

25 Sušení

Hlavní cíle kapitoly: Seznámit se základními typy sušáren. Probrat vlastnosti vlhkého vzduchu. Vyloužit vsádkové sušení s konstantními parametry sušícího plynu a varianty kontinuálního sušení.

Požadované znalosti: Relativní zlomky a jejich uplatnění v bilanci, rosný bod a relativní vlhkost vzduchu, entalpický diagram.

Úvodem se kvalitativně diskutuje význam sušení, vlastnosti sušeného materiálu a typy sušáren. Kvantitativní popis se skládá z bilancí hmotnosti a entalpie, z vyjádření fázové rovnováhy mezi mokrým materiálem a plynem a z rovnice kinetiky sušení. Ta se zde popisuje rovnicí přestupu hmoty vlhkosti v plynné fázi a obvykle empirickým vyjádřením závislosti rychlosti sušení na vlhkosti materiálu. Probírá se sušení ve vsádkové a v nepřetržitě pracující sušárně.

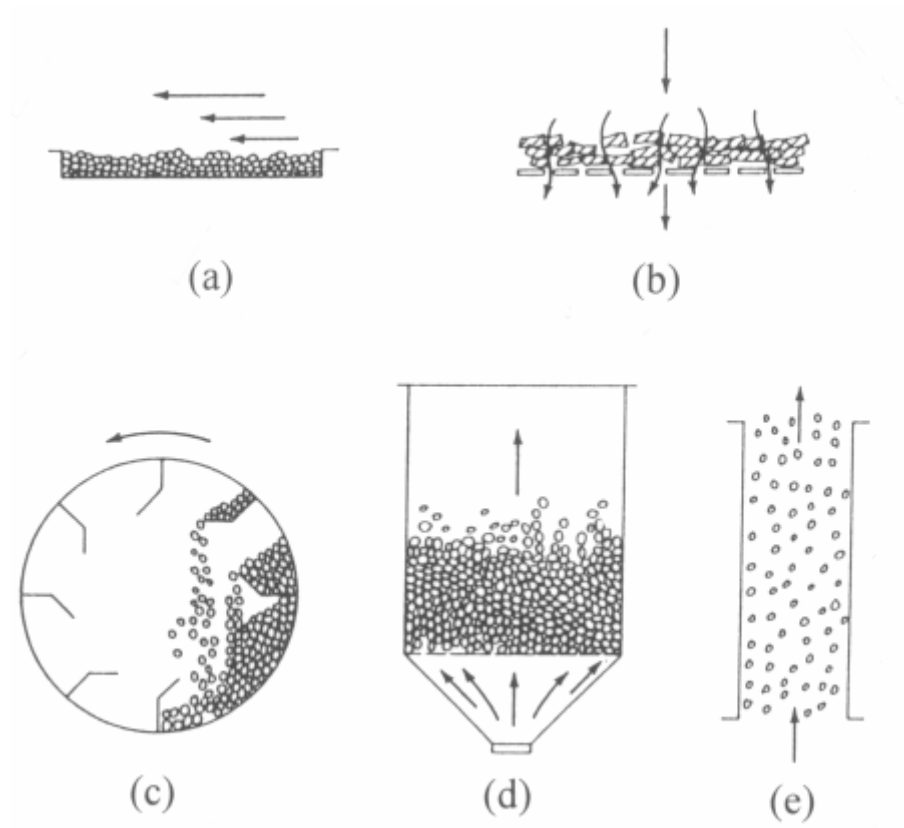
25.1 Úvod

Vlhkost mokrého materiálu je kapalný adsorbát vázaný na jeho vnější a vnitřní (porézní materiály) povrch. Adsorbens s adsorbátem jsou obklopeny pouze plynnou fází a transport hmoty nastává pouze jedním směrem, a to do plynné fáze. Proces se nazývá *sušení*. Sušením se obvykle míní snižování koncentrace kapaliny ve směsi s pevnou látkou odpařováním na pevný produkt. Vlhký materiál obsahuje většinou poměrně malé množství kapaliny, přičemž těkavost kapaliny je řádově větší než těkavost pevné látky. Někdy však surovina před sušením nemá pevné skupenství, jako při výrobě sušeného mléka. Sušení bývá často poslední z výrobních operací, kterými prochází určitý produkt. Sušeným materiálem mohou být krystaly, granule, vločky, práškový materiál, desky nebo jiný kusový materiál, ale též pasta, suspenze, emulze nebo roztok. Někdy je nutné materiál sušit při úzce vymezených podmínkách (např. potraviny), jindy sušený materiál snáší extrémní podmínky jak mechanické, tak tepelné (některé anorganické materiály).

Odstraňovanou kapalinou je nejčastěji voda. Kapalina je buď vně pevného materiálu (např. krystalů), nebo zcela uvnitř (např. rozpouštědlo v desce polymeru) a obecně je částečně na povrchu a částečně uvnitř materiálu.

Sušení je velmi rozšířený proces a provádí se v sušárnách. Vzhledem ke značně rozmanitým požadavkům na sušený materiál existuje mnoho typů sušáren (v literatuře [71] se udává existence 70 tříd a podtříd sušáren). Liší se především způsobem, jakým se dodává energie potřebná k sušení, a způsobem dopravy materiálu sušárnou. Nejčastěji materiál přijímá energii z horkého plynu, který proudí sušárnou a je ve styku se sušeným materiálem. Pak se jedná o konvekční sušárnu. Těchto sušáren je mnoho typů (fluidační, pneumatické, bubnové, pásové, skříňové, tunelové, turbínové, proudové, rozprašovací aj.). Jindy se energie dodává materiálu zvenčí jako v sušárnách kontaktních, radiačních, dielektrických či mikrovlnných. Z takové sušárny pak vystupují pouze páry vlhkosti, případně s inertním plynem. Doba sušení má rozsah od několika sekund v rozprašovacích sušárnách k nejvýš jedné hodině v bubnových sušárnách a k několika hodinám až dnům v tunelových či pásových sušárnách.

V konvekčních sušárnách se suší jak velké kusy materiálu, jako jsou keramické produkty či desky polymerů, tak i zrnitý materiál. Sušení se provádí rozličnými způsoby znázorněnými na obr. 25.1:



Obr. 25.1. Způsoby kontaktu plynu se sušeným materiálem

a) Sušící plyn proudí podél povrchu vrstvy, pevné desky či filmu buď z jedné strany, nebo z obou stran.

b) Sušící plyn proudí vrstvou hrubších částic sušeného materiálu uloženého na sítu.

c) Částice materiálu padají proudícím plynem (např. v šikmém válci s vestavbami). Podobně jako při způsobech a) a b) je proudění plynu pomalé, aby se jím neunášel sušený materiál.

d) Sušící plyn prochází vrstvou zrnitého materiálu rychlostí větší, než je prahová rychlost fluidace (viz kap.11). Plyn odcházející z fluidní vrstvy obsahuje určitý podíl sušeného materiálu, který se zachycuje v cyklónu nebo filtru zařazeném za sušárnou (viz kap.10).

e) Částice materiálu jsou sušeny a zároveň transportovány plynem, který má rychlost větší, než je prahová rychlost úletu.

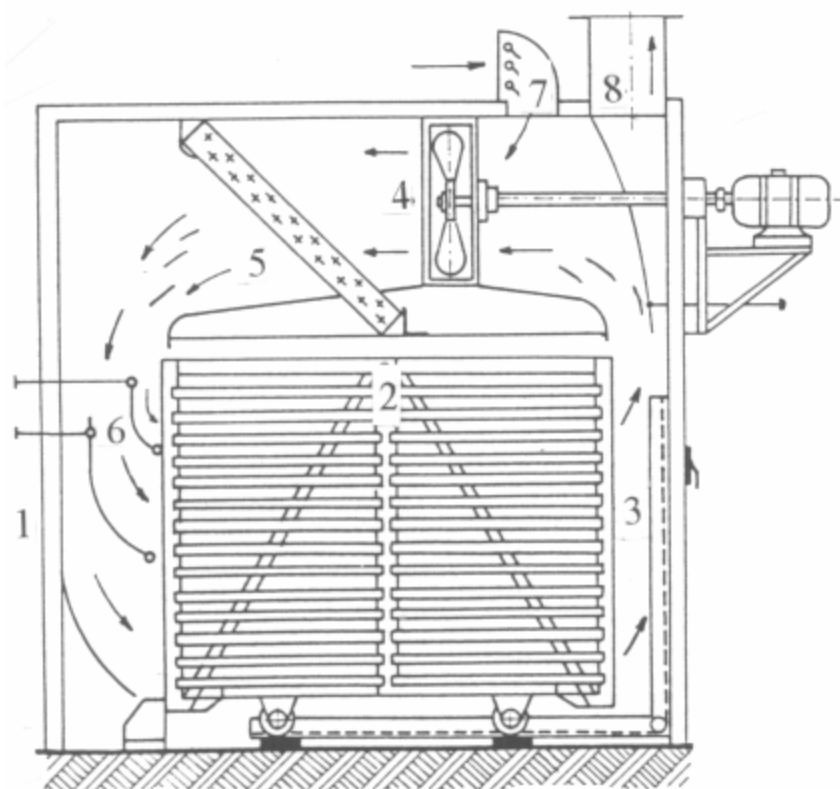
Konvekční sušárny jsou vybaveny tepelným výměníkem k zahřívání proudícího plynu. Tento výměník se běžně nazývá *kalorifer*.

Sušárny s nepřímým (vnějším) přívodem energie se liší především způsobem styku materiálu s teplosměnnou plochou:

a) Materiál se rozprostře po vodorovném povrchu, který je buď nehybný, nebo se pomalu pohybuje. Teplosměnný povrch se vyhřívá elektricky nebo kondenzující párou či horkou vodou. Materiál se též zahřívá infračerveným nebo mikrovlnným zářením.

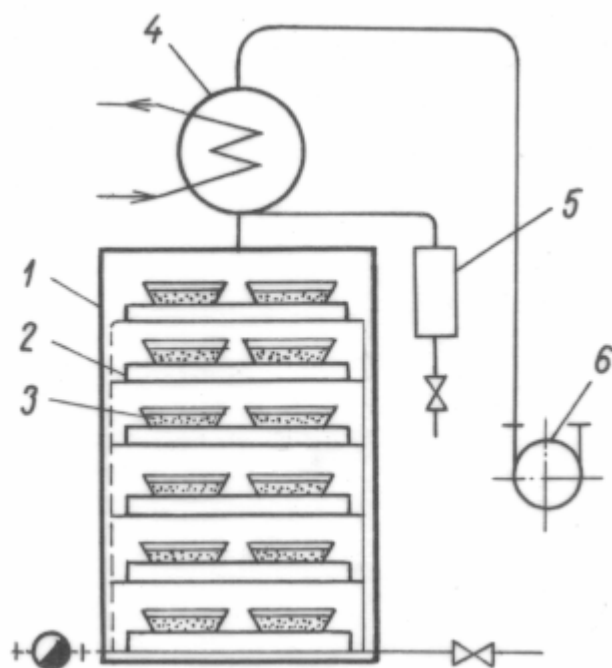
b) Materiál se pohybuje po vyhříváném, obvykle válcovém povrchu (válcové sušárny) buď pomocí míchadla, nebo např. šnekového dopravníku.

c) Materiál klouže vlivem tíže po šikmém vyhříváném povrchu.



Obr. 25.2. Schéma skříňové sušárny

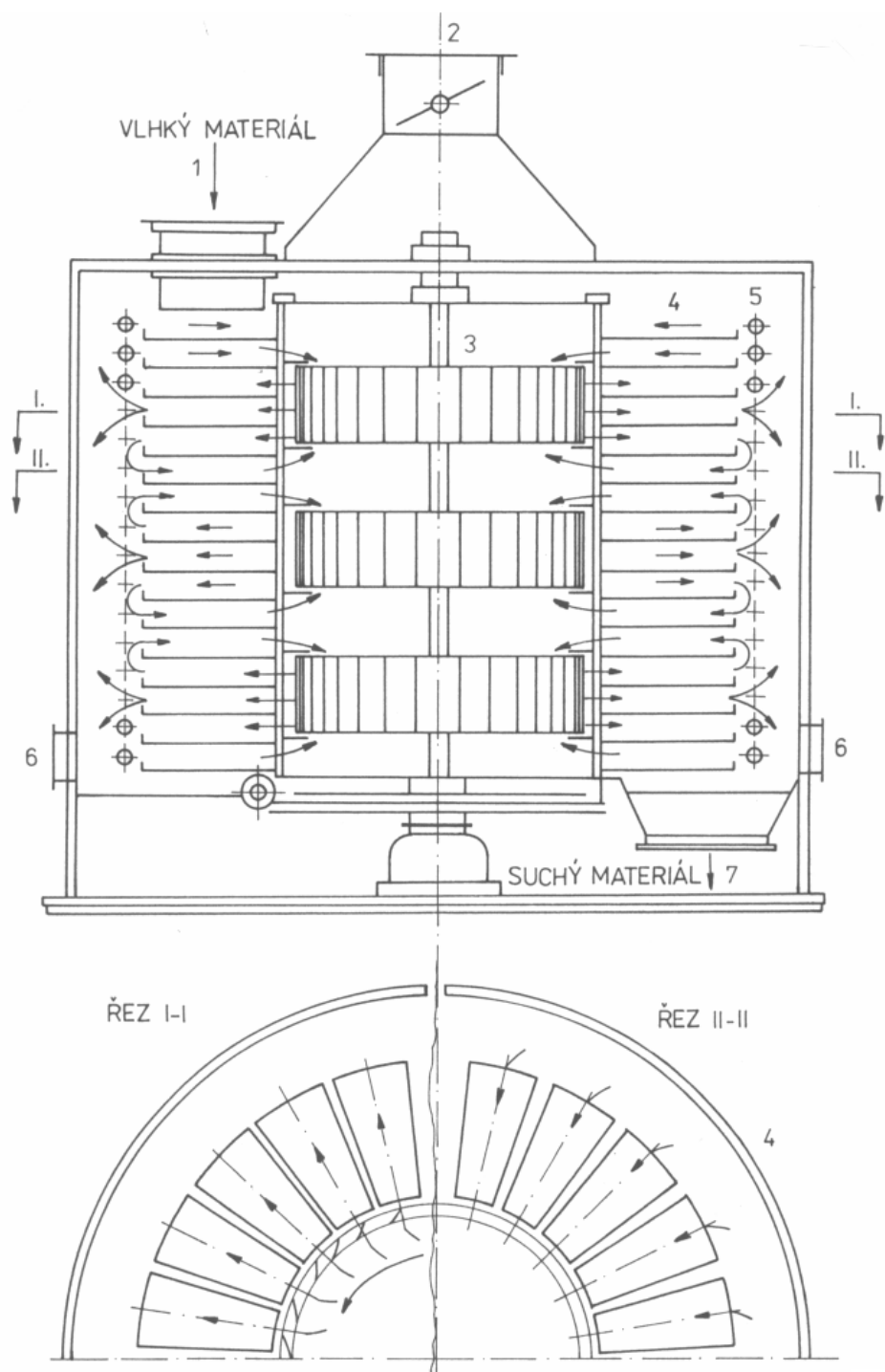
- 1-skříň sušárny
- 2-lísky s materiálem
- 3-vozik
- 4-ventilátor
- 5-topná soustava
- 6-usměrňovače proudu plynu
- 7-přívod plynu
- 8-odvod plynu



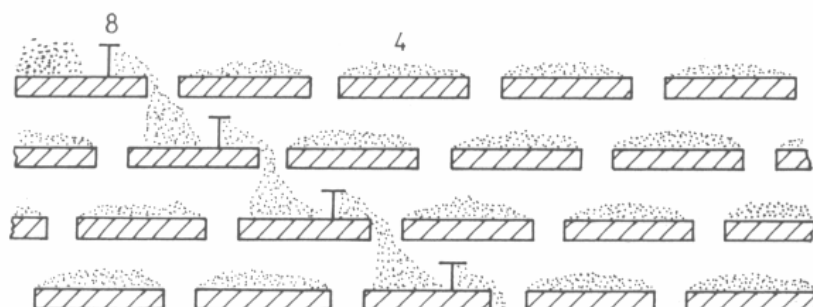
Obr. 25.3. Schéma skříňové vakuové sušárny

- 1-skříň sušárny
- 2-topné police
- 3-misky s vysoušeným materiálem
- 4-kondenzátor
- 5-sběrač kondenzátu
- 6-vývěva

Sušení se provozuje při atmosférickém tlaku nebo při tlaku nižším, než je atmosférický. Podle toho se sušárny rozdělují na atmosférické a vakuové. Podle formy sušeného materiálu existují dvě



Obr.25.4. Schéma
turbínové sušárny



- 1-přívod materiálu
- 2-odvod plynu
- 3-ventilátor
- 4-lisky
- 5-topení
- 6-přívod plynu
- 7-odvod materiálu
- 8-shrabovač

skupiny sušáren. Větší skupina zpracovává pevný materiál ve formě např. desek, granulátu či polotuhé pasty. Ve druhé skupině jsou sušárny suspenzí či roztoků.

Typické sušárny pevných látek a past jsou lísková sušárna a sušárna se sítovým dopravním pásem. Používají se pro materiál, který se nedá promíchávat. Promíchávání materiálu umožňuje sušárna turbínová, rotační bubnová, se šnekovým dopravníkem a fluidační sušárna.

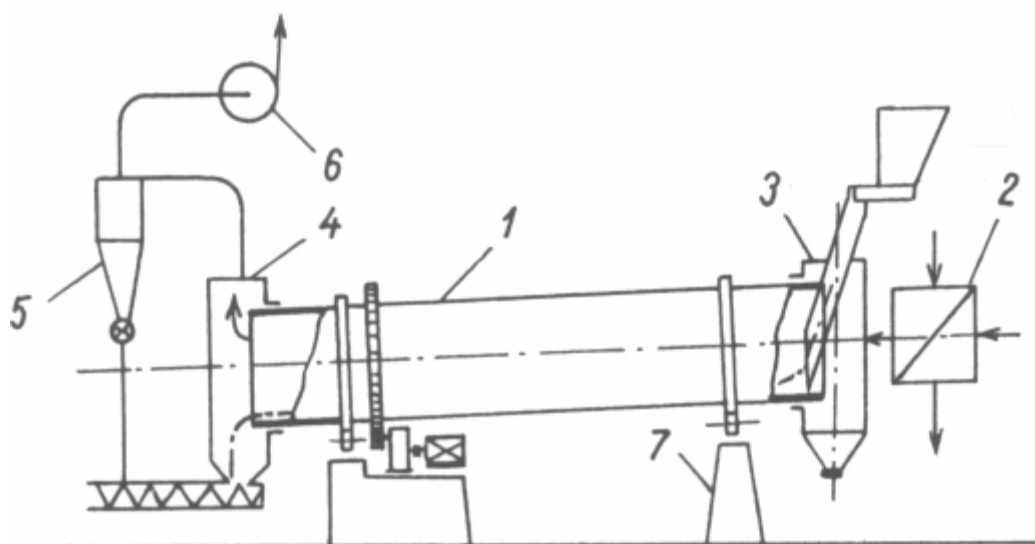
Na *obr.25.2* je schéma vsádkové *skříňové (lískové) sušárny*. Je to komora, do níž se zavážejí vozíky se sušeným materiálem na lískách. Ventilátor žene směs čerstvého a obíhajícího vzduchu na topnou soustavu trubek (kalorifer) a ohřátý vzduch proudí prostorem mezi lískami. Ovlhčený vzduch částečně obíhá a částečně odchází ze sušárny, přičemž poměr množství obíhajícího a odváděného vzduchu je možné nastavit. Po ukončení sušení se vozíky vyvezou ze sušárny, lísky se zbaví vysušeného materiálu a naplní se čerstvým vlhkým materiálem. V tomto typu sušáren se dá sušit téměř cokoli, ale jejich provoz je nákladný, protože ukládání na lísku a vyprazdňování lísek je pracné. Sušení je pomalé a pro jednu vsádku trvá přibližně od 5 do 50 hodin. Skříňové sušárny se používají pro malá množství produktu, který je cenný, např. při výrobě farmaceutických produktů.

Vsádkově pracující sušárna s nepřímým ohřevem je *vakuová sušárna* z *obr. 25.3*. Je to tepelně izolovaná skříň s topnými policemi, na které se ukládají misky s vlhkým materiálem. Topné police se vytápějí topnou párou nebo horkou vodou, popř. kombinací obou způsobů. Pára vzniklá odpařováním kapaliny se odsává vývěvou a zkapalňuje v kondenzátoru. Ve skříňových vakuových sušárnách se vysoušejí menší dávky materiálu různé konzistence. Suší se v nich i při nízkých teplotách (vymražování, např. sušení vitamínů).

Turbínová sušárna je věžový aparát s vnitřní cirkulací sušícího plynu udržovanou turbínovými ventilátory (viz *obr. 25.4*). Obsahuje lísky, které vytvářejí segmenty, mezi nimiž jsou několik centimetrů široké mezery. Rozmělněný materiál se sype na nejvyšší lísku, srovná se pevným urovnavačem do nízké vrstvy a zůstává v klidu téměř celou otáčku, než se pevným shrabovačem shrne na nižší lísku. Plyn proudí nad lískami v prstencovém prostoru mezi ventilátory a stěnou sušárny, přičemž vně lísek jsou umístěny teplosměnné trubky. Ventilátory jednak dopravují plyn k vnějším stěnám a jednak jej ohřátý nasávají zpět (rychlost plynu je od 0,5 do 2,5 m/s). Materiál se suší tím, že plyn proudí podél povrchu vrstvy na lísce, a tím, že plyn prochází sesypávaným materiálem. Plyn se obvykle nasává předeřtý na dolním konci sušárny a odchází hore, takže je uspořádání protiproudové.

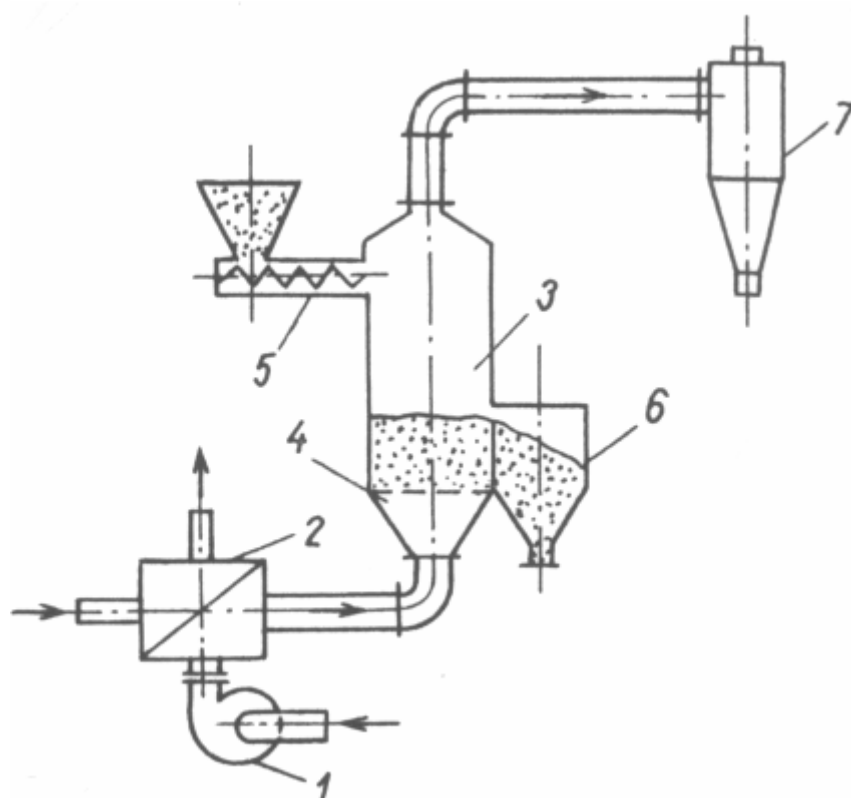
Rozšířené jsou *bubnové sušárny* (viz *obr. 25.5*). Hlavní jejich součástí je válec (buben) s mírně skloněnou podélnou osou, uložený na nosných a opěrných kladkách. Buben se otáčí kolem své osy a frekvenci jeho otáčení lze v určitém rozmezí měnit. Vlhký materiál se dávkuje do vyššího konce bubnu a odtamtud rotací a působením vestavby bubnu a proudění sušícího plynu postupuje složitým pohybem směrem k dolnímu konci bubnu (doba prodlení materiálu v sušárně bývá 5 až 90 min, jeho zadrž činí 7 až 8% aktivního objemu sušárny). Přitom se buď přímo stýká s horkým sušícím plynem, který odnáší vznikající páru, nebo se vyhřívá nepřímo a pára unikající ze sušeného materiálu se odvádí samotná nebo pomocí jiného plynu, popř. se oba způsoby kombinují. U sušárny konvekčního typu je sušící plyn po průchodu zařízením veden do odlučovače, kde se oddělí unášené částice vysušeného materiálu. Uspořádání transportu plynu a materiálu může být souproud nebo protiproud. Bubnových sušáren se používá především k vysoušení sypkých materiálů, které během sušení podstatně nemění své sypné vlastnosti. Pomocí vestaveb v bubnu lze sušit i materiály pastovité a lepidlo.

Intenzita hmotnostního toku sušícího plynu v bubnové sušárně závisí na prašnosti materiálu a pohybuje se od hodnoty $2 \cdot 10^3$ do $2 \cdot 10^4$ kg m⁻² h⁻¹, jeho teplota na vstupu do sušárny bývá 120 až 180 °C (pro vzduch ohříváný párou) nebo 540 až 820 °C (kouřové plyny). Průměr bubnu je od 1 do 3 m a obvodová rychlost bubnu je od 20 do 25 m min⁻¹.



Obr. 25.5. Schéma bubnové sušárny

1-buben; 2-tepelný výměník; 3-vstupní komora pro vlhký materiál; 4-sběrná komora pro vysušený produkt; 5-odlučovač částic; 6-ventilátor; 7-nosná konstrukce



Obr. 25.6. Schéma fluidační sušárny

1-ventilátor; 2-tepelný výměník nebo spalovací komora; 3-sušicí komora; 4-fluidační rošt; 5-podavač vlhkého materiálu; 6-zásobník vysušeného materiálu; 7-odlučovač částic

Obr. 25.6 je schématem typické *fluidační sušárny* (viz též obr. 11.7 v kap.11). Vlhký materiál (průměr částic bývá řádově v desetinách milimetru) se dávkovačem 5 přivádí do sušicí komory 3 s fluidní vrstvou. Z vrstvy přepadá část vysušeného materiálu do zásobníku 6. Suší se plynem, který je dopravován ventilátorem 1 do tepelného výměníku 2, zahřívá se v něm na předepsanou teplotu a vstupuje do sušicí komory 3 (jeho rychlost bývá dvojnásobkem minimální rychlosti fluidace), kde udržuje vrstvu sušeného materiálu ve fluidním stavu. Ze sušicí komory se

vlhký plyn vede do odlučovače 7, kde se od něj oddělí unášené částice sušeného materiálu (doba prodlení materiálu v nepřetržitě pracující sušárně bývá 1 až 2 minuty, při vsádkovém provozu může být podstatně delší). Fluidační sušárna je vhodná především pro sypké zrnité materiály, ale možnost použití je širší (viz lit.[70]). Může pracovat vsádkově nebo nepřetržitě.

Ve fluidní vrstvě je mísení a výměna hmoty a energie velmi intenzivní. Rozložení dob prodlení částic ve fluidní vrstvě se blíží rozložení v ideálním mísiči (viz kap.13) a střední doba prodlení je od 30 s do 30 min. Krátké doby prodlení vyhovují, když je třeba pouze odpařit povrchový film kapaliny. Sušení probíhá intenzivně a rovnoměrně (dobré promíchávání) a odcházející plyn má v podstatě rovnovážnou vlhkost při teplotě ve fluidní vrstvě. Nevýhodný je tehdy, když je materiál prašný či podléhá-li snadno oděru. Pak je velký únos drobných částic.

Další typy sušáren popisuje odborná literatura (viz např. lit.[70] či [71]).

25.2 Vlastnosti vlhkého plynu a materiálu

V tomto oddílu se diskutují relativní vlhkost, teplota adiabatického nasycení, teplota mokrého teploměru pro vlhký plyn a vyjádření vlhkosti plynu a mokrého materiálu. Probírá se entalpický diagram vlhkého vzduchu a diskutuje se rovnovážná závislost vlhkosti vzduchu na vlhkosti materiálu.

V konvekčních sušárnách se často používá vzduchu obsahujícího vodní páru a v tomto oddílu se budeme zabývat vyjádřením jeho vlhkosti a entalpie a popisem změn těchto veličin. To má význam též např. pro klimatizaci. Výklad však je obecný a platí i pro jiné plynné směsi, pokud není výslovně řečeno jinak.

25.2.1 Vlhkost a relativní měrná entalpie vlhkého plynu

V popisu sušení je běžné vyjadřovat množství hmotnostně. Protože mezi materiálem a plynem přechází pouze pára odpařované kapaliny, nemění se při průchodu sušárnou tok suchého plynu. Je tedy obvyklé vyjadřovat koncentraci této páry v plynu jejím relativním hmotnostním zlomkem (obdobná situace byla při popisu absorpce či extrakce). Označí-li se odpařovaná kapalina a její pára symbolem A a bezvodý plyn symbolem B a platí

$$m_A = Y_A m_B = y_A m_g \quad (25.2-1)$$

Vedle této koncentrace se v sušárenské praxi používá *relativní vlhkost* φ definovaná vzorcem

$$\boxed{\varphi \equiv p_A / p_A^o} \quad [p_A^o \leq p] \quad (25.2-2)$$

kde je p_A parciální tlak vlhkosti v plynu a p_A^o rovnovážný tlak páry čisté kapaliny A při teplotě plynu. Pokud je teplota vyšší než bod varu při celkovém tlaku p , je relativní vlhkost $\varphi = p_A/p$. Běžně se uvádí relativní vlhkost v procentech z maximální hodnoty $\varphi = 1$.

Vztah mezi relativním hmotnostním zlomkem vlhkosti Y_A a relativní vlhkostí φ plyne z jejich definic:

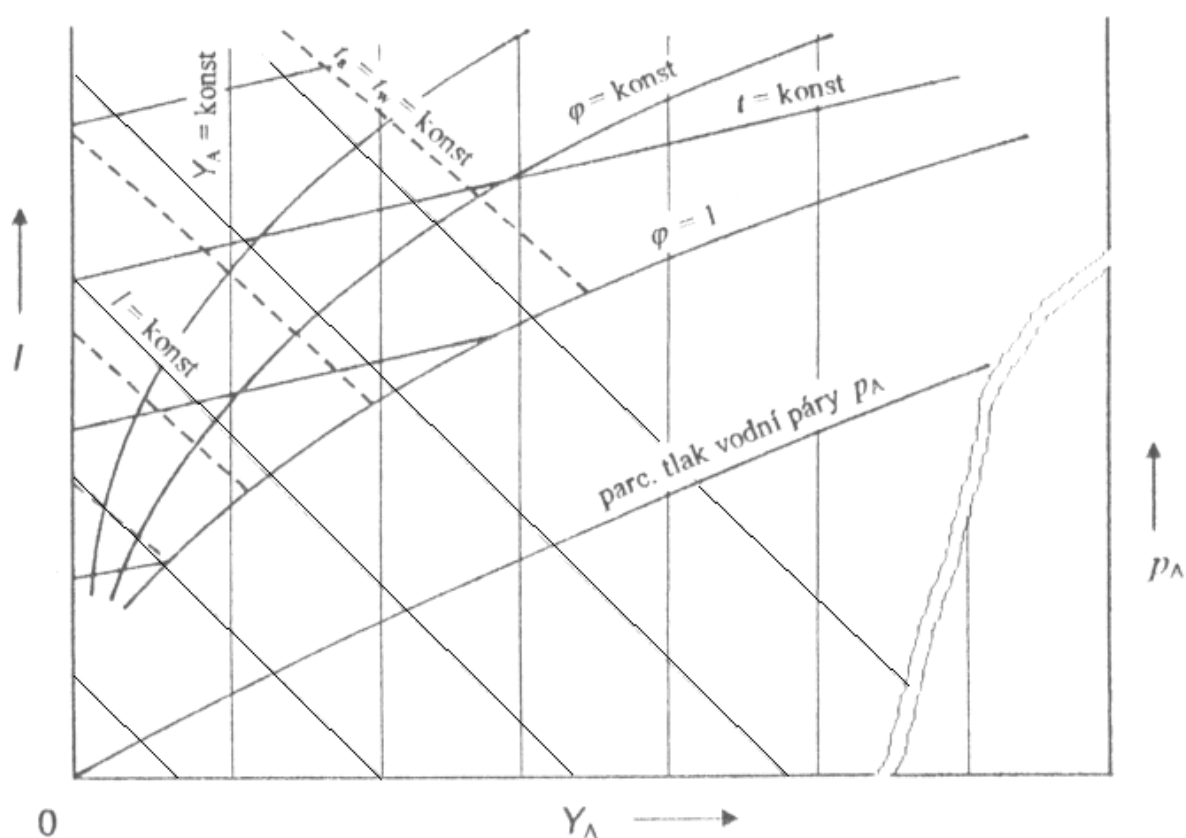
$$\boxed{Y_A = \frac{M_A n_A}{M_B n_B} = \frac{M_A y_A}{M_B y_B} = \frac{M_A}{M_B} \frac{p_A}{p - p_A} = \frac{M_A}{M_B} \frac{\varphi p_A^o}{p - \varphi p_A^o} = \frac{M_A / M_B}{[p / (\varphi p_A^o)] - 1}} \quad (25.2-3)$$

Zde jsme využili rovn. (25.2-2) a toho, že celkový tlak je součtem parciálních tlaků složek A a B.

Nejčastější kapalinou odstraňovanou ze směsi s pevnou látkou je voda a nejčastějším plynem používaným v konvekčních sušárnách je vzduch. Pak je poměr $M_A/M_B = 0,622$ a rovnovážný tlak vodní páry se dá vyjádřit z Antoinovy rovnice [56a]

$$p_A^0 = \exp\left(23,1964 - \frac{3816,44}{t + 227,02}\right) \quad [11 < t < 168 \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (25.2-4)$$

Řešení bilance vlhkosti a bilance entalpie vlhkého vzduchu se znázorňuje v diagramu závislosti jeho *relativní měrné entalpie* I na relativním hmotnostním zlomku vlhkosti Y_A . Nazývá se Mollierův či Ramzinův diagram (je obsažen např. v *Tabulkách*). Platí pro určitou hodnotu tlaku.



Obr. 25.7. Náčrt entalpického diagramu vlhkého vzduchu

Z průběhu čar pro konstantní hodnotu I na obr. 25.7 je patrné, že je nakreslen v kosoúhlých souřadnicích. Tím se rozšíří pracovní oblast diagramu, která leží nad křivkou $\phi = 1$, tj. nad čarou kondenzace. Vedle čar konstantní relativní vlhkosti jsou do diagramu nakresleny izoterm teploty vzduchu $t = \text{konst}$ a izoterm teploty adiabatického nasycení $t_a = \text{konst}$. Pro systém voda-vzduch přibližně platí $t_a = t_w$, kde t_w je teplota mokrého teploměru (výklad těchto dvou teplot bude dále uveden). Ve volné části diagramu pod křivkou $\phi = 1$ je nakreslena závislost parciálního tlaku vodní páry na jejím relativním hmotnostním zlomku Y_A , která plyne z rovn. (25.2-3).

V anglosaské literatuře se používá diagramu závislosti relativního hmotnostního zlomku vodní páry Y_A na teplotě vzduchu t se souborem čar pro konstantní teplotu mokrého teploměru a relativní vlhkost.

V dalším budou postupně probrány rovnice, na nichž jsou založeny čáry v entalpickém diagramu vlhkého vzduchu. Základní rovnicí je vyjádření relativní měrné entalpie vlhkého vzduchu l

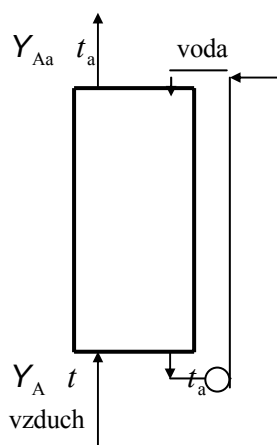
$$l = \frac{H_g}{m_B} = \frac{m_A(h_A - h_{A0}) + m_B(h_B - h_{B0})}{m_B} \quad (25.2-5)$$

Pro entalpie je běžné za referenční volit stav při 0°C za atmosférického tlaku pro vodu v kapalném a vzduch v plynném skupenství. Pro vlhký vzduch při teplotě $t^\circ\text{C}$ pak bude (střední hodnotu veličiny v daném teplotním intervalu označujeme lomenou závorkou):

$$\begin{aligned} h_A - h_{A0} &= \Delta h_{lgA}(0^\circ\text{C}) + \langle c_{pAg} \rangle t \\ h_B - h_{B0} &= \langle c_{pB} \rangle t \end{aligned} \quad (25.2-6)^*)$$

a po dosazení do rovn. (25.2-5) se obdrží^{**)}

$$\begin{aligned} l &= Y_A \Delta h_{lgA}(0^\circ\text{C}) + (Y_A \langle c_{pAg} \rangle + \langle c_{pB} \rangle) t \\ &= Y_A \Delta h_{lgA}(0^\circ\text{C}) + \langle C_p \rangle t \end{aligned} \quad (25.2-7)$$



Obr. 25.8. Adiabatické vlhčení vzduchu

Zde označuje symbol $\langle C_p \rangle$ střední hodnotu relativní měrné tepelné kapacity vlhkého vzduchu (vztahuje se na 1 kg suchého vzduchu). Při konstantní teplotě představuje rovn. (25.2-7) lineární závislost l na Y_A , proto jsou čáry $t = \text{konst}$ v entalpickém diagramu 25.7. přímky.

Nechť po vnitřní stěně svislé, tepelně izolované trubky stéká voda a proti ní proudí vzduch (viz obr. 25.8). Hodnota toku a vlastností přiváděných fází se s časem nemění. Mezi vzduchem a vodou se vyměňuje hmota a energie a pokud se voda recirkuluje, její teplota se ustálí na teplotě, kterou označíme t_a . Tato teplota je nižší nežli teplota přiváděného nenasyceného vzduchu t . V trubce se voda odpařuje a k tomu potřebnou energii dodává vzduch tím, že se ochlazuje (trubka je izolována). Je-li trubka dostatečně dlouhá, bude se vlhkost vystupujícího plynu blížit rovnovážné hodnotě a jeho teplota bude stejná jako teplota cirkulující vody. Tento proces se popíše entalpickou bilancí.

Označí se relativní hmotnostní zlomek vlhkosti přiváděného vzduchu symbolem Y_A a jeho relativní měrná entalpie symbolem l a symboly těchto veličin pro odváděný vzduch jsou Y_{Aa} a l_a ,

^{*)} Při některých odvozeních použijeme též označení $h_A - h_{A0} = h_{Ag}$.

^{***)} Z tabulek [67] (c_{pAg}, c_{pB}) plyne (pro $t^\circ\text{C}$)

$c_{pAg} = 1,835 + 1,6 \cdot 10^{-3} t \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$c_{pB} = 1 + 1,8 \cdot 10^{-4} t \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$\Delta h_{lgA} = 251,08 (422,9 - t)^{0,38} \text{ kJ kg}^{-1}$

[chyba < 1 % pro $0 < t < 100^\circ\text{C}$]

[chyba < 1 % pro $0 < t < 200^\circ\text{C}$]

[chyba < 1 % pro $0 < t < 200^\circ\text{C}$]

měrná entalpie vody při teplotě t_a symbolem h_{Aa} , přítok vody symbolem $\dot{m}_{Ai}$ a odtok $\dot{m}_{Ae}$. Pak bude balance entalpie

$$\dot{m}_B l + \dot{m}_{Ai} h_{Aa} = \dot{m}_B l_a + \dot{m}_{Ae} h_{Aa}$$

neboli

$$(\dot{m}_{Ai} - \dot{m}_{Ae}) h_{Aa} = \dot{m}_B (l_a - l) \quad (25.2-8)$$

S výhodou se zvolí referenční stav entalpií při teplotě t_a s vodou v kapalném a vzduchem v plynném skupenství. Pak bude

$$h_{Aa} = \langle c_{pAl} \rangle (t_a - t_a) = 0 \quad (25.2-9)$$

$$l = Y_A \Delta h_{lg Aa} + \langle C_p \rangle (t - t_a) \quad (25.2-10)$$

$$l_a = Y_{Aa} \Delta h_{lg Aa} \quad (25.2-11)$$

Dosadíme do balance entalpie (25.2-8), jejíž levá strana je nulová a tudíž

$$0 = (Y_{Aa} - Y_A) \Delta h_{lg Aa} - \langle C_p \rangle (t - t_a)$$

Z rovnice vyjádříme rozdíl teplot

$$t - t_a = \frac{\Delta h_{lg Aa}}{\langle C_p \rangle} (Y_{Aa} - Y_A) \quad (25.2-12)$$

Teplota t_a se nazývá *teplota adiabatického nasycení*. Bývá to teplota povrchu mokrého materiálu v sušárně. Této teploty by vzduch dosáhl, kdyby přešel z daného stavu do stavu nasycení adiabatickou cestou^{*)}. Každé dvojici hodnot teploty t a vlhkosti Y_A tedy přísluší určitá (jediná) teplota adiabatického nasycení t_a (hodnoty Y_{Aa} a $\Delta h_{lg Aa}$ jsou určeny hodnotou t_a). Na rovnici (25.2-12) je založena čára konstantní teploty adiabatického nasycení v entalpickém diagramu vlhkého vzduchu (přerušovaná čára v obr.25.7.). Je to soubor hodnot dvojic (l , Y_A) pro vlhký vzduch, které mají společnou hodnotu t_a . Tyto hodnoty charakterizují soubor stavů, kterými prochází vzduch při adiabatickém syčení vodní parou.

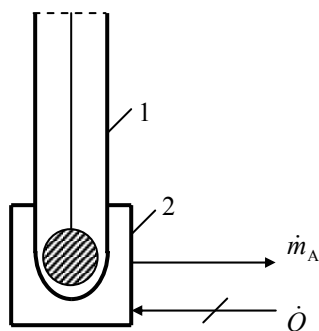
Výklad *teploty mokrého teploměru* vychází z popisu jejího měření. Teploměr, jehož čidlo je obaleno mokrou tkaninou, nazveme mokrý teploměr. Necht' kolem něj proudí plyn, který má konstantní teplotu a vlhkost, jejíž hodnota je menší než při nasycení. Pak se na mokřém teploměru naměří nižší teplota než na teploměru bez mokré tkaniny, tj. na suchém teploměru. Vysvětlení tohoto jevu plyne z mechanismu procesu probíhajícího na mokřém teploměru.

Do nenasyčeného plynu se z povrchu mokré tkaniny, obalující čidlo teploměru, odpařuje voda. Kdyby měl mokrý teploměr původně stejnou teplotu, jakou má plyn, bude s časem teplota teploměru klesat, protože se z něj odebírá energie na odpařování kapaliny. Vzniklý rozdíl mezi teplotou vzduchu a teplotou mokrého teploměru vyvolá přestup tepla ze vzduchu do teploměru.

S poklesem teploty mokrého teploměru rozdíl mezi teplotou vzduchu a teplotou mokrého teploměru, tj. hybná síla tepelného přestupu ze vzduchu do teploměru, vzrůstá. Protože tlak

^{*)}Odvození zůstává v platnosti i tehdy, když vlhkost A bude jiná látka než voda a plynem B nebude vzduch. Totéž bude platit pro odvození teploty mokrého teploměru.

rovnovážné páry s klesající teplotou rovněž klesá, zmenšuje se hybná síla a tím i rychlost odpařování. Tím se ochlazování zpomaluje a postupně se dosáhne konstantní teploty mokrého teploměru t_w . Pak se přivádí ze vzduchu právě tolik energie, kolik je třeba k odpařování vlhkosti.



Obr.27.9. Mokrý teploměr
1-teploměr; 2-mokrá tkanina

Vzorec pro teplotu mokrého teploměru se odvodí z popisu přestupu energie a hmoty. Tepelný přestup z plynu do teploměru se vyjádří pomocí koeficientu tepelného přestupu α vztahem (viz kap.16)

$$\dot{Q} = \alpha(t - t_w)A \quad (25.2-13)$$

a přestup hmoty při vypařování vody pomocí koeficientu přestupu hmoty k_Y

$$\dot{m}_A = k_Y(Y_{Aw} - Y_A)A \quad (25.2-14)$$

Protože se energie spotřebuje pouze na odpařování,

zjednoduší se bilance entalpie na tvar

$$\dot{Q} = \dot{m}_A \Delta h_{lgAw} \quad (25.2-15)$$

Z rovnic (25.2-13) až (25.2-15) plyne

$$t - t_w = \frac{\Delta h_{lgAw} k_Y}{\alpha} (Y_{Aw} - Y_A) \quad (25.2-16)$$

Poměr koeficientů přestupu hmoty a tepelného přestupu při turbulentním proudění můžeme pro analogické podmínky v obou procesech odhadnout z Colburnovy analogie, rovn. (22.4-17)

$$St_D / St = (Pr / Sc)^{2/3} \quad (25.2-17)$$

kde

$$\frac{St_D}{St} = \frac{St_D}{Nu/Pe} = \frac{k_c / \nu}{\alpha / (\rho \langle C_p \rangle \nu)} = \frac{k_Y \langle C_p \rangle}{\alpha}$$

Kritérium $St = Nu/Pe$ plyne z rovn.(16-5) a (16-7) a vztah mezi k_c a k_Y se odečte z tab.14-3 v Příkladech. Dosadí se do rovn.(25.2-16)

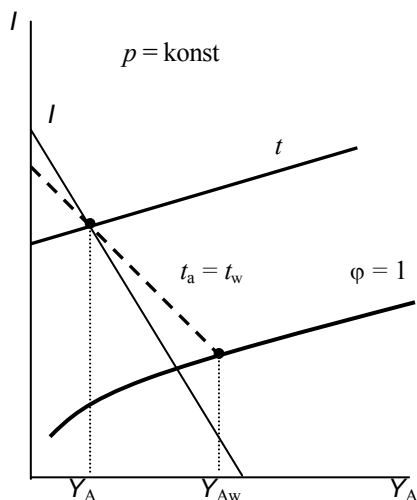
$$t - t_w = \frac{\Delta h_{lgAw}}{\langle C_p \rangle} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} (Y_{Aw} - Y_A) \quad (25.2-18)$$

Pro systém voda-vzduch platí $Pr / Sc = D_{AB} / a \cong 1$, kde a je teplotní vodivost, D_{AB} difuzní koeficient. Pak podle rovn.(25.2-17) $\alpha = \langle C_p \rangle k_Y$ a z rovn. (25.2-18) plyne

$$t - t_w = \frac{\Delta h_{lgAw}}{\langle C_p \rangle} (Y_{Aw} - Y_A) \quad [\text{voda+vzduch}] \quad (25.2-19)$$

Porovnání s rovn. (25.2-12) ukazuje, že rovnice mají shodný tvar. Pro systém voda-vzduch tedy platí

$$t_a = t_w \quad [\text{voda+vzduch}] \quad (25.2-20)$$



Obr. 25.10. Určení stavu vzduchu z teplot suchého a mokrého teploměru

a čáry $t_a = \text{konst}$ na entalpickém diagramu vlhkého vzduchu jsou proto zároveň čarami $t_w = \text{konst}$. Toho se využívá ke stanovení stavu vzduchu na základě teplot suchého teploměru t a mokrého teploměru t_w . Jak je vidět na obr. 25.10, je stav vlhkého vzduchu určen průsečíkem izoterem suchého a mokrého teploměru. Z rovnic (25.2-12) a (25.2-19) plyne, že hodnota $t_a = t_w$ závisí pouze na parametrech přiváděného vzduchu.

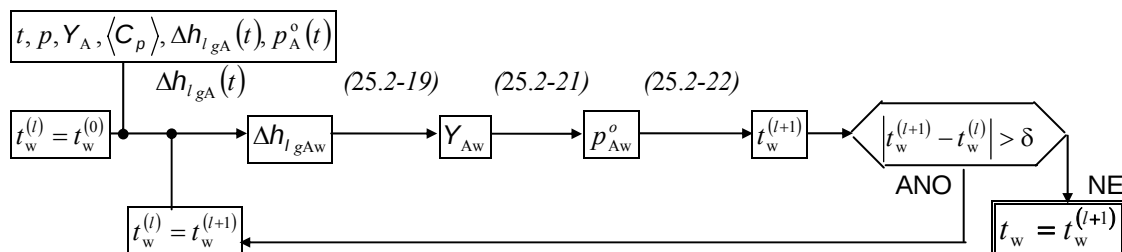
Pro vzduch o teplotě t a vlhkosti Y_A se dá teplota mokrého teploměru určit řešením rovn.(25.2-19) iterací. Z prvního odhadu této teploty se vypočte odhad hodnoty měrné výparné entalpie [viz poznámku pod čarou před rovn.(25.2-7)]. Podle rovn.(25.2-19) se z těchto hodnot spočte hodnota Y_{Aw} . Z ní se podle rovn. (25.2-3) vypočte parciální tlak vodní páry na fázovém rozhraní v mokrému teploměru

$$p_{Aw}^o = \frac{p}{M_A / (M_B Y_{Aw}) + 1} \quad (25.2-21)$$

Tento údaj a vzorec pro výpočet rovnovážného tlaku páry umožní zjistit nový odhad teploty mokrého teploměru. Např. podle Antoineovy rovnice platí

$$t_w = \frac{B_A}{A_A - \ln p_{Aw}^o} - C_A \quad (25.2-22)$$

Tak se získá nový odhad teploty mokrého teploměru a výpočet se opakuje, dokud se nedosáhne vyhovujícího souhlasu. Příklad takového výpočtu obsahuje P 21-1 v Příkladech a v obr.25.I. je uveden algoritmus výpočtu.



Obr.25.I. Algoritmus výpočtu teploty mokrého teploměru a rovnovážné vlhkosti při této teplotě

25.2.2 Vlhkost a relativní měrná entalpie mokrého materiálu

Vlhkost sušeného materiálu je výhodné vyjadřovat jejím relativním hmotnostním zlomkem, ve kterém je sušina referenční složkou. Při průchodu sušárnou tak zůstává základ koncentrací stálý, je to obdoba konstantnosti toku suchého plynu. Označí-li se hmotnost vlhkosti v materiálu symbolem m_A a hmotnost sušiny m_C , platí

$$m_A = m_C X_A = m_i (1 - x_{Ai}) X_A \quad (25.2-23)$$

Relativní měrná entalpie sušeného materiálu I_m je definována jako entalpie mokrého materiálu H_m lomená hmotností sušiny m_C

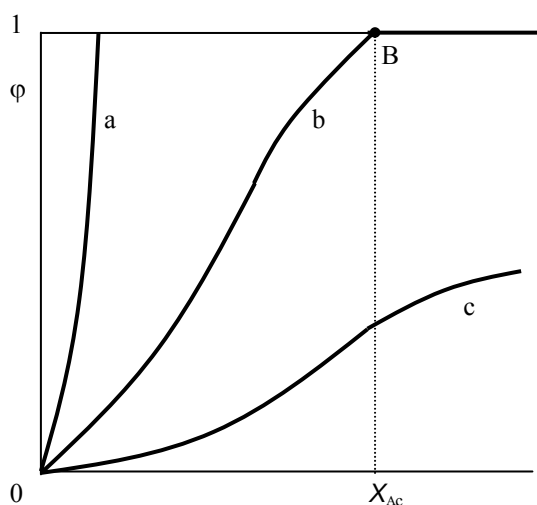
$$I_m = \frac{H_m}{m_C} = \frac{m_A (h_{Al} - h_{A0}) + m_C (h_C - h_{C0}) + \Delta H_{\text{mix}}}{m_C}$$

neboli

$$\boxed{I_m = X_A (h_{Al} - h_{A0}) + h_C - h_{C0} + (\Delta H_{\text{mix}} / m_C)} \\ = (X_A \langle c_{pAl} \rangle + \langle c_{pC} \rangle) t_m + (\Delta H_{\text{mix}} / m_C) \quad (25.2-24)$$

Zde označuje symbol h_{Al} měrnou entalpii kapaliny v sušeném materiálu, ΔH_{mix} směšovací entalpii, která závisí na vazbě vlhkosti na materiál (adsorpční entalpie), $\langle c_{pAl} \rangle$ a $\langle c_{pC} \rangle$ střední měrnou tepelnou kapacitu vlhkosti a suchého materiálu. Referenční stav entalpií je opět uvažován při 0°C.

Na obr. 25.11 je znázorněna závislost relativní vlhkosti vzduchu ϕ na relativním hmotnostním zlomku vlhkosti materiálu X_A při fázové rovnováze pro několik typických materiálů. Kompaktní látky nerozpustné v kapalině a se slabou adsorpční schopností mají malou rovnovážnou vlhkost. Naopak rovnovážná vlhkost látek porézních a houbovitých může být značná. Pevné látky mohou vázat vlhkost na svůj povrch silami fyzikálními i chemickými (viz též kap. 24). Při sušení látek rozpustných v kapalině tvořící vlhkost záleží na tom, jaký je parciální tlak složky A v plynu. Pokud má hodnotu menší, než tlak její páry nad nasyceným (rovnovážným) roztokem při stejné teplotě, křivka se podobá průběhu pro ZnO, je-li větší, materiál se rozpouští v kapalině.



Obr. 25.11. Závislost ϕ na X_A pro některé materiály a vzduch při fázové rovnováze

a-ZnO; b-dřevo; c-tabákové listy

Když přesáhne vlhkost materiálu určitou hodnotu, bude se materiál chovat navenek jako čistá kapalina A, neboť je zcela pokryt vrstvou této kapaliny. To je v obr. 25.11 naznačeno na čáře *b*, kde v bodu B je právě dosaženo oné *kritické vlhkosti materiálu* X_{Ac} . Pro vlhkost $X_A \geq X_{Ac}$ je při rovnováze $\phi = 1$.

V tomto oddílu byl popsán entalpický diagram vlhkého vzduchu používaný při grafickém řešení úloh sušení. Byly vyloženy pojmy teplota adiabatického nasycení a teplota mokrého teploměru. Bylo ukázáno určení stavu vlhkého vzduchu v entalpickém diagramu. Graficky byla znázorněna závislost rovnovážné vlhkosti vzduchu nad rozličnými materiály na jejich vlhkosti. Byla uvedena definice koncentrace vlhkosti a relativní měrné entalpie sušeného materiálu.

25.3 Vsádkové sušení

V tomto oddílu bude vyložena bilance vlhkosti a entalpie pro vsádkové sušení a rovnice kinetiky sušení.

Při vsádkovém sušení v konvekčních sušárnách se obvykle nepřetržitě přivádí sušicí plyn se stálou teplotou a koncentrací vlhkosti, vsádka mokrého materiálu se postupně vysušuje a plyn se ovlhčuje a také ochlazuje, neboť dodává materiálu energii na odpařování vlhkosti. Plyn vystupující ze sušárny má vlhkost a teplotu závislou na čase, i když jeho vstupní vlastnosti se s časem nemění.

25.3.1 Bilance hmotnosti a entalpie při vsádkovém sušení

Symbolem $\dot{m}_{Aw}$ bude označen hmotnostní tok složky A ze sušeného materiálu do sušicího plynu. Bilance složky A v plynu je (viz obr. 25.12)

$$\dot{m}_B Y_{Ai} + \dot{m}_{Aw} = \dot{m}_B Y_{Ae}$$

neboli

$$\dot{m}_B (Y_{Ae} - Y_{Ai}) = \dot{m}_{Aw} \quad (25.3-1)$$

S rostoucí hodnotou hmotnostního toku plynu při konstantní hodnotě $\dot{m}_{Aw}$ bude klesat rozdíl mezi vstupní a výstupní vlhkostí plynu.

Pro adiabaticky pracující sušárnu bude bilance entalpie plynu

$$\dot{m}_B l_i + \dot{m}_{Aw} h_{Ag} = \dot{m}_B l_e + \dot{Q}_{gm}$$

nebo

$$\dot{m}_B(l_i - l_e) = \dot{Q}_{gm} - \dot{m}_{Aw} h_{Ag} \quad (25.3-2)$$

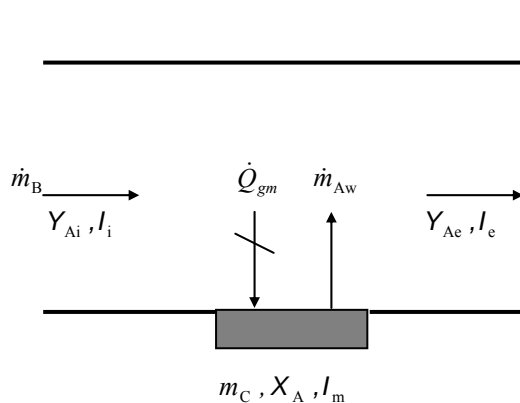
kde $\dot{Q}_{gm}$ je tepelný tok z plynu do sušeného materiálu a h_{Ag} je měrná entalpie páry odpařené složky A (součin $\dot{m}_{Aw} h_{Ag}$ představuje tok entalpie ze sušeného materiálu do sušícího plynu s odpařovanou vlhkostí).

Bilance vlhkosti materiálu pro neustálený děj je

$$0 = \dot{m}_{Aw} + \frac{dm_{As}}{d\tau} = \dot{m}_{Aw} + m_C \frac{dX_A}{d\tau} \quad (25.3-3)$$

kde m_C je hmotnost sušiny. Z rovnice plyne

$$\dot{m}_{Aw} = -m_C \frac{dX_A}{d\tau} \quad (25.3-4)$$



Pro adiabaticky pracující sušárnu je bilance entalpie mokrého materiálu

$$\dot{Q}_{gm} = \dot{m}_{Aw} h_{Ag} + m_C \frac{dl_m}{d\tau}$$

neboli podle rovn.(25.3-2)

$$m_C \frac{dl_m}{d\tau} = \dot{Q}_{gm} - \dot{m}_{Aw} h_{Ag} = \dot{m}_B(l_{Ae} - l_{Ai}) \quad (25.3-5)$$

Obr.25.12. Bilanční schéma vsádkového sušení

25.3.2. Kinetika adiabatického vsádkového sušení s konstantními parametry sušícího plynu

Rychlost sušení je definována intenzitou hmotnostního toku složky A z povrchu materiálu [viz rovn.(19.3-9)]

$$\phi_{Aw} \equiv \frac{d\dot{m}_{Aw}}{dA} \quad (25.3-6)$$

Definuje-li se *měrný povrch sušeného materiálu* vztahem

$$a_C \equiv \frac{dA}{dm_C} \quad (25.3-7)$$

lze rovnici (25.3-6) upravit na definici *měrné rychlosti sušení* $\phi_A a_C$ (má rozměr reciproky čas)

$$\phi_{Aw} a_C \equiv \frac{d\dot{m}_{Aw}}{dm_C} \quad (25.3-8)$$

Z rovn. (25.3-4), (25.3-6) a (25.3-8) plyne

$$-\frac{dX_A}{d\tau} = \frac{\dot{m}_{Aw}}{m_C} = \frac{1}{m_C} \int \phi_{Aw} dA = \frac{1}{m_C} \int \phi_{Aw} a_C dm_C \quad (25.3-9)$$

Za předpokladu, že se měrná rychlost sušení mění s časem ale nikoli s místem, obdrží se vztah

$$\boxed{\phi_{Aw} a_C = -\frac{dX_A}{d\tau}} \quad [\phi_{Aw} a_C = \phi_{Aw} a_C(\tau)] \quad (25.3-10)$$

Z této rovnice se vyjádří $d\tau$

$$d\tau = -\frac{dX_A}{\phi_A a_C} \quad (25.3-11)$$

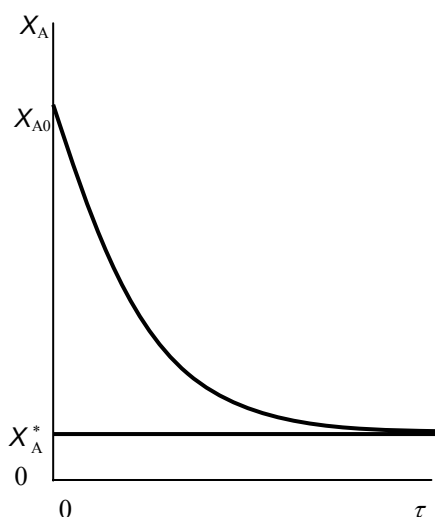
a integrací od počáteční hodnoty vlhkosti materiálu X_{A0} do konečné X_{Ak} se obdrží doba sušení

$$\boxed{\tau = \int_{X_{Ak}}^{X_{A0}} \frac{dX_A}{\phi_{Aw} a_C}} \quad (25.3-12)$$

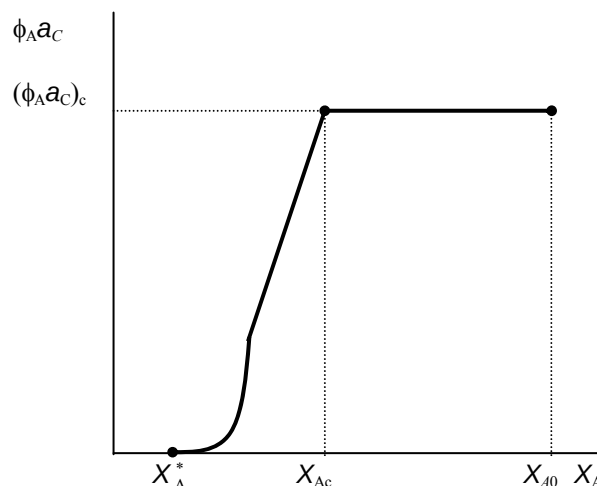
Hodnota měrné rychlosti sušení obsažené v integrálu závisí především na průtoku plynu, na teplotě, na struktuře sušeného materiálu a na koncentraci vlhkosti. Např. velmi horký sušící plyn může na povrchu materiálu vytvořit krustu bránící unikání vlhkosti.

Obecně je nutné stanovit hodnotu měrné rychlosti sušení pokusně. Za tím účelem je výhodné sušit materiál při podmínkách, kdy se vlastnosti plynu při průchodu sušárnou jen velmi málo mění. Zřejmě to bude tehdy, když bude tok sušícího plynu vzhledem k množství sušeného materiálu velký. Idealizací vzniká představa *sušení s konstantními hodnotami parametrů sušícího plynu*. Těmito parametry jsou průtok, vlhkost, teplota a tlak plynu.

Rychlost sušení se měří vážením sušeného materiálu v zadaných časových intervalech. Výsledky lze graficky znázornit po přepočtení na relativní zlomky. Obr. 25.13 je příkladem závislosti vlhkosti sušeného materiálu na čase při konstantních hodnotách parametrů sušícího plynu. S rostoucí dobou sušení se čára proložená naměřenými hodnotami blíží asymptoticky vlhkosti X_A^* materiálu, který je v rovnováze se sušícím plynem majícím hodnotu vlhkosti Y_A . Podle rovn. (25.3-10) vyjadřuje měrnou rychlost sušení záporně vzatá směrnice tečny ke křivce. Počáteční úsek čáry znázorněné na obrázku je lineární a to je vyjádření skutečnosti, že v tomto úseku je rychlost sušení konstantní.



Obr. 25.13. Závislost vlhkosti materiálu na době sušení



Obr. 25.14. Závislost $\phi_A a_C$ na X_A při konstantních parametrech sušícího plynu

Názorně to ukazuje *obr.25.14*, ve kterém je zakreslen jeden z možných tvarů závislosti měrné rychlosti sušení na vlhkosti materiálu. Lineárnímu poklesu koncentrace X_A s rostoucím časem τ zde přísluší čára konstantní hodnoty měrné rychlosti sušení. Oba obrázky ukazují, že tyto podmínky nastávají při velké vlhkosti materiálu. Pak má materiál nejen vyplněny všechny póry kapalinou, ale navíc je pokryt vrstvou odpařující se kapaliny. Z toho důvodu se sušící plyn vlastně stýká pouze s kapalinou a rychlost sušení se rovná rychlosti odpařování z volné hladiny kapaliny. Je nezávislá na vlastnostech sušeného materiálu, pokud je jeho rozpustnost mizivá.

Protože předpokládáme neměnné vlastnosti plynu, je situace obdobná jako při popisu činnosti mokrého teploměru. Kapalina na povrchu materiálu má konstantní teplotu rovnou teplotě mokrého teploměru. Této teplotě přísluší určitá hodnota rovnovážného tlaku páry p_A^o , ze které lze podle rovn. (25.2-3) spočítat vlhkost plynu na styku s hladinou kapaliny Y_{Aw} . Doba, po kterou sušený materiál zůstává pokryt kapalinou, se pak nazývá *období konstantní rychlosti sušení*.

Během období konstantní rychlosti sušení ji neovlivňuje transport vlhkosti uvnitř sušeného materiálu. Rychlost sušení je určena pouze rychlostí přestupu hmoty v sušícím plynu. Intenzita hmotnostního toku vlhkosti do sušícího plynu z mokrého materiálu se tedy vyjádří rovnicí přestupu hmoty, ve které se použije koeficientu přestupu hmoty k_Y , který je vztažen k hybné síle vyjádřené relativním hmotnostním zlomkem. V odborné literatuře jsou dostupné údaje o hodnotách koeficientu přestupu hmoty k_Y . Z nich se dá hodnota koeficientu k_Y určit podle vzorce (viz odd.22.4.1)

$$k_Y = M_B k_y \quad (25.3-13)$$

Při konstantních parametrech sušícího plynu je hodnota k_Y konstantní. Měrná rychlost sušení se запиše vztahem pro přestup hmoty z povrchu materiálu do sušícího plynu v období k rovn. (22.4-6) jako

$$\phi_{Aw} a_C = k_Y a_C (Y_{Aw} - Y_A) \quad (25.3-14)$$

Pro dobu sušení v adiabaticky pracující sušárně při konstantních parametrech sušícího plynu a konstantní hodnotě a_C plyne z rovn. (25.3-12) a (25.3-14)

$$\tau = \frac{X_{A0} - X_{Ak}}{\phi_{Aw} a_C} = \frac{X_{A0} - X_{Ak}}{k_Y a_C (Y_{Aw} - Y_A)} \quad [X_A \geq X_{Ac}] \quad (25.3-15)$$

Když vlhkost materiálu klesne pod hodnotu kritické vlhkosti materiálu X_{Ac}^* , rychlost sušení začíná klesat a záviset na vlhkosti sušeného materiálu a také na tom, o jaký materiál se jedná. Transport vlhkosti uvnitř materiálu se liší pro porézní a neporézní materiály. V neporézním materiálu se látka tvořící vlhkost dostává k povrchu pouze difuzí. Pro částice definovaného tvaru existují řešení difuzních rovnic, poskytující závislost koncentrace vlhkosti sušeného materiálu na místě a na času. V porézních materiálech závisí popis transportu na tvaru a velikosti pórů, na kapilárních silách a na stupni zaplnění pórů kapalinou (při podkritické vlhkosti se kapalina odpařuje v pórech).

Jakmile transport kapaliny z vnitřku na povrch materiálu nestačí nahrazovat odpařenou kapalinu, začne se plocha povrchu materiálu pokrytá vrstvou kapaliny zmenšovat. Protože se rychlost sušení vztahuje na celý povrch sušeného materiálu, bude její hodnota postupně klesat, i když rychlost odpařování vrstvy kapaliny zůstává stejná. Sušení tedy přechází do oblasti klesající rychlosti sušení. Jakmile se povrchová vrstva kapaliny odpaří úplně, je rychlost sušení ovlivněna převážně transportem vlhkosti z vnitřku na povrch materiálu. V oblasti klesající rychlosti sušení se tedy objevují dvě podoblasti, jedna příslušející zmenšování plochy povrchové vrstvy kapaliny a druhá příslušná transportu vlhkosti uvnitř sušeného materiálu. To je patrné z tvaru závislosti měrné rychlosti sušení $\phi_{Aw} a_C$ na vlhkosti materiálu X_A v *obr. 25.14*.

Z uvedených důvodů závisí rychlost sušení při hodnotách $X_A < X_{Ac}$ na tom, jaký materiál a za jakých podmínek se suší, a tvar této závislosti je obvykle nutné určit pokusně. Kdyby klesající rychlost sušení v *obr. 25.14* znázorňovala úsečka vymezená kritickou vlhkostí X_{Ac} a rovnovážnou vlhkostí X_A^* , platila by pro měrnou rychlost sušení rovnice

$$\phi_{Aw} a_C = k_Y a_C (Y_{Aw} - Y_A) \frac{X_A - X_A^*}{X_{Ac} - X_A^*} \quad (25.3-16)$$

Při kritické koncentraci vlhkosti je v rovnici zlomek obsahující rozdíly koncentrací vlhkosti materiálu rovný jedné, proto je toto vyjádření rychlosti sušení univerzální (při nadkritické vlhkosti je rychlost sušení konstantní).

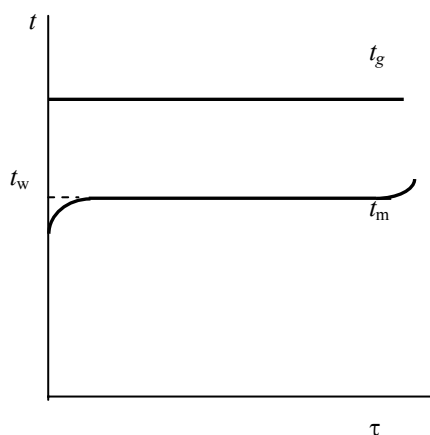
Doba sušení v adiabaticky pracující sušárně v rozmezí vlhkostí od X_{A0} do X_{Ak} v oblasti klesající rychlosti sušení při konstantních parametrech sušícího plynu plyne z rovn. (25.3-12) a (25.3-16)

$$\tau_k = \frac{X_{Ac} - X_A^*}{k_Y a_C (Y_{Aw} - Y_A)} \ln \frac{X_{A0} - X_A^*}{X_{Ak} - X_A^*} \quad [X_A \leq X_{Ac}] \quad (25.3-17)$$

Jestliže sušení začíná v oblasti konstantní rychlosti a končí v oblasti klesající rychlosti, obdrží se spojením rovn. (25.3-15) a (25.3-17) ve společné koncentraci $X_A = X_{Ac}$ rovnice

^{*)}Při nadkritické vlhkosti je doprava kapaliny z vnitřku materiálu na povrch tak rychlá, že stačí nahrazovat odpařenou kapalinu. Rychlost sušení je tedy určována rychlostí odpařování a nezávisí na vlastnostech materiálu. S klesající hodnotou koncentrace vlhkosti však její gradient a proto i rychlost transportu klesá. Hodnota koncentrace vlhkosti, při které se začne projevovat vliv rychlosti transportu kapaliny z vnitřku na povrch materiálu na rychlost sušení, se nazývá kritická vlhkost. Je zřejmé, že na ni má vliv délka dráhy a hybná síla transportu kapaliny. Kritická vlhkost závisí tedy nejen na vlastnostech materiálu, ale též na podmínkách sušení a zjišťuje se pokusně.

$$\tau_k = \frac{1}{k_Y a_C (Y_{Aw} - Y_A)} \left[X_{A0} - X_{Ac} + (X_{Ac} - X_A^*) \ln \frac{X_{Ac} - X_A^*}{X_{Ak} - X_A^*} \right] \quad (25.3-18)$$



Obr. 25.15. Závislost teploty na času ve vsádkové sušárně při konstantních parametrech plynu
 t_g -teplota plynu; t_m -teplota materiálu
entalpie a vyjádření kinetiky sušení.

Pokud pokles rychlosti sušení není lineární, je třeba znát její závislost na vlhkosti materiálu a řešit integrál v rovn. (25.3-12) numericky.

Na obr. 25.15 je znázorněna závislost teploty sušeného materiálu t_m na času. Doba sušení se může pohybovat od několika sekund až po několik hodin. Za předpokladu, že je původní vlhkost materiálu větší než kritická, bude mít materiál po zahřátí na teplotu sušení po určitou dobu teplotu mokrého teploměru t_w . Délka období sušení při teplotě t_w závisí na počáteční vlhkosti materiálu a na rychlosti sušení. Jakmile vlhkost materiálu klesne pod kritickou hodnotu, začíná teplota materiálu vzrůstat.

V tomto oddílu bylo popsáno vsádkové sušení materiálu při konstantních parametrech sušícího plynu na základě vyjádření rovnováhy, bilance hmotnosti a

25.4 Sušení v sušárně při nepřetržitém provozu

Obsahem oddílu je popis činnosti sušárny při ustáleném provozu a protiproudu materiálu a sušícího plynu. Skládá se opět z vyjádření rovnováhy, z bilance vlhkosti a entalpie a z vyjádření kinetiky sušení, zahrnující i uplatnění rovnice přestupu tepla. Vykládá se řešení bilancí na entalpickém diagramu vlhkého vzduchu a numerické řešení kinetiky sušení.

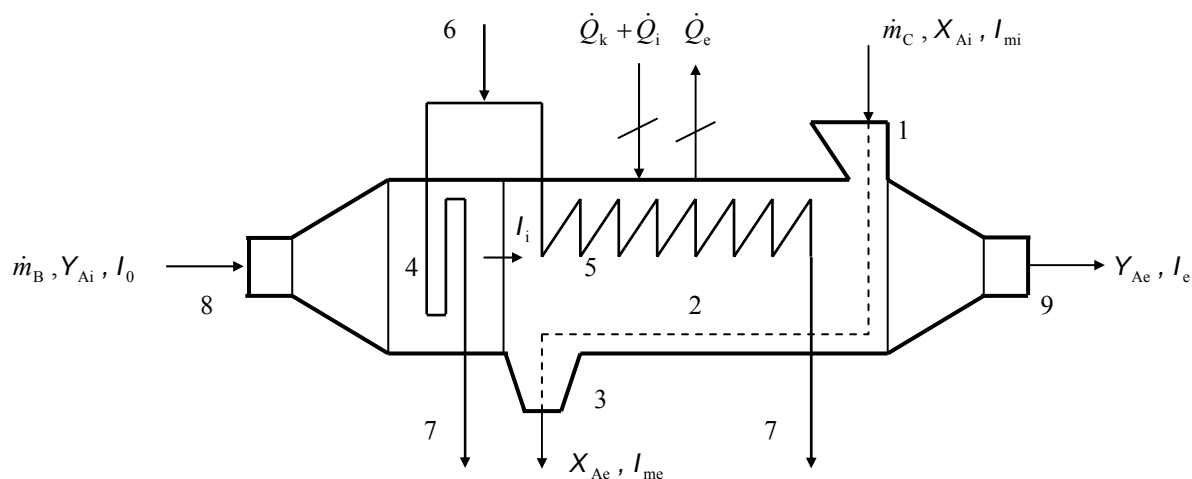
25.4.1 Bilance hmotnosti a entalpie při nepřetržitém sušení

Na obr. 25.16 je bilanční schéma konvekční sušárny s kaloriferem. Sušárna pracuje ustáleně při protiproudu sušeného materiálu a sušícího plynu. Bilance vlhkosti je

$$\dot{m}_B (Y_{Ae} - Y_{Ai}) = \dot{m}_C (X_{Ai} - X_{Ae}) = \dot{m}_A \quad (25.4-1)$$

Před vstupem do sušárny se sušící plyn ohřívá v kaloriferu. Bilance entalpie se napíše jednak pro kalorifer, jednak pro vlastní sušárnu. Hodnota Y_A se při průchodu kaloriferem nemění a bilance entalpie je

$$\dot{m}_B I_0 + \dot{Q}_k = \dot{m}_B I_i$$



Obr. 25.16. Schéma kontinuálně pracující sušárny s kaloriferem při protiproudu materiálu a plynu

1-násypka (vstup mokrého materiálu); 2-sušicí komora; 3-výpust (výstup vysušeného materiálu); 4-kalorifer; 5-vyhřívání sušárny; 6-přívod topné páry; 7-odvod kondenzátu; 8-přívod vzduchu; 9-odvod vzduchu

Z toho se vyjádří změna relativní měrné entalpie plynu procházejícího kaloriferem z původní hodnoty l_0 na hodnotu l_i na výstupu z kaloriferu, tj. před vstupem do sušárny

$$l_i - l_0 = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{m}_B} \quad (25.4-2)$$

Veličina $\dot{Q}_k$ je tepelný příkon kaloriferu. Pro vlastní sušárnu je bilance entalpie

$$\dot{m}_B(l_e - l_i) = \dot{m}_C(l_{mi} - l_{me}) + \dot{Q}_i - \dot{Q}_e \quad (25.4-3)$$

Zde značí $\dot{Q}_i$ případný dodatečný tepelný příkon do sušárny a $\dot{Q}_e$ odtok energie (ztráty) nedokonalou tepelnou izolací a ohříváním materiálu a transportního zařízení po vstupu do sušárny.

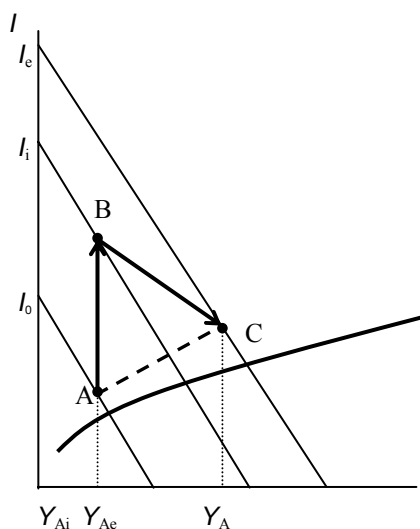
Bilance hmotnosti a entalpie umožňují dospět ze známých parametrů plynu vstupujícího do sušárny k jeho parametrům na výstupu ze sušárny. Dělením bilance entalpie bilancí vlhkosti vznikne po úpravě vztah používaný při grafickém řešení

$$\frac{l_e - l_i}{Y_{Ae} - Y_{Ai}} = \frac{l_{mi} - l_{me}}{X_{Ai} - X_{Ae}} + \frac{\dot{Q}_i - \dot{Q}_e}{\dot{m}_A} \quad (25.4-4)$$

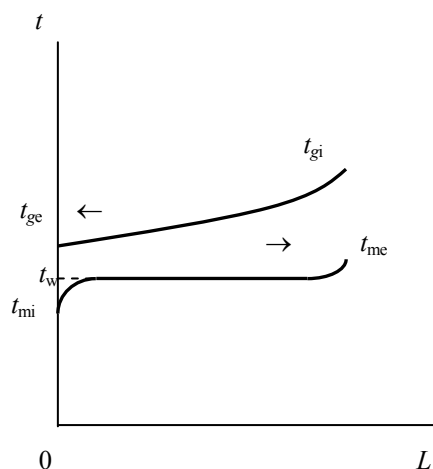
Obdobně je bilance entalpie pro celé zařízení

$$\frac{l_e - l_0}{Y_{Ae} - Y_{Ai}} = \frac{l_{mi} - l_{me}}{X_{Ai} - X_{Ae}} + \frac{\dot{Q}_k + \dot{Q}_i - \dot{Q}_e}{\dot{m}_B(Y_{Ae} - Y_{Ai})} = \frac{l_{mi} - l_{me}}{X_{Ai} - X_{Ae}} + \gamma \frac{l_i - l_0}{Y_{Ae} - Y_{Ai}} \quad (25.4-5)$$

kde veličina γ charakterizuje tepelný režim sušárny^{*)}. Rovnice (25.4-5) vyjadřuje směrnici úsečky $\overline{AC}$ v obr. 25.17 (vyznačeno čárkovaně).



Obr. 25.17. Grafický výpočet kontinuální sušárny v entalpickém diagramu



Obr.25.18. Závislost teploty na vzdálenosti v kontinuální sušárně při protiproudu

Grafické řešení úloh kontinuálního sušení se dá znázornit na entalpickém diagramu. Úsečka $\overline{AB}$ na obr. 25.17 představuje energii dodávanou v kaloriferu jednotkovému množství suchého plynu, tj. podle rovn.(25.4-2) rozdíl relativních měrných entalpií vzduchu vstupujícího do sušárny a vzduchu přiváděného do kaloriferu. Úsečka $\overline{BC}$ představuje změnu stavu sušícího plynu při průchodu sušárnou. Její směrnici vyjadřuje rovn. (25.4-4). Stav vzduchu v entalpickém diagramu je určen dvěma parametry vlhkého plynu (jak vyplývá z Gibbsova fázového pravidla pro jednofázový systém se dvěma složkami při konstantním tlaku). Směrnice přímky z bodu B a jeden parametr umožní určit bod C, charakterizující vlastnosti plynu vystupujícího ze sušárny. Při numerickém řešení se entalpie rozepisují pomocí teploty.

Kdyby byly oba členy na pravé straně rovn. (25.4-4) stejně velké, ale měly by navzájem opačné znaménko, platilo by

$$\boxed{I_e = I_i} \quad (25.4-6)$$

Tato rovnice definuje tzv. *ideální sušárnu* (izoentalpická sušárna). Pokles entalpie vlhkého vzduchu v takové sušárně vlivem ochlazování se vyrovnává přírůstkem entalpie vlivem přírůstkem vlhkosti plynu. V tomto případě leží bod C na izoentalpě I_i a k určení stavu vzduchu na výstupu ze sušárny postačí zadat hodnotu jediného dalšího parametru. Z rovn. (25.4-5) dále vyplývá, že součet tří členů na pravé straně rovn. (25.4-3) je pro ideální sušárnu nulový.

Na obr. 25.18 je nakreslen tvar závislosti teploty sušeného materiálu t_m a sušícího plynu t_g na vzdálenosti L podél sušárny pracující nepřetržitě při protiproudu. Teplota materiálu závisí na

^{*)}Pro veličinu γ platí

$$\gamma \equiv \frac{\dot{Q}_k + \dot{Q}_i - \dot{Q}_e}{\dot{Q}_k}$$

vzdálenosti obdobně, jako závisela ve vsádkové sušárně na čase. Teplota plynu po výstupu z kaloriferu se nejprve rychle mění a současně klesá rozdíl teplot mezi plynem a materiálem. Toto snižování rozdílu se postupně zmírňuje ve směru k výstupu plynu a vstupu materiálu.

K popisu sušení se zavádí *měrná spotřeba sušícího plynu, l* , vztahem

$$l \equiv \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_A} = \frac{1}{Y_{Ae} - Y_{Ai}} \quad (25.4-7)$$

plynucím z rovn. (25.4-1), a *měrný výsledný tepelný příkon q*

$$q \equiv \frac{\dot{Q}_k + \dot{Q}_i - \dot{Q}_e}{\dot{m}_A} \quad (25.4-8)$$

Pak z rovn. (25.4-6) plyne

$$l(l_e - l_0) = \frac{\dot{m}_C}{\dot{m}_A}(l_{mi} - l_{me}) + q = \frac{l\dot{m}_C}{\dot{m}_B}(l_{mi} - l_{me}) + q \quad (25.4-9)$$

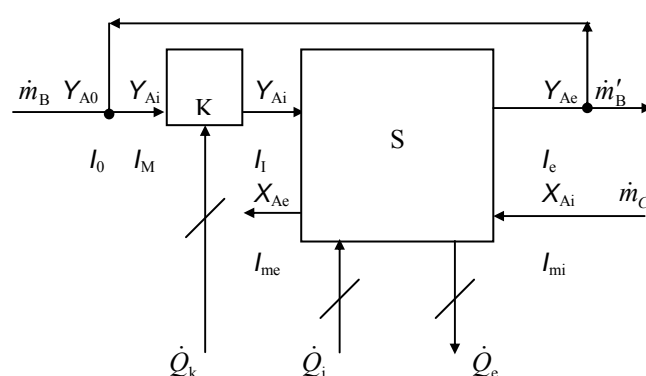
nebo též

$$l_e - l_0 = \frac{\dot{m}_C}{\dot{m}_B}(l_{mi} - l_{me}) + q / l \quad (25.4-9a)$$

25.4.1.1 Sušení s oběhem sušícího plynu

Jako příklad rozličných obměn sušení používaných v praxi je sušení v sušárně při protiproudu s částečným oběhem vzduchu. Příslušné bilanční schéma znázorňuje *obr. 25.19*. Označíme poměr množství suchého plynu $\dot{m}'_B$ v obíhajícím vlhkém plynu k množství suchého plynu $\dot{m}_B$ v přiváděném plynu symbolem R

$$R = \dot{m}'_B / \dot{m}_B$$



Obr. 25.19. Bilanční schéma kontinuální sušárny s oběhem při protiproudu materiálu a plynu

Bilance vlhkosti pro směšovací uzel před vstupem do kaloriferu

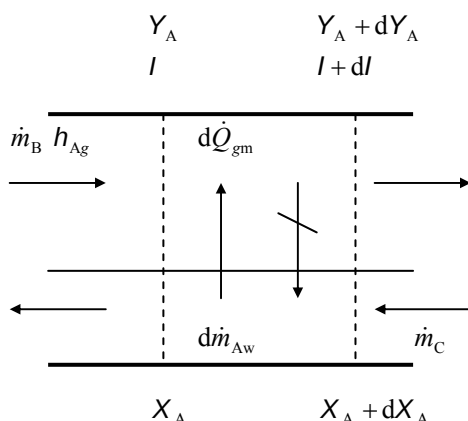
$$\dot{m}_B Y_{A0} + \dot{m}'_B Y_{Ae} = (\dot{m}_B + \dot{m}'_B) Y_{Ai}$$

je po úpravě

$$dm_C = \frac{d\dot{m}_{Aw}}{\phi_{Aw} a_C}$$

jejíž integrál je

$$m_C = \int_0^{\dot{m}_A} \frac{d\dot{m}_{Aw}}{\phi_{Aw} a_C} = \dot{m}_C \int_{X_{Ae}}^{X_{Ai}} \frac{dX_A}{\phi_{Aw} a_C} = \dot{m}_B \int_{Y_{Ai}}^{Y_{Ae}} \frac{dY_A}{\phi_{Aw} a_C} \quad (25.4-12)$$



Pokud v sušárně platí $X_A \geq X_{Ac}$, můžeme rychlost sušení vyjádřit podle rovn. (25.3-14)

$$\phi_A a_C = k_Y a_C (Y_{Aw} - Y_A) \quad (25.4-13)$$

a při konstantní hodnotě a_C a k_Y rovnice (25.4-12) přejde na tvar

$$m_C = \frac{A}{a_C} = \bar{\tau} \dot{m}_C = \frac{\dot{m}_B}{k_Y a_C} \int_{Y_{Ai}}^{Y_{Ae}} \frac{dY_A}{Y_{Aw} - Y_A} \quad (25.4-14)$$

Obr. 25.21. Bilanční schéma diferenciálního úseku kontinuálně pracující sušárny při protiproudu

ve které je $\bar{\tau}$ střední doba prodloužení sušiny v sušárně. Při podkritické vlhkosti materiálu je obecně nutné závislost měrné rychlosti na podmínkách sušení určit pokusně.

Integrace je jednoduchá při adiabatickém sušení a nadkritické vlhkosti materiálu. Ten se pak chová jako kapalina. Při adiabatickém sušení se vzduch adiabaticky zvlhčuje a teplota povrchu materiálu je teplotou adiabatického vlhčení (teplotou mokrého teploměru) vzduchu vstupujícího do sušárny. Má-li i výstupní materiál nadkritickou vlhkost, má jeho povrch v celé sušárně stejnou teplotu. Proto je konstantní také hodnota Y_{Aw} a z rovn. (25.4-14) dostáváme vyjádření počtu převodových jednotek přestupu hmoty n_Y

$$n_Y = \frac{k_Y A}{\dot{m}_B} = \frac{k_Y a_C m_C}{\dot{m}_B} = \frac{k_Y a_C \bar{\tau}}{\dot{m}_B / \dot{m}_C} = \ln \frac{Y_{Aw} - Y_{Ai}}{Y_{Aw} - Y_{Ae}} \quad (25.4-15)$$

Kinetika sušení v nadkritické oblasti vlhkosti materiálu se dá popsat i rovnicí rychlosti tepelného přestupu. Pro diferenciální úsek kontinuálně pracující adiabatické sušárny (viz obr. 25.21) je bilance vlhkosti plynu rovnice (25.4-11a) a bilance entalpie plynu je

$$\dot{m}_B l + h_{Ag} d\dot{m}_{Aw} = \dot{m}_B (l + dl) + d\dot{Q}_{gm} \quad (25.4-16)$$

Zároveň platí rovnice tepelného přestupu

$$d\dot{Q}_{gm} = \alpha (t - t_w) dA \quad (25.4-17)$$

Z definice relativní měrné entalpie vlhkého vzduchu a vyjádření střední měrné tepelné kapacity vlhkého vzduchu při konstantním tlaku (25.2-7), plyne z rovnic (25.4-16) a (25.4-17) po úpravě

$$d\dot{Q}_{gm} = \alpha(t - t_w)dA = -\dot{m}_B \langle C_p \rangle dt \quad (25.4-18)$$

a proto:

$$\int_A \frac{\alpha}{\dot{m}_B \langle C_p \rangle} dA = - \int_{t_{gi}}^{t_{ge}} \frac{dt}{t - t_w} \quad (25.4-19)$$

Povrch materiálu je pokryt vrstvou odpařující se kapaliny, proto má teplotu mokrého teploměru t_w , která je konstantní. Při konstantní hodnotě α je

$$A = \frac{\dot{m}_B \langle C_p \rangle}{\alpha} \ln \frac{t_{gi} - t_w}{t_{ge} - t_w} \quad (25.4-20)$$

kde

$$\langle C_p \rangle \equiv \langle Y_A \rangle \langle C_{pAg} \rangle + \langle C_{pB} \rangle \quad (25.4-21)$$

To je alternativní možnost výpočtu sušárny, a to pomocí teplot, což může být výhodné.

Sušení se urychlí, když se vzduch při průchodu sušárnou přehřívá. Pak se teplota povrchu materiálu a hodnota Y_{Aw} podél sušárny mění a integrál v rovn. (25.4-14) se řeší numericky. Postup výpočtu pro sušení při udržování konstantní teploty vzduchu je

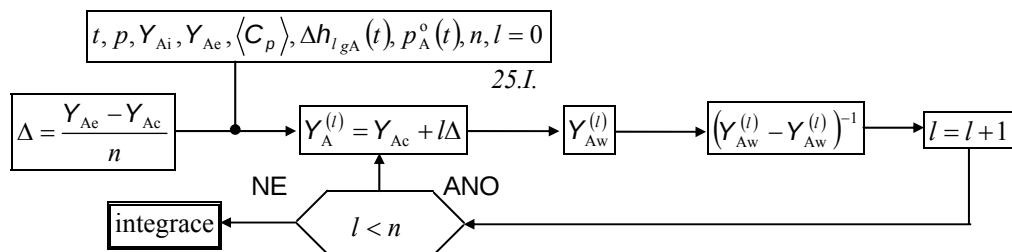
- 1) interval $\langle Y_{Ai}, Y_{Ae} \rangle$ se rozdělí na zvolený počet intervalů;
- 2) ke každé ze souboru hodnot Y_A se určí příslušná hodnota Y_{Aw} iterací z rovnice mokrého teploměru (25.2-19)
 - a) odhadne se hodnota Y_{Aw} příslušná ke zvolené hodnotě Y_A ;
 - b) z rovn. (25.2-3) se po dosazení odhadu Y_{Aw} vypočte hodnota p_A^0 ($\phi_w = 1$) a z ní se z *Tabulek* či např. z Antoineovy rovnice pro rovnovážný tlak vodní páry zjistí odhad teploty povrchu materiálu t_w ;
 - c) z *Tabulek* nebo z rovnice uvedené v poznámce za rovn. (25.2-6) se určí hodnota Δh_{lgAw} , z definice (25.2-7) se spočte hodnota $\langle C_p \rangle$ a z rovnice mokrého teploměru se zjistí nový odhad hodnoty Y_{Aw} ;
 - d) je-li rozdíl mezi touto hodnotou a předešlým odhadem větší než je přípustná odchylka, opakuje se výpočet od bodu b) s vypočteným odhadem hodnoty Y_{Aw} v bodu c);
- 3) dosadí se do vyjádření integrandu $1 / (Y_{Aw} - Y_A)$;
- 4) jakmile jsou vypočteny všechny potřebné hodnoty integrandů, řeší se integrál některou z numerických metod.

Algoritmus výpočtu je v *obr.25.II*.

Při sušení materiálu s vlhkostí menší než kritickou ($X_A < X_{Ac}$) závisí rychlost sušení na vlastnostech materiálu. Integrál v rovn. (25.4-12) lze řešit numericky, když se za měrnou rychlost sušení dosadí její závislost na vlhkosti zjištěná z pokusů.

Pokud je pokles rychlosti sušení lineární, vyjádří se vzorcem (25.3-16) uvedeným v předešlém oddílu pro měrnou rychlost sušení

$$\phi_{Aw} a_C = k_Y a_C (Y_{Aw} - Y_A) \frac{X_A - X_A^*}{X_{Ac} - X_A^*} \quad (25.3-16)$$



Obr.25.II. Algoritmus výpočtu při konstantní rychlosti sušení a $t_g = \text{konst}$

Při konstantní hodnotě $k_Y a_C$ plyne pro střední dobu prodloužení materiálu v sušárně:

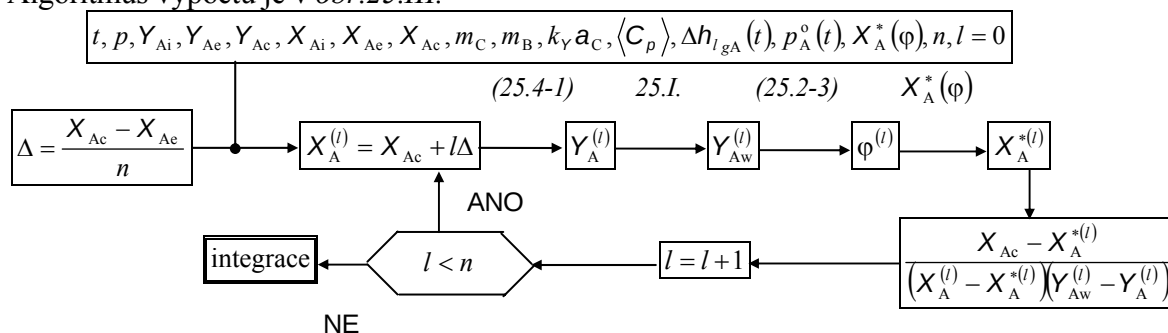
$$\bar{\tau} = \frac{1}{k_Y a_C} \int_{X_{Ac}}^{X_{Ai}} \frac{(X_{Ac} - X_A^*) dX_A}{(X_A - X_A^*)(Y_{Aw} - Y_A)} \quad (25.4-21)$$

Integrál se řeší numericky.

Postup při konstantní teplotě vzduchu v sušárně

- 1) interval $\langle X_{Ai}, X_{Ac} \rangle$ se rozdělí na zvolený počet intervalů;
- 2) pro každou hodnotu X_A z tohoto souboru se vypočte z období bilance (25.4-1) pro jeden z průřezů uvnitř sušárny hodnota Y_A v témž průřezu;
- 3) z hodnoty Y_A se postupem uvedeným při řešení rovn. (25.4-14) při nadkritické vlhkosti pro konstantní teplotu vzduchu určí příslušná hodnota Y_{Aw} ;
- 4) z vyjádření fázové rovnováhy se pro hodnotu Y_A určí hodnota X_A^* ;
- 5) vypočte se hodnota integrandu a celý postup se opakuje pro další hodnotu X_A ;
- 6) po vyčíslení celého souboru integrandů se numericky vyřeší hodnota integrálu.

Algoritmus výpočtu je v obr.25.III.



Obr.25.III. Algoritmus výpočtu při klesající rychlosti sušení a $t_g = \text{konst}$

Pokud teplota vzduchu není konstantní, je třeba do výpočtu zahrnout bilanci entalpie.

V tomto oddílu bylo popsáno kontinuální sušení na základě fázové rovnováhy, bilance hmotnosti a entalpie a experimentálních údajů o kinetice sušení. Veškeré výpočty předpokládají konstantní tlak v celé sušárně.

Tab.25.1 Přehled základních rovnic v sušení

BILANCE	ROVNOVÁHA, KINETIKA A J.
Vsádkové sušení $\dot{m}_B Y_{Ai} + \dot{m}_{Aw} = \dot{m}_B Y_{Ae}$ (25.3-1)	Rovnováha Empirické vyjádření rovnovážného tlaku par nad vlhkým materiálem

$0 = \dot{m}_{Aw} + m_C \frac{dX_A}{d\tau} \quad (25.3-3)$ Adiabatická sušárna $\dot{m}_B l_i + \dot{m}_{Aw} h_{Ag} = \dot{m}_B l_e + \dot{Q}_{gm} \quad (25.3-2)$ $\dot{Q}_{gm} = \dot{m}_{Aw} h_{Ag} + m_C \frac{dl_m}{d\tau} \quad (25.3-5)$	Teplota mokrého teploměru $t - t_w = \frac{\Delta h_{lg Aw} k_Y}{\alpha} (Y_{Aw} - Y_A) \quad (25.2-16)$ Kinetika sušení $\tau = \int_{X_{Ak}}^{X_{A0}} \frac{dX_A}{\phi_{Aw} a_C} \quad [\phi_{Aw} a_C = \phi_{Aw} a_C(\tau)] \quad (25.3-12)$ Konstantní parametry sušení $\phi_{Aw} a_C = k_Y a_C (Y_{Aw} - Y_A) \quad (25.3-14)$ $\tau = \frac{X_{A0} - X_{Ak}}{k_Y a_C (Y_{Aw} - Y_A)} \quad [X_A \geq X_{Ac}] \quad (25.3-15)$
Sušení při ustáleném stavu $\dot{m}_B (Y_{Ae} - Y_{Ai}) = \dot{m}_C (X_{Ai} - X_{Ae}) = \dot{m}_A \quad (25.4-1)$ $\dot{m}_B (l_e - l_i) = \dot{m}_C (l_{mi} - l_{me}) + \dot{Q}_i - \dot{Q}_e \quad (25.4-3)$ $\dot{m}_B l_0 + \dot{Q}_k = \dot{m}_B l_i \quad (25.4-2)$	Kinetika kontinuálního sušení $m_C = \int_0^{\dot{m}_A} \frac{d\dot{m}_{Aw}}{\phi_{Aw} a_C} = \dot{m}_C \int_{X_{Ac}}^{X_{Ai}} \frac{dX_A}{\phi_{Aw} a_C} = \dot{m}_B \int_{Y_{Ai}}^{Y_{Ae}} \frac{dY_A}{\phi_{Aw} a_C} \quad (25.4-12)$ $m_C = \bar{\tau} \dot{m}_C = \frac{\dot{m}_B}{k_Y a_C} \int_{Y_{Ai}}^{Y_{Ae}} \frac{dY_A}{Y_{Aw} - Y_A} \quad [X_A \geq X_{Ac}] \quad (25.4-14)$

Tato kapitola obsahuje soubor vlastností vzduchu a vodní páry potřebných k výpočtu sušáren a popis procesu probíhajícího v sušárnách vsádkových a kontinuálních.

KONTROLNÍ ÚLOHY

- 25.1. Na čem závisí teplota adiabatického nasycení vlhkého vzduchu?
- 25.2. Na jakém předpokladu je založen vzorec pro teplotu mokrého teploměru? Jaké znáte uplatnění tohoto údaje?
- 25.3. Jak byly získány hodnoty konstant v rovnici závislosti měrné výparné entalpie vody na teplotě [viz pozn. pod čarou za rovnicí (25.2-6)]?
- 25.4. Jak je v mokrému materiálu vázána kapalina na materiál?
- 25.5. Proč se při popisu sušení používá relativních hmotnostních zlomků?
- 25.6. Jaký je fyzikální smysl pojmu kritická vlhkost materiálu?
- 25.7. Podle jakého vzorce se počítá hodnota relativní měrné entalpie mokrého materiálu?
- 25.8. O které parametry se jedná při sušení s konstantními parametry sušícího plynu?
- 25.9. Jaký je vztah mezi koeficienty přestupu hmoty k_Y a k_Y ?
- 25.11. Za jakých okolností nezávisí rychlost sušení na vlastnostech sušeného materiálu?
- 25.13. Jak se znázorní v entalpickém diagramu vlhkého vzduchu sušení v kontinuálně pracující sušárně?
- 25.14. Co charakterizuje ideální sušárnu?
- 25.15. Jaké výhody a jaké nevýhody má recirkulace sušícího plynu?
- 25.16. Z jakých údajů se určují potřebné rozměry kontinuálně pracující sušárny?
- 25.17. Proč se dá kinetika sušení popsat z vyjádření přestupu hmoty i přestupu tepla?
- 25.18. Jak se mění teplota materiálu při vsádkovém sušení v závislosti na čase?
- 25.19. Jak se z rovn. (25.4-15) určí potřebná délka sušárny?
- 25.20. Které vlastnosti sušeného materiálu ovlivňují rychlost sušení?
- 25.21. Odvoďte rovnici (25.4-18).
- 25.24. Odvoďte vztah mezi hodnotou relativní měrné entalpie vlhkého vzduchu při dané teplotě a vlhkosti a její hodnotou při vlhkosti a teplotě adiabatického nasycení. Vyjádřete směrnici izoterm adiabatického nasycení v entalpickém diagramu vlhkého vzduchu, kde je

- referenční stav entalpií při 0 °C, voda v kapalném a vzduch v plynném skupenství.
- 25.25.** Je možné, aby byl při sušení odpor proti přestupu hmoty v plynu nulový?
- 25.26.** Odkud pocházejí podklady pro návrh sušáren pracujících při složitějších podmínkách?
- 25.27.** Lze použít rovnice (25.3-17) k popisu sušení v nepřetržitě pracující sušárně?