znížení vlhkosti na 35 ‰. Pri ďalšom sušení vo fáze klesajúcej rýchlosti sa tento vplyv stráca a od 20 ‰



vlhkosti krivky sušenia pre rôzne vsádzky prechádzajú takmer do jednej spoločnej krivky. Až by tento režim sušenia vyhovoval pre daný materiál, bolo by výhodné dosušovanie mrkvy z 20 % vlhkosti na potrebnú konečnú vlhkosť, napr. 5 %, robiť vo zvláštnom bunkre, kde by sa nasadil len taký jemný režim dosušenia, ktorý by dosušenie ešte intenzifikoval.



Obr. 5. Porovnanie kriviek sušenia karotky (Nantes) sušenej fluidným spôsobom. Podmienky sušenia:  $t = 70^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 5 \text{ m/s}$ ; rozmery krájania:  $2 \times 0,5 \times 0,5 \text{ cm}$ ; vsádzky:  $K_1 - 14,3 \text{ kg/m}^2$ ;  $h = 3 \text{ cm}$   
 $K_2 - 21,4 \text{ kg/m}^2$ ;  $h = 4 \text{ cm}$   
 $K_3 - 28,5 \text{ kg/m}^2$ ;  $h = 5,5 \text{ cm}$   
 $K_4 - 35,6 \text{ kg/m}^2$ ;  $h = 6 \text{ cm}$   
 $K_5 - 42,7 \text{ kg/m}^2$ ;  $h = 6,5 \text{ cm}$

Obr. 6. Porovnanie kriviek sušenia petržlenu sušeného fluidným spôsobom. Podmienky sušenia:  $t = 70^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 5 \text{ m/s}$ ; rozmery krájania:  $2 \times 0,5 \times 0,5 \text{ cm}$ ; vsádzky:  $P_1 - 14,3 \text{ kg/m}^2$ ;  $h = 2,5 \text{ cm}$   
 $P_2 - 21,4 \text{ kg/m}^2$ ;  $h = 3 \text{ cm}$   
 $P_3 - 28,5 \text{ kg/m}^2$ ;  $h = 4,2 \text{ cm}$   
 $P_4 - 35,6 \text{ kg/m}^2$ ;  $h = 5 \text{ cm}$

Na základe hodnotenia fluidným spôsobom sušenej karotky a petržlenu podľa 100-bodového systému môžeme súdiť, že fluidným sušením zeleniny za pre-skúšaného režimu možno vyrobiť sušenú zelninu predpísanej kvality.

V ďalších pokusoch sušenia zeleniny fluidným spôsobom chceme odskúšať aj iné tepelné režimy a úpravy zeleniny pred sušením tak, aby sme zistili najoptimálnejší režim sušenia, včítane použitia aj oscilujúcich režimov.

### Súhrn

V práci sa rozoberá problematika sušenia zeleniny fluidným spôsobom. Uvádzajú sa princíp fluidného sušenia, podmienky fluidizácie sypkého materiálu, prednosti a nedostatky použitia fluidnej vrstvy pri sušení zeleniny, ako aj klasifikácia fluidných sušární s poukázaním na vhodné typy prichádzajúce do úvahy pri sušení zeleniny. V experimentálnej časti sa uvádzajú výsledky sušenia karotky a petržlenu.

### Literatúra

1. Šepitka A., Šiška Š., Vplyv vonkajších a vnútorných podmienok sušenia na niektoré fyzikálne a chemické zmeny sušeného produktu, dielčia správa ÚVÚPP, Bratislava 1968
2. Šepitka A., Mihalkovičová L., Klindová M., Štúdium sušenia s prefukovanou vrstvou. Štúdium penového sušenia, dielčia správa SPA — VÚ potravinársky, Bratislava 1969
3. Romankov P. G., Rjaškovskaja N. B., Suška vo vzvešenom sotojanii. Leningrad 1968
4. Šepitka A., Šiška Š., Vplyv termodynamických podmienok sušenia na niektoré fyzikálne a chemické zmeny mrkvy, dielčia správa ÚVÚPP, Bratislava 1967
5. Ginzburg A. S., Rezcikov V. A., Suška piščevych produktov v kipjaščem sloje, Moskva 1966.

### Сушка овощей в взвешенном состоянии

#### Выводы

Работа трактует проблематику сушки овощей в взвешенном состоянии. Приводит принципы сушки в взвешенном состоянии, условия флюидизации сыпучего материала, преимущества и недостатки применения взвешенного слоя при сушке овощей и также классификацию флюидизационных сушилок, ссылаясь на подходящие типы, которые учитываются при сушке овощей. В экспериментальной части приводятся результаты сушки морковки и петрушки.

### Drying of vegetables by fluidization

#### Summary

The problems of the vegetables drying by fluidization are treated in this paper: Mentioned are the principle of fluid drying, conditions of the fluidization of loose materials, the advantages and disadvantages in the use of fluid layer at vegetables drying and the classification of fluid drying rooms with referring to suitable types to be taken into account at vegetables drying. In experimental part the results of carrot and parsley drying are mentioned.