

## 4 SUŠIARNE

Sušením rozumieme fyzikálny dej, pri ktorom sa účinkom tepla znižuje obsah kvapaliny (najčastejšie vody alebo rozpúšťadla) v látkach bez toho, aby sa menilo ich ďalšie chemické zloženie. Kvapalina sa odstraňuje vyparovaním, odparovaním alebo sublimáciou. Odstraňovanie kvapaliny z materiálu iným ako tepelným spôsobom (mechanickým – filtrácia, cedenie, žmýkanie, odstredovanie, usadzovanie alebo chemickým) nepovažujeme za sušenie. Účelom sušiacoho procesu je teda zmenšiť obsah kvapaliny vo vysušovanej látke za súčasnej zmeny jej technologických vlastností:

- dosiahnutie určitých fyzikálno-chemických vlastností (chemické produkty),
- zlepšenie štruktúrnych a tepelných vlastností materiálu (drevo, keramika, stavebné látky, izolačné materiály a pod.),
- zvýšenie výhrevnosti a zlepšenie spaľovania (palivá),
- zlepšenie konzervačných schopností (poľnohospodárske a potravinárske produkty),
- zlepšenie biochemických vlastností (zrno, semená).

Sušenie je veľmi rozšírený technologický proces, uplatňujúci sa temer v každom priemyselnom odvetví. V chemickom priemysle predstavuje jednu z najdôležitejších základných operácií.

### HLAVNÉ ODBORY TEÓRIE SUŠENIA

Tepelné sušenie je zložitý fyzikálny dej, pri ktorom prebiehajú nevratné fyzikálno-mechanické, koloidno-fyzikálne a biochemické zmeny. Teória sušenia je preto v podstate založená na dvoch vedných odboroch, a to na teórii prestupu tepla a prenosu látky a na teórii väzby vlhkosti v látke. Skúma rýchlosť sušenia a vplyvy, ktorými na ne pôsobia parametre vysušovanej látky a sušiacoho prostredia.

#### **STATIKA SUŠENIA**

Udáva súvislosti medzi veličinami charakterizujúcimi počiatočné a konečné parametre látok zúčastnených na sušiacom deji. Okrem materiálovej a energetickej bilancie sušiacoho deja hodnotí statika danú látku z hľadiska sušenia, zvlášť jej väzbu s vlhkosťou.

#### **DYNAMIKA SUŠENIA**

Určuje súvislosti medzi zmenou vlhkosti vysušeneho materiálu a parametrami sušiacoho procesu. Má teda všeobecne určiť zmenu vlhkosti vysušovaného materiálu v mieste a čase v závislosti od mernej vlhkosti a väzby vlhkosti s daným materiálom, od rozdelenia teploty v látke, spôsobu sušenia a od druhu a konštrukcie sušiarne. Ak nie sú známe všetky potrebné závislosti, sledujeme zmenu strednej vlhkosti materiálu v závislosti od parametrov sušenia a zostavujeme potrebné vzťahy pre výpočet sušiacoho času. Niekedy sa táto časť sušiarenskej teórie, ktorá v podstate patrí do dynamiky sušenia, nazýva *kinetika sušenia*.

### VONKAJŠIE A VNÚTORNÉ PODMIENKY SUŠENIA

Podmienky, za ktorých sa privádza teplo potrebné na odstránenie vlhkosti a odvádzanie vznikajúcej pary, nazývame vonkajšie podmienky sušenia. Sú dané aerodynamickými a termodynamickými pomermi v sušiacom priestore a možno ich ovplyvniť voľbou spôsobu sušenia, konštrukciou sušiarne a predpisom sušiacoho procesu.

Vnútorne podmienky sušenia sú charakterizované väzbou vlhkosti v látke a jej pohybom vo vysušovanej látke. Závisia od povahy vysušovanej látky a pri sušení ich môžeme ovplyvniť iba v obmedzenej miere. Patria sem najmä štruktúra materiálu a jeho forma, fyzikálne vlastnosti sušiny a vlhkosti, schopnosť látky viesť vlhkosť a teplo a iné.

## SUŠIACE PROSTREDIE

Prívod tepla potrebného na odparenie vlhkosti sa môže diať konvekčným, sálavým, kontaktným prívodom tepla, vysokofrekvenčným, dielektrickým, indukčným alebo odporovým ohrevom alebo ich kombináciou. Na odvádzanie vlhkosti z povrchu, na ktorom dochádza ku odparovaniu, je však potrebné sušiacie prostredie, ktoré vlhkosť odparenú vo forme pary pohlcuje.

V technickej praxi je najčastejším sušiacim prostredím vzduch a vlhkosťou voda. Projekt sušiarne musí teda zaistiť, aby vzduch prúdil sušiarňou v takom množstve a v takom stave, aby mohol pohltiť celkové množstvo odparenej vody (pri konvenčných sušiarňach k tomu ešte pristupuje požiadavka, aby vzduch odovzdal materiálu i potrebné množstvo tepla). Pre statický výpočet je teda nevyhnutné poznať zákonitosti, ktorými sa riadi priebeh zmeny sušiaceho prostredia.

## DIAGRAM VLHKÉHO VZDUCHU

Vzduch použitý ako sušiacie prostredie je zmesou suchého vzduchu a vodnej pary, tzv. vlhký vzduch. Fyzikálne veličiny vlhkého vzduchu sú prehľadne graficky znázornené v diagrame vlhkého vzduchu. Diagram budeme nazývať *i - Y diagram vlhkého vzduchu* (v literatúre nájdeme aj označenie *i - x; h - x; h - Y*) a je znázornený na obrázku 4.1.

V *i - Y* diagrame sú prehľadne vyznačené a odčítateľné tieto veličiny:

- **na vodorovnej osi je obsah vodnej pary v 1 kg suchého vzduchu  $Y$**   
Obsah vodnej pary  $Y$  (niekedy sa nazýva aj absolútna vlhkosť) vo vzduchu nemôže byť ľubovoľný. Vodné pary sú v prehriatom stave, na krivke sýtosti (pri nasýtení) je para sýta.
- **na zvislej osi je tepelný obsah (entalpia) vlhkého vzduchu  $i$ , teplota suchého teplomera  $T$  a teplota mokrého teplomera  $T_m$**   
Tepelný obsah  $i$  sa skladá z tepelného obsahu suchého vzduchu a tepelného obsahu vodnej pary.

$$i = c_{pv} T + Y(r_0 + c_{pvp} T) \quad (4.1)$$

	kde	
$i$	– entalpia vlhkého vzduchu	(J. kg <sup>-1</sup> )
$c_{pv}$	– stredné merné teplo vzduchu	(J. kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$T$	– teplota vzduchu	(K)
$Y$	– obsah vodnej pary v 1kg suchého vzduchu	(kg. kg <sup>-1</sup> )
$r_0$	– výparné teplo vody pri teplote 0 °C	(J. kg <sup>-1</sup> )
$c_{pvp}$	– stredné merné teplo pary	(J. kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )

Teplota suchého teplomera  $T$  je teplota nameraná bežným teplomerom.

Teplota mokrého teplomera  $T_m$  je taká teplota, ktorá sa nameria špeciálne upraveným teplomerom. Je to bežný teplomer, napr. vláknový, pri ktorom sa spodná časť (banka) obalí mokrým mušelínom alebo knôtom pri stálom napájaní knôtu destilovanou vodou a teplomer sa zavesí do prúdiaceho vzduchu, pričom musí byť chránený proti sálaniu tepla z okolia. Teplota, na ktorej sa ustáli, sa nazýva mokrá alebo vlhká teplota.

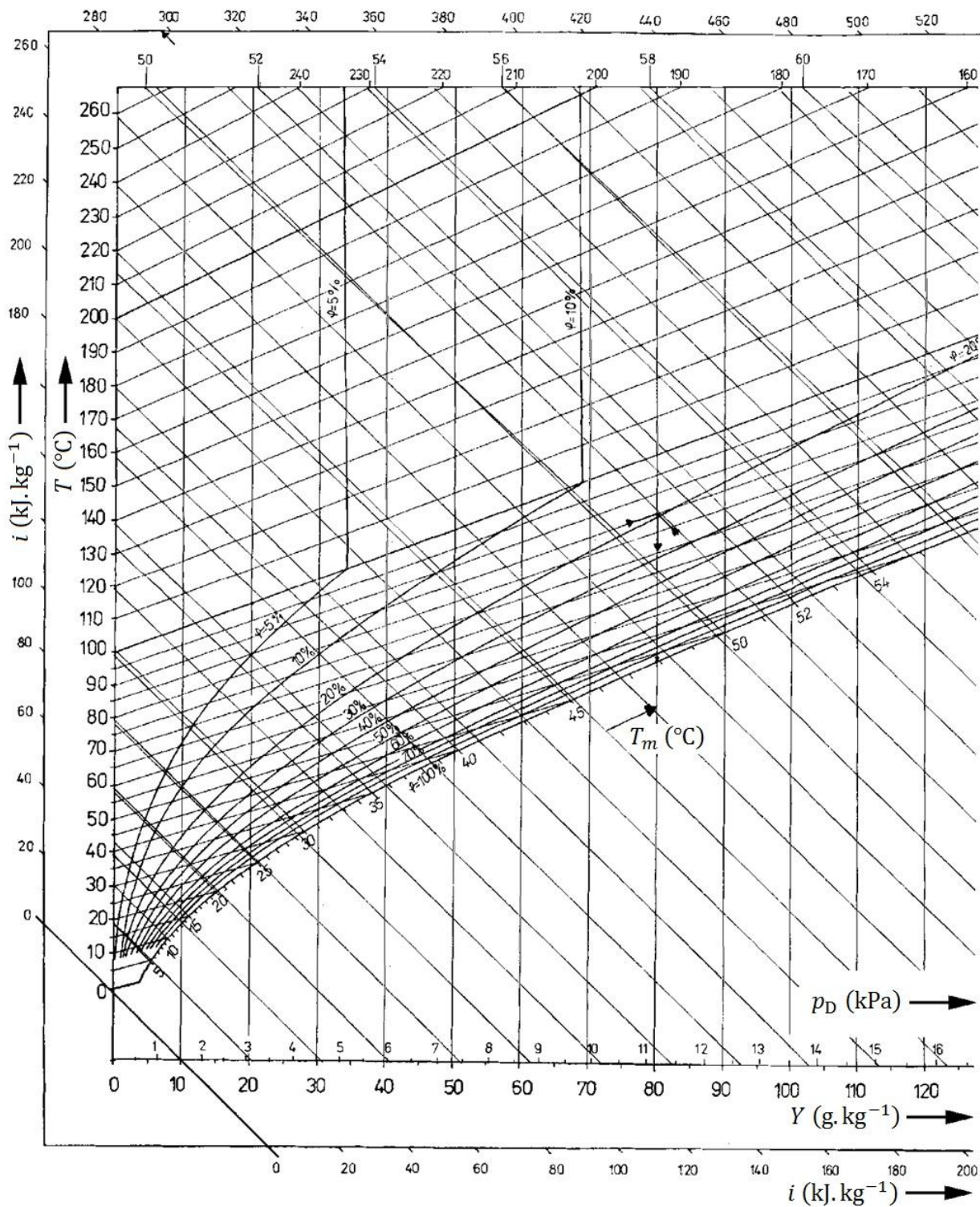
- **relatívna vlhkosť**  $\varphi$  od 0 do 100 %

Relatívna vlhkosť  $\varphi$  je pomer parciálneho tlaku vodnej pary nachádzajúcej sa vo vzduchu k parciálnemu tlaku pary pri nasýtení. Je znázornená rozbiehajúcimi sa krivkami, pričom spodná krivka, označená 1,0 (alebo 100 %) sa nazýva medzná krivka alebo krivka nasýtenia. Oblasť pod medznou krivkou sa nazýva oblasť hmly, vzduch je tu presýtený kvapalnou fázou.

- **rosný bod**

Teplota rosného bodu je teplota, pri ktorej je vzduch maximálne nasýtený vodnými parami (relatívna vlhkosť vzduchu je 100 %) Ak teplota vzduchu klesne pod túto hodnotu, nastáva kondenzácia.

Okrem uvedených veličín na  $i - Y$  diagrame môžeme odčítať parciálny tlak vodných pár vo vzduchu a na okrajovej mierke zmenu stavu vzduchu  $\frac{\Delta i}{\Delta Y}$ .



Obr. 4.1.  $i - Y$  diagram vlhkého vzduchu ( $p_b = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ ) [9]

## VLHKÉ TELESO

Vlhké teleso môžeme charakterizovať ako systém tvorený suchou tuhú látkou (skeletom) a kvapalinou.

Pomer kvapaliny a absolútne suchej látky vyjadruje merná vlhkosť  $u$ . Pretože absolútne suchá látka existuje len v celkom zvláštnych podmienkach, bol v sušiarstve zavedený pojem sušiny vlhkého materiálu  $m_s$ . Sušina je určená nemennou hmotnosťou, ktorú dosiahne vzorka vysušovaná pri dohovorenej teplote, najčastejšie 105 °C. Tepelne citlivé látky sušíme pri nižšej teplote, údaj sušiny však musí byť doplnený o hodnotu použitej teploty sušenia. Ak označíme hmotnosť vlhkosti  $m_v$ , merná vlhkosť sa vyjadrí vzťahom

$$u = \frac{m_v}{m_s} \quad (4.2)$$

Pre látku, ktorej sušinu by sme namerali pri 50 °C, by sa vyjadřila merná vlhkosť vzťahom

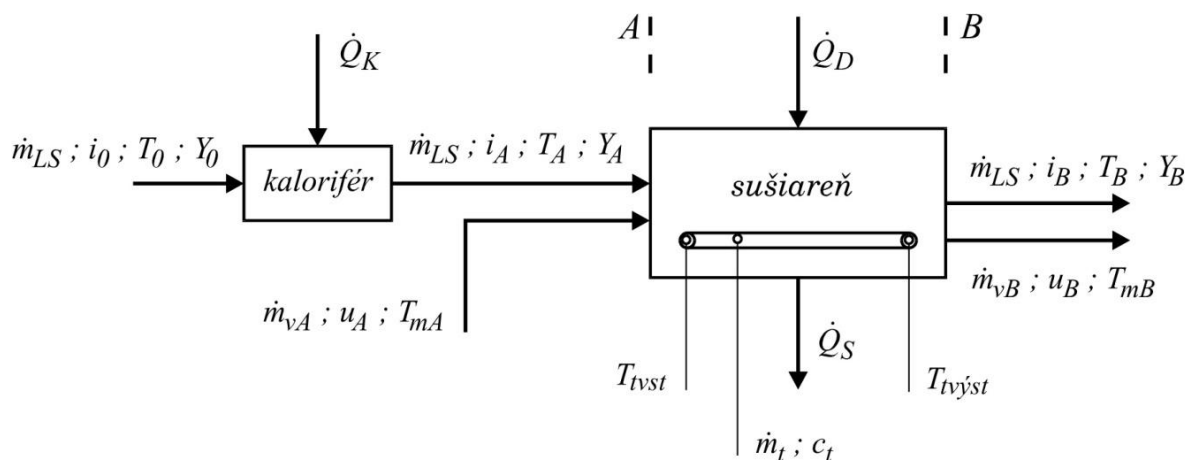
$$u = \frac{m_v}{m_{s(50^\circ\text{C})}} \quad (4.3)$$

Okrem mernej vlhkosti sa vyjadřuje obsah kvapaliny podielom vlhkosti, určený pomerom hmotnosti vlhkosti  $m_v$  k počiatkovej hmotnosti látky  $m_A$ . Táto merná vlhkosť sa označuje ako merná vlhkosť na vstupe do sušiarne  $u_A$  a je vyjadřená vzťahom

$$u_A = \frac{m_v}{m_A} = \frac{m_v}{m_v + m_s} \quad (4.4)$$

## LÁTKOVÁ A ENERGETICKÁ BILANCIA SUŠIARNE

Pri sušení v prúde sušiaceho prostredia sa teplonosná látka stýka s povrchom vlhkého materiálu, pohlcuje z neho isté množstvo vlhkosti a odchádza zo sušiarne. Teplonosnými látkami bývajú pri sušení najmä ohriaty vzduch a riedené spaliny. Schéma sušiarne je na obrázku 4.2, kde vstupná časť je označená A, výstupná B.



Obr. 4.2. Schéma sušiarne [9]

Prehľad označovania v obrázku 4.2:

$\dot{m}_{LS}$	– hmotnostný tok suchého vzduchu prechádzajúceho sušiarňou	(kg. s <sup>-1</sup> )
$i_0$	– entalpia vzduchu vstupujúceho do kaloriféra	(J. kg <sup>-1</sup> )
$T_0$	– teplota vzduchu vstupujúceho do kaloriféra	(K)
$Y_0$	– absolútna vlhkosť vzduchu vstupujúceho do kaloriféra	(kg. kg <sup>-1</sup> )
$i_A$	– entalpia vzduchu vstupujúceho do sušiarne	(J. kg <sup>-1</sup> )
$T_A$	– teplota vzduchu vstupujúceho do sušiarne	(K)
$Y_A$	– absolútna vlhkosť vzduchu vstupujúceho do sušiarne	(kg. kg <sup>-1</sup> )
$\dot{m}_S$	– hmotnostný tok suchého materiálu (sušiny) sušiarňou	(kg. s <sup>-1</sup> )
$u_A$	– merná vlhkosť materiálu na vstupe do sušiarne	(kg. kg <sup>-1</sup> )
$u_B$	– merná vlhkosť materiálu pri výstupe zo sušiarne	(kg. kg <sup>-1</sup> )
$T_{mA}$	– teplota materiálu pri vstupe do sušiarne	(K)
$T_{mB}$	– teplota materiálu na výstupe zo sušiarne	(K)
$\dot{m}_t$	– hmotnostný tok transportných zariadení dopravujúcich sušený materiál	(kg. s <sup>-1</sup> )
$c_S$	– špecifická tepelná kapacita suchého materiálu (sušiny)	(J. kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$c_v$	– špecifická tepelná kapacita vody	(J. kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$c_t$	– špecifická tepelná kapacita transportných zariadení	(J. kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$T_{tvst}$	– teplota transportných zariadení na vstupe	(K)
$T_{tvýst}$	– teplota transportných zariadení pri výstupe	(K)
$\dot{Q}$	– celkové množstvo tepla spotrebované na sušenie	(W)
$\dot{Q}_K$	– množstvo tepla spotrebované v kaloriféri	(W)
$\dot{Q}_D$	– množstvo tepla privedené priamo do sušiarne	(W)
$\dot{Q}_S$	– straty tepla zo sušiarne do okolia	(W)

Vlhký materiál vstupuje do sušiarne v mieste označenom *A*, pomocou dopravného (transportného) zariadenia sa pohybuje sušiarňou a v mieste *B* ju opúšťa. Studený vzduch sa nasáva ventilátorom do kalorifera (ohrievača), kde sa ohreje z teploty  $T_0$  na teplotu  $T_A$  a prechádza do sušiarne. Vzduch pri styku s materiálom pohlcuje z neho vlhkosť a s teplotou  $T_B$  opúšťa sušiareň. Niekedy sa vzduch dodatočne zahrieva, alebo sa mu všetko teplo potrebné na sušenie dodáva v samotnej sušiarne (na obr. 4.2 označené ako  $\dot{Q}_D$ ).

Na obrázku 4.2 je znázornený základný proces sušenia, v ktorom sa sušiaca látka použila iba jedenkrát. Používajú sa aj ďalšie obmeny základného procesu, ktoré vyžadujú rozmanité konštrukčné úpravy.

Na určenie spotreby vzduchu a tepla sa zostavujú látkové a energetické bilancie. V ustálenom stave vstupuje do sušiarne vlhkostný tok  $\dot{m}_{vA} = \dot{m}_S u_A$  a vystupuje zo sušiarne  $\dot{m}_{vB} = \dot{m}_S u_B$ , potom je hmotnostný tok odparenej vody daný vzťahom

$$\dot{m}_v = \dot{m}_S (u_A - u_B) \quad (4.5)$$

So vzduchom prichádza do sušiarne vlhkosť  $\dot{m}_{LA} = \dot{m}_{LS} Y_A$  a s vystupujúcim vzduchom odchádza  $\dot{m}_{LB} = \dot{m}_{LS} Y_B$ , potom vzduch prechádzajúci sušiarňou odoberie vlhkosť definovanú vzťahom

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{LS} (Y_B - Y_A) \quad (4.6)$$

Úpravou vzťahu (4.6) vznikne nasledovný vzťah.

$$\frac{\dot{m}_{LS}}{\dot{m}_v} = \frac{1}{Y_B - Y_A} = l \quad (4.7)$$

Písmenom  $l$  ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), vo vzťahu (4.7), označujeme množstvo vzduchu, potrebného na odparenie 1 kg vody, čo nazývame merná spotreba vzduchu. Pre vzťah (4.7) platí podmienka ohrevu vzduchu za konštantnej vlhkosti, a preto  $Y_A = Y_0$ .

Do sušiarne vstupujú a zo sušiarne vystupujú tieto tepelné toky:

Tabuľka 4.1. Tepelné toky vstupujúce do sušiarne a vystupujúce zo sušiarne

VSTUP	tepelný tok (W)
So studeným prichádzajúcim vzduchom	$\dot{m}_{LS} i_0$
S vlhkosťou v materiáli	$\dot{m}_v c_v T_{mA}$
So suchým materiálom	$\dot{m}_S c_S T_{mA}$
S transportným zaradením na vstupe	$\dot{m}_t c_t T_{tvst}$
Tepelný tok privedený v kaloriféri	$\dot{Q}_K$
Dodatočný tepelný tok privedený priamo do sušiarne	$\dot{Q}_D$
VÝSTUP	tepelný tok (W)
S odchádzajúcim vzduchom	$\dot{m}_{LS} i_B$
S odchádzajúcim vysušeným materiálom	$\dot{m}_S c_S T_{mB}$
S transportným zariadením na výstupe	$\dot{m}_t c_t T_{tvýst}$
Straty do okolia	$\dot{Q}_S$

Porovnaním vstupujúcich a vystupujúcich tepelných tokov sa dostane vzťah

$$\begin{aligned} \dot{m}_{LS} i_0 + \dot{m}_v c_v T_{mA} + \dot{m}_S c_S T_{mA} + \dot{m}_t c_t T_{tvst} + \dot{Q}_K + \dot{Q}_D = \\ = \dot{m}_{LS} i_B + \dot{m}_S c_S T_{mB} + \dot{m}_t c_t T_{tvýst} + \dot{Q}_S \end{aligned} \quad (4.8)$$

a jeho úpravou sa získa

$$\begin{aligned} \dot{Q} = \dot{Q}_K + \dot{Q}_D = \dot{m}_{LS} (i_B - i_0) + \dot{m}_S c_S (T_{mB} - T_{mA}) + \\ + \dot{m}_t c_t (T_{tvýst} - T_{tvst}) + \dot{Q}_S - \dot{m}_v c_v T_{mA} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Podelením predchádzajúcej rovnice hmotnostným tokom odparenej vody  $\dot{m}_v$  vznikne merná spotreba tepla  $q$  ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), vzťah (4.10) a (4.11).

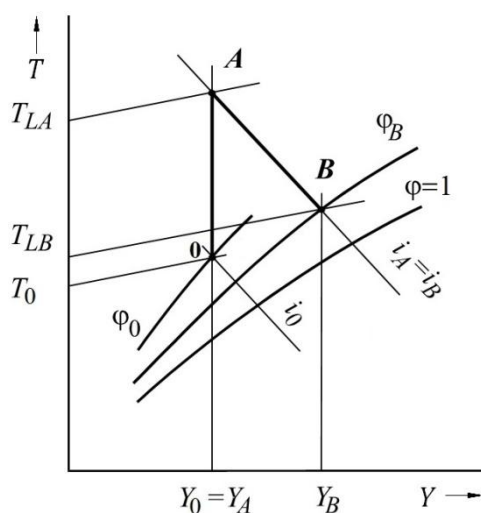
$$q = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_v} = q_K + q_D = l(i_B - i_0) + q_m + q_t + q_s - c_v T_{mA} \quad (4.10)$$

$$q = \frac{i_B - i_0}{Y_B - Y_0} + \sum q_i - c_v T_{mA} \quad (4.11)$$

Ak merný tepelný tok dodatočne privedený v sušiackej komore  $q_D$  a pôvodná entalpia vody vyparenej z materiálu  $c_v T_{mA}$  plne nahradia straty tepla na ohrev suchého materiálu  $q_m$ , dopravných zariadení  $q_t$  a do okolia  $q_s$ , platí vzťah

$$q_D + c_v T_{mA} = q_m + q_t + q_s \quad (4.12)$$

Takáto sušiareň sa nazýva teoretická sušiareň, entalpia vzduchu v sušiarni sa nemení  $i_A = i_B$ . Proces sušenia pre teoretickú sušiareň znázornený v  $i - Y$  diagrame je na obrázku 4.3.



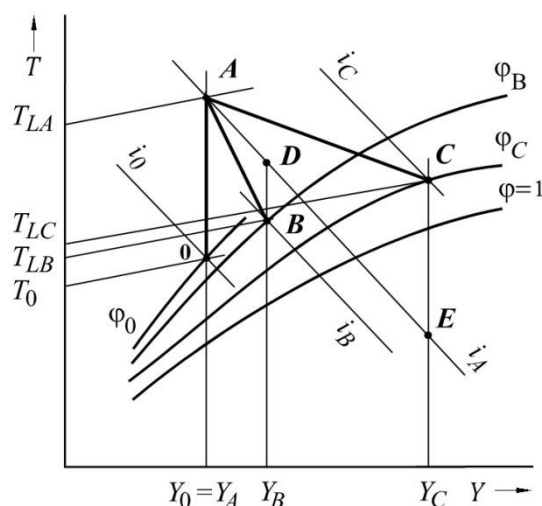
Obr. 4.3. Znáznornenie procesu sušenia pre teoretickú sušiareň [9]

Teoretická sušiareň predstavuje špeciálny prípad *skutočnej sušiarne* v ktorej neplatí vzťah (4.12). Platia pre ňu vzťahy (4.13) a (4.14) a výrazy  $\Delta < 0$  a  $\Delta > 0$ . Prípady *skutočnej sušiarne*, zobrazené v  $i - Y$  diagrame sú na obrázku 4.4.

$$\Delta = l(i_B - i_A) \quad (4.13)$$

$$\Delta = q_D + c_v T_{mA} - q_m - q_t - q_s \neq 0 \quad (4.14)$$





Obr. 4.4. Znáznornenie procesu sušenia pre  $\Delta < 0$  a  $\Delta > 0$  [9]

Prípad, keď  $\Delta < 0$  je zobrazený pracovnou čiarou  $\overline{AB}$ . Zo vzťahu (4.13) sa získa

$$\Delta = l (i_B - i_A) < 0 \tag{4.15}$$

Pre  $\Delta > 0$ , proces sušenia je zobrazený pracovnou čiarou  $\overline{AC}$  a platí

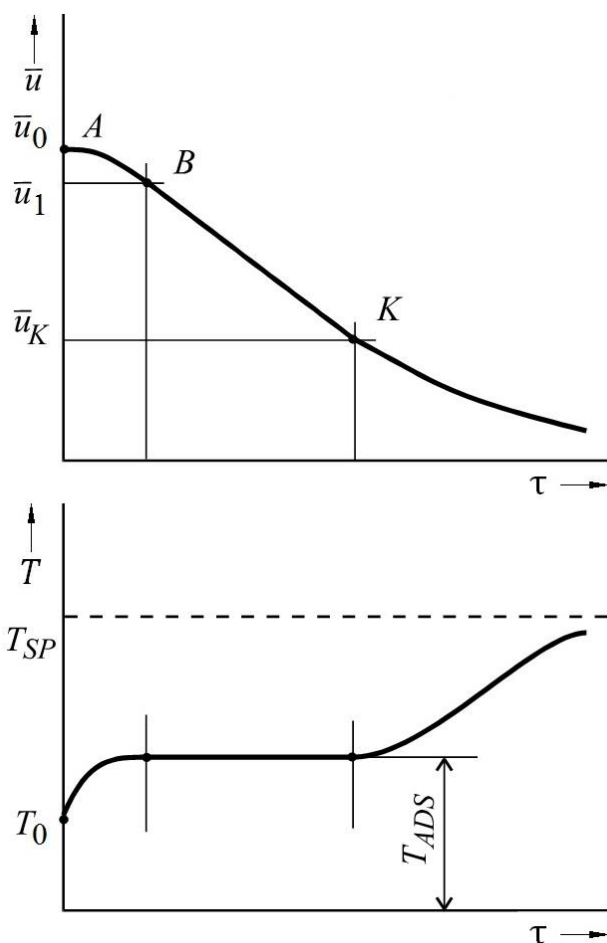
$$\Delta = l (i_C - i_A) > 0 \tag{4.16}$$

Z obrázku 4.4 je pozorovateľné, že pre  $\Delta < 0$  a  $\Delta > 0$  sú rozdielne merné spotreby vzduchu (vzťah (4.7)), a tým aj merné spotreby tepla.

### KINETIKA SUŠENIA

Základnou úlohou dynamického výpočtu sušiaceho deja je určenie nestacionárnych polí teplôt a vlhkostí materiálu v priebehu sušenia. Ďalšou úlohou dynamiky sušiaceho procesu (niekedy nazývaného *kinetika sušenia*) je určenie potrebného času sušenia, aby sa podľa neho mohli navrhnuť rozmery sušiarne. Na priebeh sušenia vplyva veľký počet činiteľov, napr. prirodzené vlastnosti materiálu, tvar materiálu, počiatkový a konečný obsah vlhkosti materiálu a kritický obsah vlhkosti. Pri hodnotení sušiaceho prostredia musíme brať do úvahy jeho vlhkosť, teplotu, rýchlosť, spôsob prúdenia okolo sušeného predmetu, rozdiel teplôt na vstupe a výstupe. V ďalšom hodnotení musíme brať do úvahy konštrukciu sušiarne, rovnomernosť sušenia a mnohé iné faktory.

Pretože na priebeh sušenia vplyva veľa činiteľov a dynamický výpočet je veľmi zložitý, často sa uspokojíme so základnou dynamickou závislosťou, ktorú vyjadruje stredná merná vlhkosť sušeného materiálu ako funkcia času  $\bar{u} = f(\tau)$ , nazývaná *krivka sušenia*. Na obrázku 4.5 je znázornená krivka sušenia vo všeobecnom tvare, doplnená o teplotu sušeného telesa v závislosti od času.

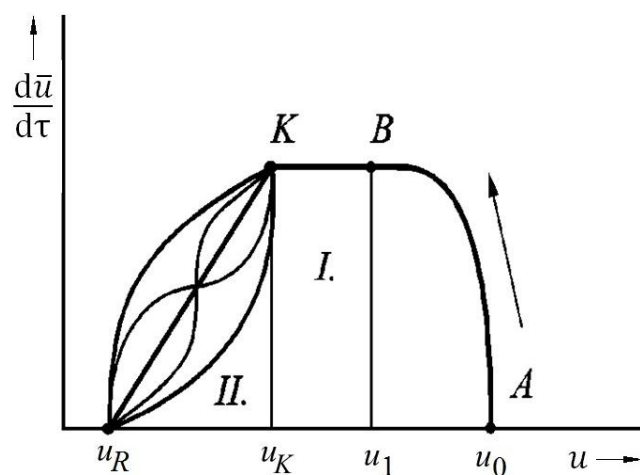


Obr. 4.5. Krivka sušenia a krivka teplôt sušeného telesa [9]

Krivku sušenia môžeme rozdeliť na niekoľko častí. Medzi bodmi *AB* sa úbytok vlhkosti telesa v závislosti od času zväčšuje, pretože jeho teplota v určitom bode vzrastá z počiatočnej teploty  $T_0$  na teplotu mokrého teplomera - nazývaná aj *adiabatická saturačná teplota*. Úbytok vlhkosti telesa medzi bodmi *BK* je konštantný, pretože mechanizmus odovzdávania vlhkosti z telesa je rovnaký ako odparovanie z voľnej vodnej hladiny. Po dosiahnutí bodu *K*, ktorý nazývame *kritický bod*, nastáva výrazná zmena, povrch telesa nie je dostatočne zásobovaný vlhkosťou, začnú sa uplatňovať vlastnosti samotného telesa a odovzdávanie vlhkosti sa neustále spomaľuje. Medzi bodmi *BK* teplota telesa v sledovanom bode sa nemení, lebo vyparovanie (fázová premena) prebieha pri konštantnej teplote. Za kritickým bodom teplota telesa rastie a asymptoticky sa blíži k teplote sušiaceho prostredia  $T_{SP}$ .

Krivka sušenia sa zistí tak, že z hmotnosti telesa v závislosti od času stanovíme závislosť  $\bar{u} = f(\tau)$  (pozri vzťah (4.2)), pričom ostatné parametre sú konštantné. Týmito parametrami môže byť teplota sušiaceho prostredia, jeho vlhkosť, stredná rýchlosť, rozmery telesa a pod. Ak nameriame krivky sušenia pri viacerých hodnotách toho istého parametra, dostaneme súbor kriviek vyjadrujúcich napr. vplyv teploty. Takéto krivky sú potrebné na určenie doby zdržania vlhkého materiálu v sušiarňi.

Z krivky sušenia zvyčajne stanovujeme krivku rýchlosti sušenia. Rýchlosťou sušenia rozumieme zmenu strednej mernej vlhkosti materiálu za čas, t. j. prvú deriváciu funkcie  $\bar{u} = f(\tau)$ , (obr. 4.6).



Obr. 4.6. Krivka rýchlosti sušenia [9]

Krivka medzi bodmi *AB* zobrazuje ohrievanie sušeného telesa, priamka medzi bodmi *BK* sa nazýva *úsek konštantnej rýchlosti sušenia* (označený *I*), krivky od bodu *K* zobrazujú *úsek klesajúcej rýchlosti sušenia* (označený *II*). Krivky môžu mať rôzny tvar, podľa toho, aký je typ väzby vlhkosti s materiálom a podľa rozličných faktorov v procese sušenia. Proces sušenia sa ukončí pri *rovnovážnej vlhkosti*. Každé vlhké teleso možno vysušiť iba do rovnovážnej vlhkosti (kedy nastane rovnováha medzi tlakom pary na povrchu vlhkého telesa a parciálnym tlakom pary v okolitom prostredí), ktorá závisí od stavu okolia (jeho teploty a relatívnej vlhkosti).

## TYPY SUŠIARNÍ

Konštrukčné riešenie sušiarňí vychádza z voľby sušiaceho postupu. Predpis, podľa ktorého sa riadia prevádzkové parametre sušenia (teplota, vlhkosť, rýchlosť sušiaceho prostredia, podávané množstvo materiálu, rýchlosť pohybu materiálu atď.) určitej sušiarne, sa označuje ako *sušiaci postup* (*sušiaci režim*).

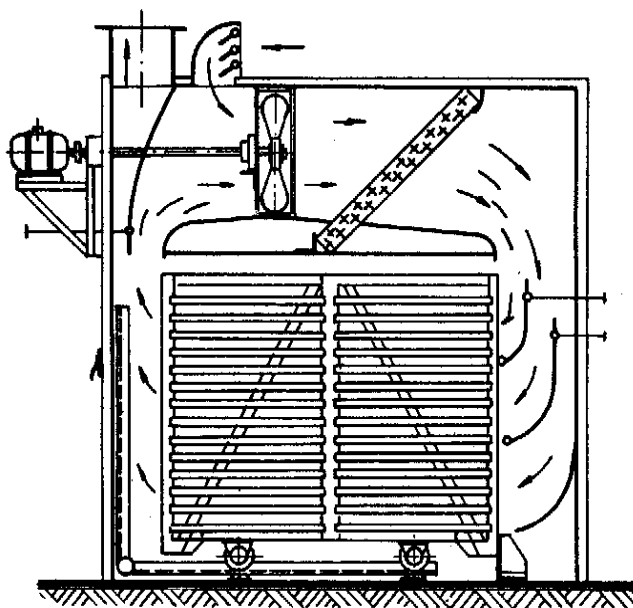
Pri rozdelení sušiarňí sa prihliada k týmto hľadiskám:

- *druh použitého sušiaceho prostredia* (vzduch, spaliny, inertný plyn, prehriata para),
- *prevádzkový tlak sušiaceho prostredia* (atmosférický tlak, znížený tlak, zvýšený tlak),
- *spôsob odovzdávania tepla vysušenému materiálu* (sušiareň konvektívna, sálavá, kontaktná, indukčná, dielektrická, odporová),
- *prúdenie sušiaceho prostredia okolo sušeného materiálu* (ofukovaním, prefukovaním, impaktné, prúdové, fluidizáciou),
- *povaha prevádzky* (periodická, kontinuálna), ktorá môže byť:
  - *súprúdna*,
  - *protiprúdna*,
  - *krížoprúdna*,
- *spôsob pohybu sušeného materiálu v sušiarňi* je:
  - *sušený materiál je v pokoji* (sušiareň roštová, skriňová, komorová),
  - *zdrojom pohybu sušeného materiálu je iba jeho potenciálna energia* (sušiareň zosypná),

- zdrojom pohybu je najmä kinetická energia sušiaceho prostredia, potenciálna alebo kinetická energia materiálu (sušiareň prúdová, fluidizačná, rozprašovacia).

### SKRIŇOVÉ A KOMOROVÉ SUŠIARNE

Patria do skupiny periodických sušiarňí (s prerušovanou prevádzkou) pri ktorých je sušený materiál v pokoji na nehybnej podložke. Skriňové sušiarne sa od komorových líšia iba veľkosťou. Prvé sa plnia a vyprázdňujú zvonka, druhé sú také veľké, že obsluha vstupuje dovnútra. Na obrázku 4.7 je schéma skriňovej sušiarne, na ktorej možno sušiť veľa druhov materiálu. Ohriaty vzduch nasávaný cez nastavovacie klapky zvonka vstupuje na výmenník tepla a prúdi okolo sušeného materiálu dotedy, kým sa nedosiahne požadovaná vlhkosť. Tento systém sa používa pre menšie výkony, kde by kontinuálna sušiareň nebola ekonomická.

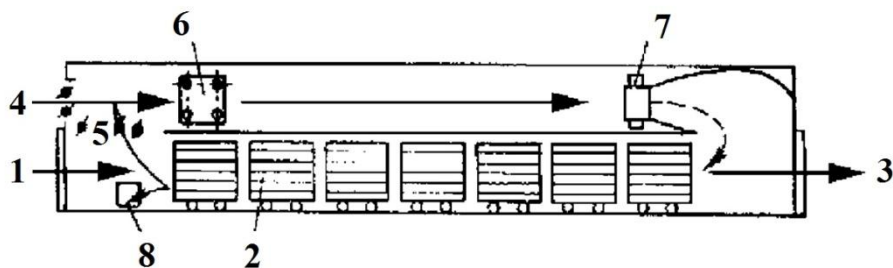


Obr. 4.7. Schéma skriňovej sušiarne [9]

### TUNELOVÉ SUŠIARNE

Ak sa má sušiť väčšie množstvo materiálu rovnakého druhu, použijeme kontinuálne pracujúce sušiarne.

Na obrázku 4.8 je zobrazená schéma tunelovej sušiarne. Sušený materiál vstupuje na dopravných vozíkoch a posúva sa. Čerstvý vzduch vstupuje, ohrieva sa na kaloriféri a je nasávaný ventilátorom. Po zmene zmyslu prúdenia prechádza protiprúdne medzi vozíkmi a odoberá vlhkosť sušenému materiálu. Využitý vzduch odchádza zo sušiarne a pomocou klapiek možno nastaviť určitý podiel recirkulujúceho vzduchu.

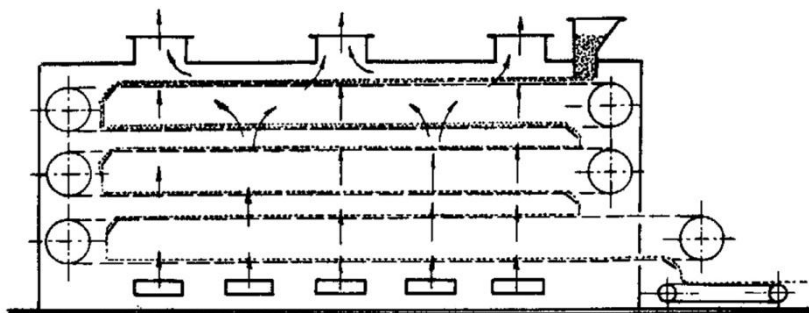


Obr. 4.8. Schéma tunelovej sušiarne [9]:

1 – vstup sušeného materiálu, 2 – dopravný vozík, 3 – výstup sušeného materiálu,  
4 – vstup čerstvého vzduchu, 5 – klapky na nastavenie podielu recirkulujúceho vzduchu,  
6 – kalorifér, 7 – ventilátor, 8 – výstup vzduchu zo sušiarne

### NIEKOLKOPÁSOVÉ SUŠIARNE

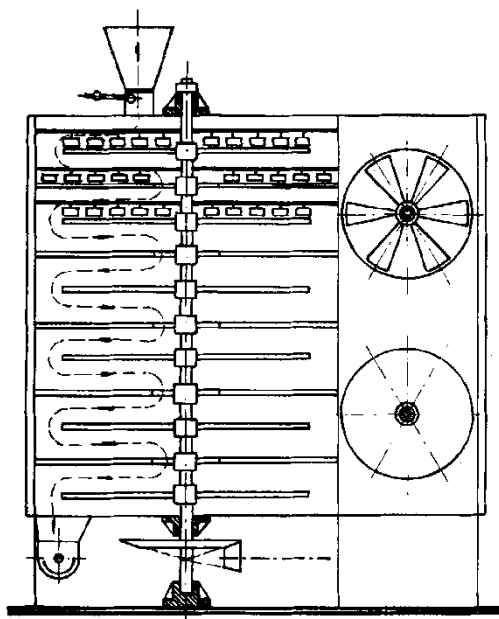
Vo viacpásovej sušiarňach prechádza materiál sušiacou komorou tak, že na konci pása sa zosypáva na ďalší pás, pohybujúci sa opačným smerom (obr. 4.9). Tým sa postupne obnažuje časť ďalších, dosiaľ vlhkých plôšok, čo vedie ku skráteniu sušiaceho času a k väčšej šetrnosti sušiaceho procesu.



Obr. 4.9. Schéma viacpásovej sušiarne [9]

### TANIEROVÉ SUŠIARNE

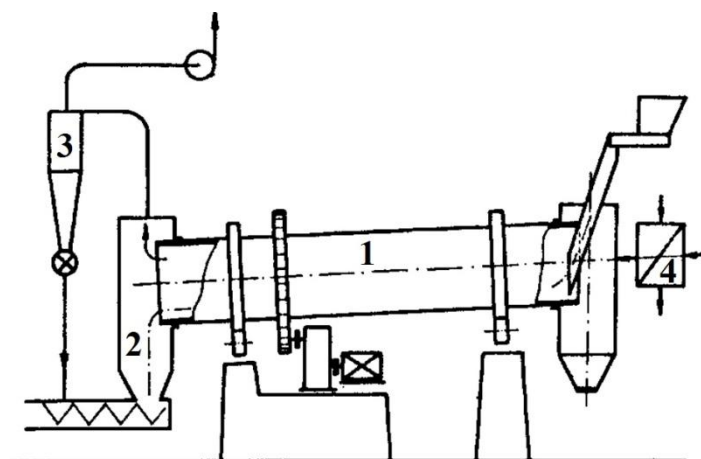
V tanierových sušiarňach sušený materiál spočíva na otáčajúcich sa kruhových doskách z dierovaného plechu (obr. 4.10), pričom ho prehrabávajú pevné zhrňovadlá a posúvajú do otvorov, ktoré sú v jednotlivých tanieroch umiestnené striedavo v strede alebo na obvode, takže postupne padá stále nižšie až do vyprázdňovacej závitovky. Sušiaci vzduch prúdi v horizontálnych vrstvách pozdĺž materiálu.



Obr. 4.10. Schéma tanierovej sušiarne [9]

### BUBNOVÉ SUŠIARNE

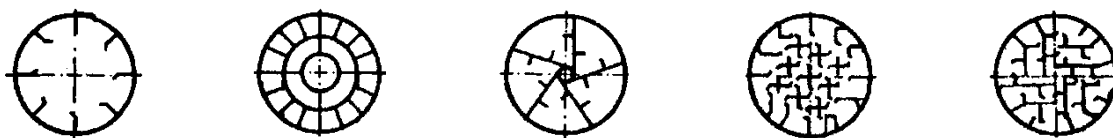
Hlavnou časťou bubnových sušiarňí je valcový bubon (obr. 4.11 – pozícia 1) s mierne sklonenou alebo vodorovnou pozdĺžnou osou, uložený na kladkách. Bubon sa otáča a je poháňaný ozubeným alebo trecím vencom od pastorka prevodovky, umožňujúcej zmenu otáčok v určitom, zvyčajne úzkom rozmedzí. Vlhký materiál sa podáva do bubna vo vrchnej časti, rotáciou a pôsobením zostavby bubna a prúdenia sušiacieho prostredia postupuje zložitým pohybom k výstupnému koncu. Sušiacie prostredie v priestore bubna odovzdáva vysušovanej látke teplo potrebné na ohrev a odparovanie vlhkosti. Usušený produkt vypadáva do zbernej komory (obr. 4.11 – pozícia 2), sušiacie prostredie sa odsáva cez odlučovač (obr. 4.11 – pozícia 3).



Obr. 4.11. Schéma bubnovej sušiarne [9]:  
 1 – valcový bubon, 2 – zberná komora vysušeného produktu,  
 3 – odlučovač, 4 – výmenník tepla

Bubon je zvarovaný z oceľových plechov, otáča sa 1 až 15 otáčok za minútu. Vonkajší povrch bubna je izolovaný. V bubne je umiestnená rôzna zostavba (obr. 4.12), ktorej hlavným účelom je zintenzívniť prenos tepla rovnomerným rozdelením náplne sušiarne do celého prierezu bubna a podstatne zväčšiť povrch vysušovaného materiálu. Sušiacim prostredím

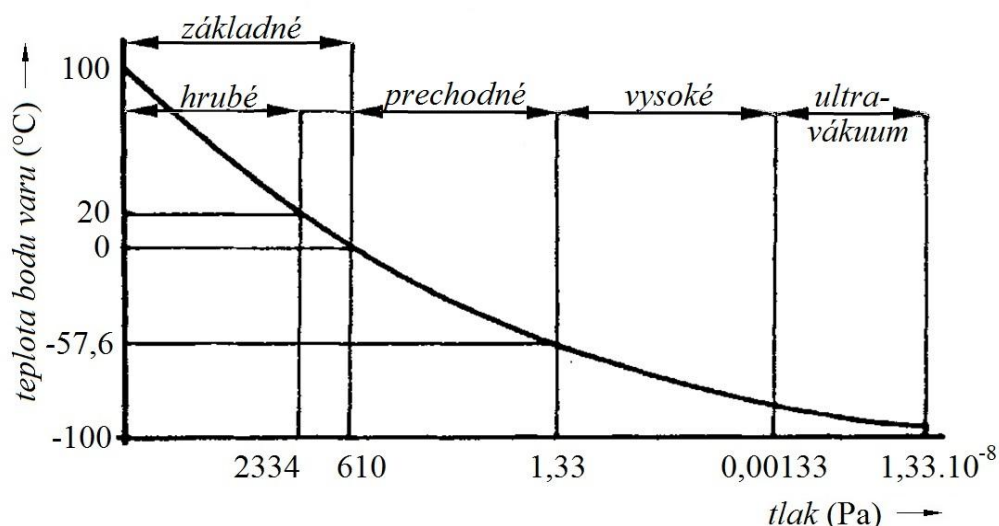
môže byť vzduch, ktorý sa ohreje vo výmenníku tepla (obr. 4.11 – pozícia 4), alebo spaliny. Vstupná teplota spalín býva až 800 °C, niekedy aj vyššia.



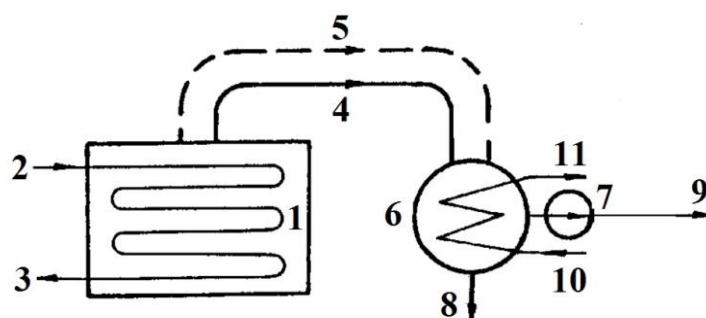
Obr. 4.12. Základné druhy zostavieb bubna bubnovej sušiarne [9]

### VÁKUOVÉ SUŠIARNE

Vákuové sušenie je spôsob tepelného sušenia, pri ktorom sa znížením celkového tlaku prostredia zväčší množstvo odvedenej vlhkosti za jednotku času. Vlhkosť v sušiarne sa odparuje pri bode varu zodpovedajúcom celkovému tlaku v sušiacom priestore, pričom väčšina priemyselných sušiarňí pracuje v oblasti základného vákua do tlaku asi 600 Pa. Na obrázku 4.13 vidieť, ako sa mení teplota bodu varu vody v závislosti od tlaku. Základná schéma vákuovej sušiarne je na obrázku 4.14. Sušiareň pozostáva z týchto hlavných častí: sušiaci priestor s vykurovacím systémom, výveva, kondenzátor.



Obr. 4.13. Závislosť teploty bodu varu vody od tlaku [9]



Obr. 4.14. Schéma vákuovej sušiarne [9]:

- 1 – sušiareň, 2 – vstup vykurovacej pary, 3 – výstup kondenzátu, 4 – pary vlhkosti,
- 5 – vzduch, 6 – kondenzátor, 7 – výveva, 8 – výstup skondenzovanej vlhkosti,
- 9 – výstup vzduchu, 10 – vstup chladiacej vody, 11 – výstup chladiacej vody

Do sušiaceho priestoru, v ktorom sa nachádza vlhký materiál, sa privádza teplo vedením, alebo sálaním. Pary vzniknuté odparovaním vody (prípadne inej látky) sa vedú do kondenzátora, kde ochladením chladiacou vodou skondenzujú. Priestor sušiacej komory, kondenzátora a spojovacieho potrubia je pripojený na vývevu, ktorá udržiava znížený tlak, odsáva vznikajúce pary a vzduch, ktorý sa dostáva do systému netesnosťami. Takáto sušiareň z hľadiska prevádzky pracuje ako diskontinuálna (kontinuálna iba výnimočne).

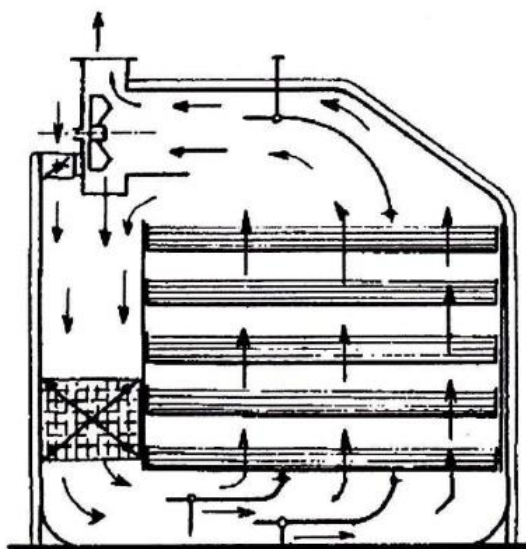
### SUŠIARNE S PREFUKOVANOU VRSTVOU

Pri pozdĺžnom ofukovaní vrstvy sa stýka sušená látka so sušiacim prostredím iba na hornej a čiastočne na spodnej strane. Ak však sušiacie prostredie prechádza cez sušenú látku uloženú na priepustnej podložke (dierovaný plech, kované sito a pod.), dočeli sa omnoho dôkladnejší vzájomný kontakt, a tým sa značne zvýši rýchlosť sušenia.

Sušiarne s prefukovanou vrstvou sa používajú na sušenie zrnitých látok, alebo pozostávajúcich z drobných častíc malej objemovej hmotnosti (obilie, hlávky chmeľu, seno a pod.), pričom častice sa proti podložke nepohybujú.

Na obrázku 4.15 je schematicky znázornená diskontinuálna sušiareň s prefukovanou vrstvou, pri ktorej sa dá nastaviť podiel čerstvého a obiehajúceho vzduchu. Sušiaci vzduch sa ohrieva vo výmenníku tepla a po prechode cez sušenú látku čiastočne odchádza a čiastočne recirkuluje.

Sušiarne s prefukovanou vrstvou môžu byť aj kontinuálne. Sú to v podstate pásové sušiarne pri ktorých je pás prefukovaný, napr. pás tvorí drôtené sito (obr. 4.9).



Obr. 4.15. Schéma sušiarne s prefukovanou vrstvou [9]

### FLUIDNÉ SUŠIARNE

Pri fluidnom sušení vytvárajú častice zrnitého materiálu v sušiarňi vrstvu, ktorá je aerodynamickým účinkom prúdu sušiaceho prostredia udržiavaná vo fluidnom stave.

Fluidné sušiarne môžu byť *periodické*, vyznačujú sa tým, že materiál sa do nich privádza šaržovite a po skončení procesu sa vypúšťa. Periodicky pracujúce sušiarne sa pomerne rýchlo rozšírili v prevádzkach, kde sa druh sušeného materiálu často mení (farmácia, niektoré chemické prevádzky) a kde by so zreteľom na šaržovitý charakter výroby nebolo výhodné z hľadiska ekonomického ani prevádzkového používať kontinuálne fluidné sušiarne. Intenzita sušiaceho procesu v periodicky pracujúcich fluidných sušiarňach je niekoľkokrát väčšia ako v sušiarňach skriňových s pozdĺžnym ofukovaním materiálu.



*Kontinuálne sušiarne* sa úspešne zaraďujú do výrobných liniek, lebo veľká intenzita sušiaceho procesu, ktorá sa v nich dosahuje, umožňuje skrátiť sušenie na čas zodpovedajúci ostatným technologickým operáciám v kontinuálnej výrobnej linke.

Základné usporiadanie fluidných sušiarň z hľadiska spôsobu dávkovania a odberu materiálu a vzájomného pohybu materiálu a sušiaceho prostredia je na obrázku 4.16.

Na obrázku 4.16a je prívod nad vrstvou vysušovaného materiálu a odvod tesne nad roštom, pre prípad na obrázku 4.16b je to naopak.

Na dávkovanie vlhkého materiálu sa najčastejšie používajú závitovkové, tanierové, komôrkové, vibračné alebo pneumatické podávače, odvod sa najčastejšie rieši regulovateľným prepacom, niekedy tiež závitovkovým alebo komôrkovým podávačom.

Riešenie na obrázku 4.16c sa líši od predchádzajúcich tým, že prívod i odvod materiálu sa deje nad vrstvou. Toto usporiadanie sa v záujme rovnomernosti sušenia používa iba v rozmerných fluidných sušiarňach, kde nebezpečenstvo „skratu“ (keď podávaný materiál odchádza najkratšou cestou zo sušiarne) je malé. Podobne je to aj v prípade na obrázku 4.16d, kde sa vysušený materiál vypúšťa prepacovou rúrkou. Tento spôsob sa často používa vo viacstupňových fluidných sušiarňach, v ktorých sa stupne radia nad seba. Usporiadanie podľa obrázku 4.16e sa používa pri sušiarňach s menšou rýchlosťou prúdenia sušiaceho prostredia, ako zodpovedá prahovej rýchlosti fluidizácie. Materiál čerený priechodom prostredia postupuje po šikmo usporiadanom rošte k miestu odberu. Menšia rýchlosť, ako je prahová rýchlosť fluidizácie, sa používa aj v usporiadaní na obrázku 4.16f, kde materiál postupuje po rošte pod vplyvom čerenia vrstvy priechodom sušiaceho prostredia, ale aj vplyvom vibračného pohybu roštu.

Zariadenia na obrázku 4.16h a obrázku 4.16i sú viacstupňové, pričom stupne sú radené za sebou alebo pod sebou. Vo viacstupňových zariadeniach sa často popri sušení zaraďujú aj ďalšie technologické postupy, napr. chladenie, praženie, triedenie a pod.

Usporiadanie na obrázku 4.16j a obrázku 4.16k umožňuje použiť fluidné sušenie i pre roztoky, suspenzie, pasty a pod. V týchto prípadoch sa materiál rozprašuje dýzami (pastovité materiály napr. špeciálnym vibračným podávačom vo forme nitiek) nad fluidnú vrstvu alebo do vrstvy tvorenej zádržou materiálu v zariadení. Ak majú častice materiálu sklon k zlepovaniu (koagulácii a pod.) vytvára sa vrstva z inertného materiálu (sklenené guľky, kremičitý piesok a pod.).

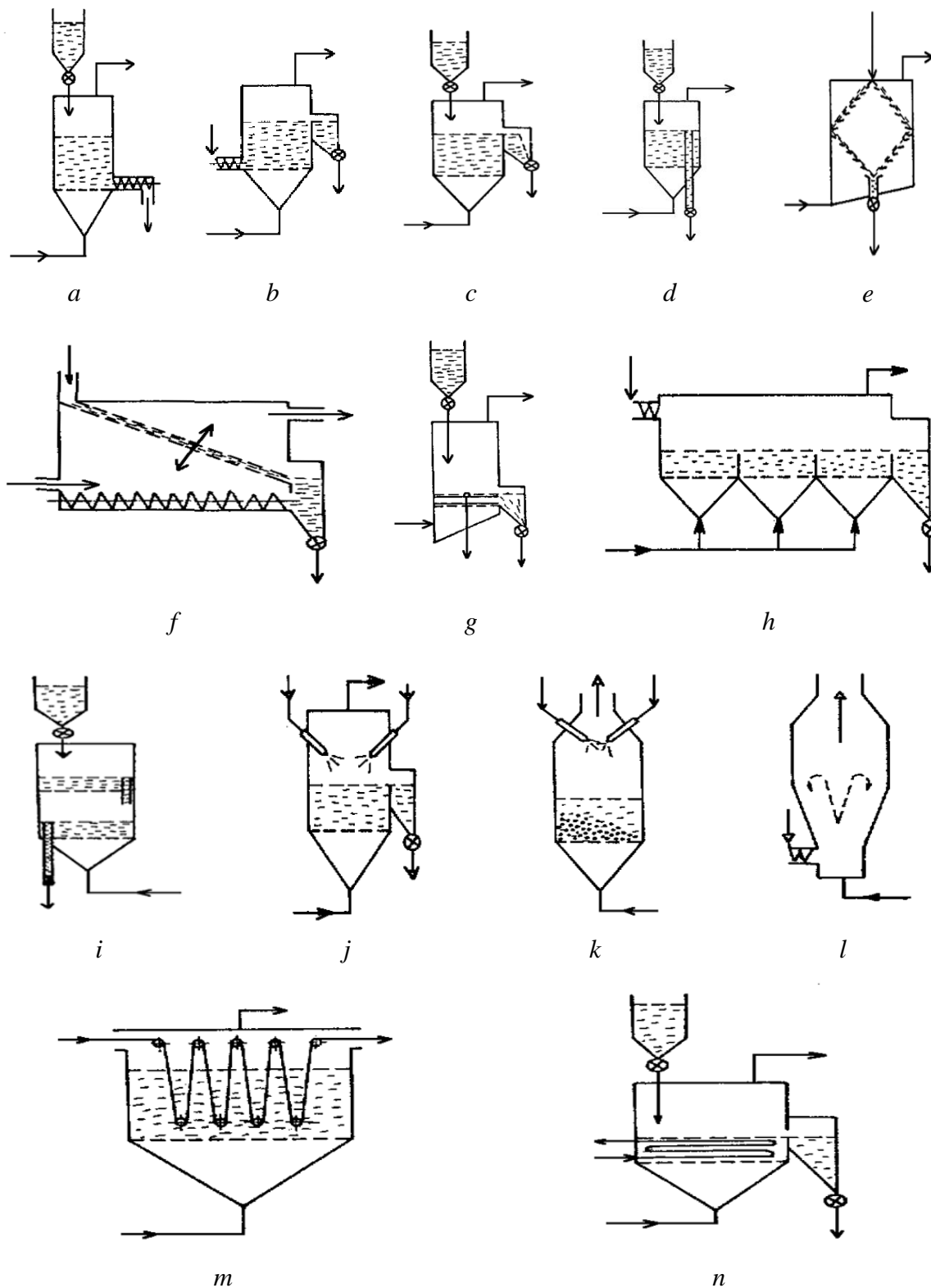
Na obrázku 4.16g je znázornené mechanické čerenie fluidnej vrstvy, materiál je dávkovaný na rošt zhora a čerenie je vyvolané prefukovaním vrstvy prostredím, ale aj mechanickými miešadlami rotujúcimi nad roštom.

Prípad na obrázku 4.16l je bezroštová fluidná sušiareň, v ktorej sa vlhký dávkovaný materiál unáša prúdom sušiaceho prostredia do zariadenia, ktorého prierez sa rozširuje, takže väčšie častice, resp. zhluky častíc vplyvom zmenšenej rýchlosti prúdenia vypadávajú z prúdu do miest, kde rýchlosť prúdenia je dostatočná, aby ich prúdiace prostredie mohlo znovu unášať. Materiál teda v zariadení fontánuje, vysušuje sa a zhluky častíc sa rozpadávajú, až kým nenastanú také podmienky, aby vysušené častice materiálu mohli opúšťať zariadenie. Tento typ sušiarne sa nazýva *aerofontánová* sušiareň.

Ďalší prípad na obrázku 4.16m predstavuje sušenie nekonečných pásov vo fluidnej vrstve. V tomto prípade fluidná vrstva inertného materiálu zintenzívňuje prenos tepla zo sušiaceho prostredia na pás materiálu (textil, papier a pod.). Odparená vlhkosť sa unáša sušiacim prostredím zo zariadenia.

Posledný prípad na obrázku 4.16n sa používa vtedy, keď množstvo sušiaceho prostredia, potrebného na dosiahnutie fluidného stavu, nestačí na odvedenie vlhkosti. Doplnkové

vyhrievacie plochy umiestnené do fluidnej vrstvy zaisťujú priebeh sušiacého procesu pri konštantnej teplote namiesto bežne používaného adiabatického priebehu.



Obr. 4.16. Základné usporiadanie fluidných sušiarňí [9]:  
a – n opis v texte

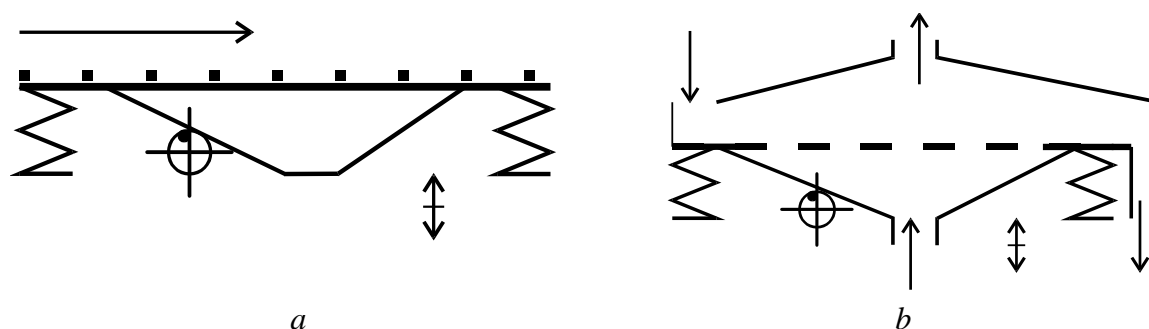
### VIBROFLUIDNÉ SUŠIARNE

Vibrofluidná vrstva predstavuje kombináciu mechanického a aerodynamického čerenia vrstvy, využívajú sa teda výhody oboch spôsobov na dosiahnutie homogénnej vrstvy, a to pri súčasnom obmedzení závislosti intenzity procesu od rýchlosti prúdenia plynného prostredia. Pri tepelných a difúzných procesoch sa využíva najmä skutočnosť, že vibračný pohyb podložky vyvoláva po dosiahnutí tzv. *pseudofluidného stavu* intenzívne miešanie častíc v priereze vrstvy, čo umožňuje dobrý styk materiálu s teplovýmennými plochami alebo s prostredím prúdiacim vrstvou.

Na obrázku 4.17a je princíp zariadenia, kde sa na nepriepustnej podložke nachádzajú častice. Podložka je uložená na pružinách a pomocou tzv. budiča sa uvádza do kmitavého pohybu vo zvislom smere. Ak je zrýchlenie podložky a s ňou aj častice menšie ako gravitačné zrýchlenie, častice sa neodtrhnú od podložky. Ak pomocou budiča vyvoláme zrýchlenie podložky a častice väčšie ako gravitačné zrýchlenie, častice pri pohybe podložky smerom hore sa od nej odtrhnú a pri jej pohybe smerom dolu spadnú späť na podložku.

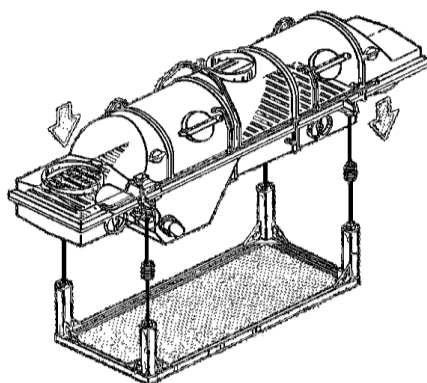
Opísaný spôsob pohybu častíc sa nazýva *vibrofluidná vrstva tuhých častíc na nepriepustnej podložke*. Ak tento princíp využijeme na sušenie, častice ofukujeme sušiacim prostredím rovnobežne s podložkou.

Na obrázku 4.17b je znázornený princíp práce zariadenia, ktoré pracuje s vibračne čerenou a súčasne prefukovanou vrstvou. V tomto prípade sa častice odtrhávajú od podložky pôsobením mechanickej zložky (od budiča) a aeromechanickej zložky (od vzduchu prefukovaného cez podložku). Vibračný pohyb prispieva k intenzifikácii prestupu tepla a látky najmä v oblasti rýchlosti prúdenia vzduchu  $w_0$  nižšej, ako je prahová rýchlosť fluidizácie. Tento prípad sa nazýva *vibrofluidná vrstva tuhých častíc na priepustnej podložke*.



Obr. 4.17. Princíp práce vibrofluidných zariadení [9]:  
a – b opis v texte

Na tomto princípe pracuje tzv. *vibrofluidný žľab*, znázornený na obrázku 4.18, ktorý umožňuje okrem sušenia realizovať aj mnohé iné procesy (ohrev, chladenie, praženie, granulácia a pod.).

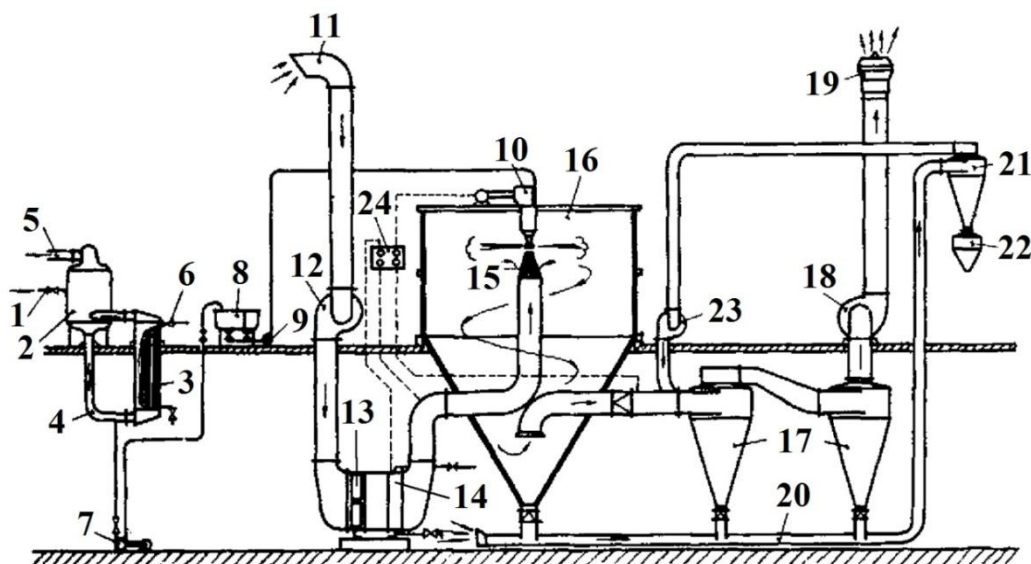


Obr. 4.18. Vibrofluidný žľab [9]

### ROZPRAŠOVACIE SUŠIARNE

Sušenie rozprašovaním môžeme definovať ako sušenie jemne dispergovaného roztoku, emulzie alebo suspenzie v atmosfére teplého vzduchu, prehriatej pary, inertného plynu alebo zmesi spalín so vzduchom za podmienok, ktoré dovoľujú získať späť vysušený produkt vo forme jemného prášku. Jemným dispergovaním sa dosiahne veľký povrch, nastane rýchle odparenie, sušiaci proces prebieha za pomerne nízkych teplôt (v počiatočnom úseku sušenia zvyčajne pri 35 až 55 °C) a až v poslednom štádiu sušenia teplota častíc stúpa. Častice sušeného materiálu za takýchto podmienok sú vystavené pôsobeniu vyššej teploty iba krátko, čo je výhodné pre všetky látky citlivé na teplo, alebo látky, ktoré ľahko oxidujú. Z uvedených dôvodov sú rozprašovacie sušiarne rozšírené v chemickom, ale najmä v potravinárskom priemysle, kde sa používajú na sušenie mlieka, vajec, bielkov, ovocných štiav, detergentov, droždia, kávových a čajových extraktov a ďalších produktov.

Na obrázku 4.19 je schematicky znázornená rozprašovacia sušiareň.



Obr. 4.19. Rozprašovacia sušiareň [9]:

- 1 – nasávací ventil, 2 – vákuová komora, 3 – výmenník tepla, 4 – potrubie, 5 – potrubie,
- 6 – vstup pary, 7 – čerpadlo, 8 – vyrovnávací nádrž, 9 – čerpadlo, 10 – rozprašovač,
- 11 – vstup vzduchu, 12 – ventilátor, 13 – filter, 14 – výmenník tepla, 15 – rozdeľovač,
- 16 – sušiacia komora, 17 – cyklón, 18 – ventilátor, 19 – filter, 20 – pneumatický dopravník,
- 21 – cyklón, 22 – oddeľovač vysušeného produktu, 23 – ventilátor, 24 – rozvodná doska

Linka pozostáva zo zariadení na prípravu a ohrev sušenej látky, zo sušiacej komory s rozprašovacím zariadením vysušovaného materiálu, dávkovacieho zariadenia, odprašovacieho zariadenia a odťahového ventilátora pre sušiace prostredie. Sušiacim prostredím je najčastejšie vzduch alebo riedené spaliny. Sušená látka do rozprašovacieho zariadenia sa privádza dávkovacím čerpadlom, ktoré môže byť zubové, monočerpadlo, piestové a pod. Hlavnou požiadavkou je plynulý, neprerušovaný prívod látky k rozprašovaciemu zariadeniu.

Sušiacia komora máva najčastejšie tvar valca so zvislou osou, s rovným alebo kónickým dnom. Steny sušiacej komory sú z oceleového plechu alebo obložené dlaždicami, betónom a pod. Vnútorňý povrch komory musí byť hladký, bez výstupkov, aby sa prášok v komore nehromadil a neprehrieval. Sušiacia komora býva dobre tepelne izolovaná. V hornej alebo spodnej časti komory je dispergačné zariadenie (dýza alebo rozprašovací kotúč). Vysušený prášok padá na dno sušiacej komory a odtiaľ sa odvádza mechanicky alebo pneumaticky. Sušená látka prichádza zo sušiacej komory do odprašovacieho zariadenia, ktoré tvoria alebo cyklóny, alebo tkaninový rukávový filter, prípadne mokrý filter (pračka). Ventilátor býva spravidla umiestnený až za odprašovacím zariadením, teda komora pracuje v podtlaku. Účelom dispergačného zariadenia je rozptýliť sušenú látku do malých čiastočiek. Tým sa vytvorí značne veľký povrch sušenej látky, ktorý je predpokladom rýchleho sušenia. Najbežnejšie sa v priemyselných sušiarňach vyskytujú kvapôčky veľkosti 50 až 300  $\mu\text{m}$ .

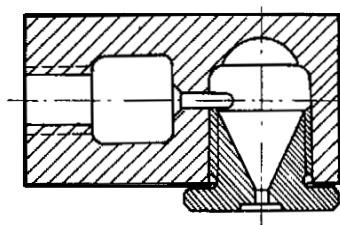
Pri dispergácii treba prekonať tieto sily, ktoré držia kvapalinu pohromade:

- povrchové napätie, ktoré sa prejavuje úsilím držať čiastočky kvapaliny spolu tak, aby zaujímali minimálny objem,
- viskozita,
- zotrvačné sily prejavujúce sa pri zmene rýchlosti.

Dnešné konštrukcie sušiarň používajú tri základné spôsoby dispergácie:

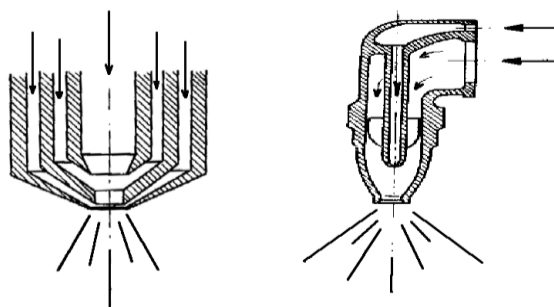
- mechanické, pevnými dýzami pomocou vyšších tlakov,
- pneumatické, dvojlátkovými dýzami stlačeným vzduchom,
- odstredivé, rotujúcimi dýzami (rozprašovacími kotúčmi).

*Mechanické rozprašovanie* (obr. 4.20) hoci je najstaršie, používa sa pre mnohé výhody. Kvapalina, dodávaná do rozprašovacej dýzy pod tlakom 3 až 7 MPa vstupuje do rozprašovacej komory tangenciálne, čím dosiahne prudkú rotáciu, ktorá sa udržuje i po výstupe z komory. Látka najprv vytvorí film tvaru kužeľovej plochy, ktorý sa v zápätí rozpadne na jednotlivé kvapôčky.



Obr. 4.20. Mechanický rozprašovač [9]

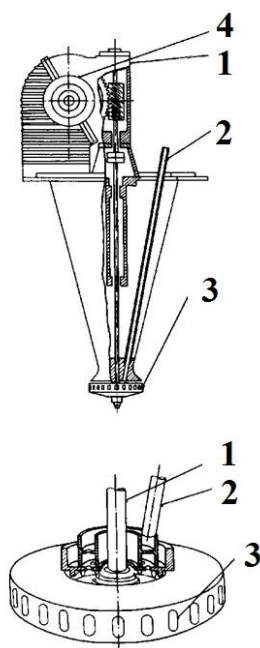
*Pneumatické rozprašovanie* (obr. 4.21) dvojlátkovými dýzami rozprašuje pomocou plynnej látky. Rýchlo prúdiacim vzduchom (100 až 200  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) dôjde k vytvoreniu hmlovitého aerosolu.



Obr. 4.21. Pneumatický rozprašovač [9]

Pri *odstredivom rozprašovaní* (obr. 4.22) kvapalina voľne nateká na kotúč rôznej konštrukcie, rotujúci vysokými otáčkami. Úlohou rozprašovacieho kotúča je nielen kvapalinu dobre a rovnomerne dispergovať, ale vytvoriť aj vhodný mrak, ktorý by sa dobre miešal so vzduchom. Obvodová rýchlosť kotúča býva 100 až 200 m.s<sup>-1</sup>, čo pre rôzne priemery kotúčov zodpovedá frekvencii otáčania 4000 až 40 000 min<sup>-1</sup>. Pohon kotúčov je najčastejšie elektromotorom pomocou remeňov alebo ozubeným súkolesím.

Veľká intenzita sušenia v rozprašovacích sušiarňach má za následok malý čas zdržania častice v sušiacej komore (niekoľko sekúnd).



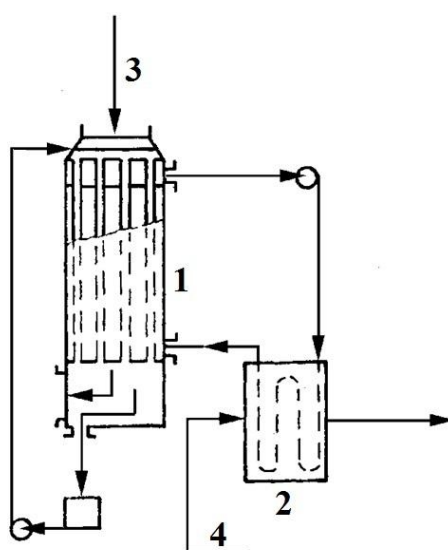
Obr. 4.22. Odstredivý rozprašovač [9]:  
 1 – hriadeľ, 2 – prívod kvapaliny, 3 – rozprašovací kotúč,  
 4 – pohon kotúča (motor s prevodovkou)

Vzrastajúce ceny energií, ustavičný rast požiadaviek na kvalitu hotového produktu, rozširovanie sortimentu výrobkov vyrábaných rozprašovacím sušením, ako aj sprísňujúce sa požiadavky na ochranu životného prostredia vedú výrobcov sušiacich zariadení k vývoju nových technológií a nových typov zariadení. Za takéto môžeme počítať:

- zariadenie na získavanie tepla zo vzduchu odchádzajúceho z rozprašovacej sušiarne, pozostávajúce z jedného alebo niekoľko výmenníkov tepla. Používajú sa výmenníky pracujúce pri teplotách vyšších ako je teplota rosného bodu odťahovaného vzduchu (nad krivkou sýtosti) ale aj výmenníky čiastočne kondenzujúce vodnú paru;

- kombinácia rozprašovacej sušiarne s fluidným lôžkom dolnej časti komory, čím sa rieši problém lepivosti produktu;
- dvojstupňové sušenie, kombinácia rozprašovacieho a vibrofluidného sušenia. Linka umožňuje účelné rozdelenie sušiaceho a chladiaceho procesu do viacerých sekcií, čím sa dosiahne zvýšenie kvalitatívnych ukazovateľov pri súčasnom znížení spotreby tepelnej energie na sušiaci proces.

Na obrázku 4.23 je schéma rekuperačného systému pre rozprašovacie sušiarne, využívajúceho teplo z vlhkého vzduchu bez fázovej premeny, s aplikáciou na mliečne produkty. Vzduch odchádzajúci z rozprašovacej sušiarne, ktorý dosahuje teplotu 100 °C i viac a jeho relatívna vlhkosť často býva nižšia ako 20 %, vstupuje do rúrkového výmenníka tepla, kde ohrieva vodu. Voda z rúrkového výmenníka prehrieva v ďalšom (lamelovom) výmenníku čerstvý vzduch, ktorý sa dohrieva v ďalšom zariadení (parnom, plynnom a pod.) na teplotu potrebnú pri vstupe do sušiarne.



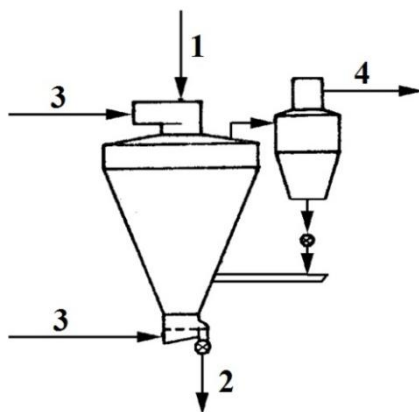
Obr. 4.23. Schéma rekuperačného systému pre rozprašovacie sušiarne [9]:  
 1 – rúrkový výmenník, 2 – lamelový výmenník, 3 – vzduch zo sušiarne, 4 – čerstvý vzduch

Kombinácia rozprašovacej sušiarne s fluidným lôžkom je na obrázku 4.24. Usporiadanie sa nazýva FSD (Fluidized Spray Dryer) a vyrába ho firma Niro Atomizer.

Sušiacia komora sa líši vyhotovením od bežnej rozprašovacej sušiarne najmä:

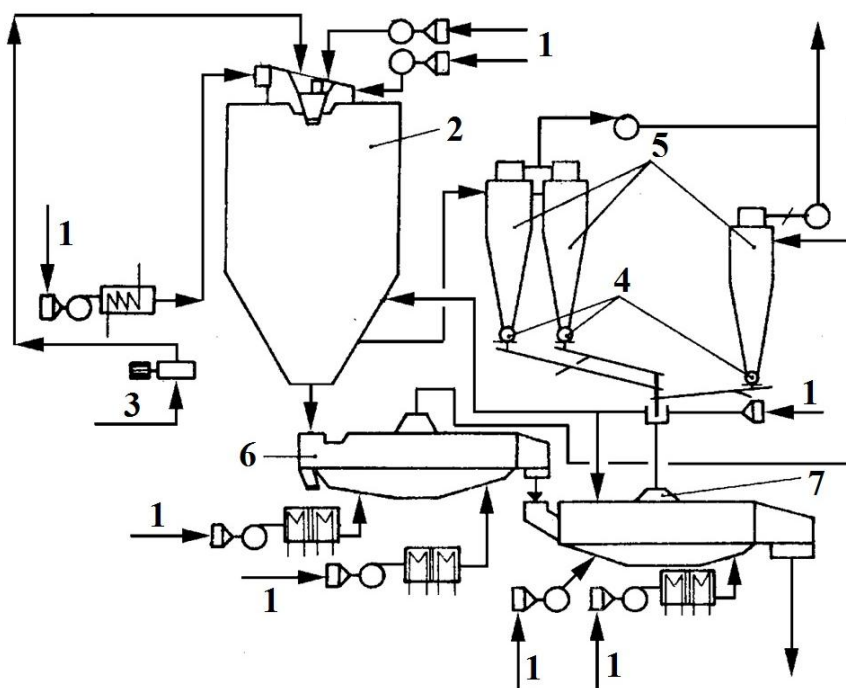
- veľmi krátkou valcovou časťou,
- štíhlou kužeľovou časťou,
- dolná časť kužeľa je ukončená fluidizačným zariadením,
- sušiacie prostredie vstupuje do hornej časti komory a z hornej časti aj odchádza s vysušeným materiálom do odlučovacieho zariadenia,
- v dolnej časti komory je samostatný vstup vzduchu do fluidného zariadenia.

Takéto usporiadanie spôsobuje, že vplyvom silného účinku fluidného lôžka dochádza ku styku častíc vyššej vlhkosti a jemného podielu z recyklu, čo rieši problém lepivosti produktu. Takéto usporiadanie zvyšuje tepelnú účinnosť procesu, lebo dovoľuje pracovať s vysokou vstupnou a nízkou výstupnou teplotou sušiaceho prostredia pri nízkej teplote produktu.



Obr. 4.24. Schéma rozprašovacej sušiarne s fluidizáciou [9]:  
 1 – plnenie, 2 – produkt, 3 – sušiaci vzduch, 4 – odchádzajúci plyn

Na obrázku 4.25 je schéma dvojstupňového sušenia pozostávajúca z rozprašovacej sušiarne 2, vibrofluidného sušiacoho zariadenia 6 a následného vibrofluidného chladiaceho zariadenia 7. Taká zostava sa používa najmä pri spracovaní mlieka, pretože zabezpečuje dobrú následnú rozpustnosť a disperzibilitu. Vhodným usporiadaním môžeme využiť linku aj ako instantizér.



Obr. 4.25. Schéma dvojstupňového sušenia [9]:  
 1 – vstup studeného vzduchu, 2 – rozprašovacia sušiareň, 3 – vstup sušeného produktu,  
 4 – vysušený produkt, 5 – odlučovacie cyklóny, 6 – vibrofluidné sušiaco zariadenie,  
 7 – vibrofluidné chladiace zariadenie

ZOZNAM SYMBOLOV

$c_{pv}$	– stredné merné teplo vzduchu	( $J \cdot kg^{-1}K^{-1}$ )
$c_{pvp}$	– stredné merné teplo pary	( $J \cdot kg^{-1}K^{-1}$ )
$c_t$	– špecifická tepelná kapacita transportných zariadení	( $J \cdot kg^{-1}K^{-1}$ )



$c_v$	– špecifická tepelná kapacita vody	(J. kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$c_S$	– špecifická tepelná kapacita suchého materiálu (sušiny)	(J. kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$i$	– entalpia vlhkého vzduchu	(J. kg <sup>-1</sup> )
$i_A$	– entalpia vzduchu vstupujúceho do sušiarne	(J. kg <sup>-1</sup> )
$i_B$	– entalpia vzduchu vystupujúceho zo sušiarne	(J. kg <sup>-1</sup> )
$i_0$	– entalpia vzduchu vstupujúceho do kaloriféra	(J. kg <sup>-1</sup> )
$l$	– merná spotreba vzduchu	(kg. kg <sup>-1</sup> )
$m_v$	– hmotnosť kvapaliny vo vlhkom telese	(kg)
$m_A$	– počiatočná hmotnosť látky	(kg)
$m_S$	– hmotnosť sušiny	(kg)
$m_{S(50^{\circ}\text{C})}$	– hmotnosť sušiny pri teplote 50 °C	(kg)
$\dot{m}_t$	– hmotnostný tok transportných zariadení dopravujúcich sušený materiál	(kg. s <sup>-1</sup> )
$\dot{m}_v$	– hmotnostný tok odparenej vody v sušiarne	(kg. s <sup>-1</sup> )
$\dot{m}_{LS}$	– hmotnostný tok suchého vzduchu prechádzajúceho sušiarňou	(kg. s <sup>-1</sup> )
$\dot{m}_S$	– hmotnostný tok suchého materiálu (sušiny) sušiarňou	(kg. s <sup>-1</sup> )
$q$	– merná spotreba tepla	(J. kg <sup>-1</sup> )
$q_m$	– merná spotreba tepla v materiáli	(J. kg <sup>-1</sup> )
$q_t$	– merná spotreba tepla v transportnom zariadení	(J. kg <sup>-1</sup> )
$q_D$	– merná spotreba tepla privedeného priamo do sušiarne	(J. kg <sup>-1</sup> )
$q_K$	– merná spotreba tepla spotrebovaného v kaloriféri	(J. kg <sup>-1</sup> )
$q_S$	– merná spotreba tepla v podobe strát do okolia	(J. kg <sup>-1</sup> )
$r_0$	– výparné teplo vody pri teplote 0 °C	(J. kg <sup>-1</sup> )
$u$	– merná vlhkosť	(kg. kg <sup>-1</sup> )
$u_A$	– merná vlhkosť materiálu na vstupe do sušiarne	(kg. kg <sup>-1</sup> )
$u_B$	– merná vlhkosť materiálu pri výstupe zo sušiarne	(kg. kg <sup>-1</sup> )
$\bar{u}$	– stredná merná vlhkosť	(kg. kg <sup>-1</sup> )
$\dot{Q}$	– celkové množstvo tepla spotrebované na sušenie	(W)
$\dot{Q}_D$	– množstvo tepla privedené priamo do sušiarne	(W)
$\dot{Q}_K$	– množstvo tepla spotrebované v kaloriféri	(W)
$\dot{Q}_S$	– straty tepla zo sušiarne do okolia	(W)
$T$	– teplota vzduchu	(K)
$T_m$	– teplota mokrého teplomera	(K)
$T_{mA}$	– teplota materiálu pri vstupe do sušiarne	(K)
$T_{mB}$	– teplota materiálu na výstupe zo sušiarne	(K)
$T_{tvst}$	– teplota transportných zariadení na vstupe	(K)
$T_{tvýst}$	– teplota transportných zariadení pri výstupe	(K)
$T_A$	– teplota vzduchu vstupujúceho do sušiarne	(K)
$T_0$	– teplota vzduchu vstupujúceho do kaloriféra	(K)
$Y$	– obsah vodnej pary v 1kg suchého vzduchu	(kg. kg <sup>-1</sup> )
$Y_A$	– absolútna vlhkosť vzduchu vstupujúceho do sušiarne	(kg. kg <sup>-1</sup> )
$Y_0$	– absolútna vlhkosť vzduchu vstupujúceho do kaloriféra	(kg. kg <sup>-1</sup> )
$\Delta$	– rozdiel mernej spotreba tepla skutočnej sušiarne od teoretickej sušiarne	(J. kg <sup>-1</sup> )
$\varphi$	– relatívna vlhkosť	(1)
$\tau$	– doba sušenia	(s)