

Kinetika procesu hvozdění sladu

ZDENĚK ŠAUER, JAN VOBORSKÝ, Výzkumný ústav pivovarský a sladařský, Praha

663.43

Dosavadní hvozdění sladu většinou ještě na zařízeních, pracujících v pravidelných cyklech a využívajících přirozeného tahu sušicího prostředku, vycházelo z poloempirických vztahů a závislostí a bylo podloženo pouze statickým tepelně technickým výpočtem.

Tento postup zanedbává další, pro sládky i konstruktéry neméně důležité hledisko technologické, neboť pro jeho určení, tj. stanovení sušicí křivky, nebyly známy potřebné podklady. Lze říci, že dlouholeté praktické zkušenosti s hvozděním sladu na dvou- či třílískových hvozdech částečně tento nedostatek nahradily.

Převedení periodického sušicího procesu na nepřetržitý, které znamená současně i změnu dosavadní technologie, vylučuje možnost řídit se zkušenostmi nabytými při současném způsobu hvozdění. Je proto s řešením kontinuálního postupu hvozdění nutně spojen požadavek uplatnění nových poznatků teorie sušení.

Stav, vyplývající z nedostatečného statického posuzování hvozdu, dal podnět mnoha autorům, z nichž je třeba v první řadě uvést *Hubera* [1], *Schlenka* [2] a později *Rothmeiera* [3], k hlubšímu zkoumání tepelně technické problematiky hvozdění. Výsledky těchto prací jsou však nejednotné, nespolehlivé a

nenaly proto uplatnění. Teprve práce leningradského vědce V. I. Popova [4], založené na nových poznatcích teorie sušení, daly správný směr postupu řešení a postavily jej na pevné vědecké základy. Avšak pro značné těžkosti, spojené se stanovením hygroskopické rovnováhy zeleného sladu, která se ustavuje neobyčejně dlouho, zvláště při vysoké relativní vlhkosti a nízké teplotě vzduchu, nepodařilo se zatím sestavit průběh sorpčních isotherm charakterizujících v plném rozsahu hvozdící proces.

Teoretické základy sušení — odvození součinitele sušení pro konstantní podmínky procesu

Z experimentálních sušících pokusů lze sestavit sušicí křivku, která představuje časový průběh střední vlhkosti materiálu

$$u = f(\tau), \quad (1)$$

kde je u absolutní vlhkost;

τ — jednotka času.

Sušicí křivky umožňují stanovit v každém časovém okamžiku rychlost sušení N

$$N = - \frac{du}{d\tau}, \quad (2)$$

což je směrnice tečny k sušicí křivce v uvažovaném bodě. Typická křivka rychlosti sušení hygroskopických materiálů v závislosti na vlhkosti je znázorněna na obr. 1. Plně vytažená křivka rozděluje průběh sušení na úsek stálé rychlosti sušení a úsek klesající rychlosti sušení.

Úsek stálé rychlosti sušení je zakončen bodem první kritické vlhkosti u_{k1} , kterého je dosaženo, když intenzita toku vlhkosti z vnitřku na povrch již nedostačuje intenzitě odpařování.

Úsek klesající rychlosti sušení lze rozdělit na 2 části. První končí v bodě druhé kritické vlhkosti u_{k2} , kterého je dosaženo, jestliže i na nejvlhčím místě uvnitř materiálu poklesl obsah vlhkosti pod hygroskopickou vlhkost. Druhá část křivky v úseku klesající rychlosti sušení končí v bodě rovnovážné vlhkosti u_R , kde rychlost sušení $N = 0$.

Úsek klesající rychlosti sušení lze s určitou nepřesností nahradit přímkou (na obr. 1 čárkovaně) s tzv. náhradním bodem kritické vlhkosti u_{kN}

Vyjádří-li se úsek klesající rychlosti sušení N_{II} rovnicí přímky, lze psát

$$N_{II} = - \frac{du}{d\tau} = \frac{N_I}{u_{kN} - u_R} (u - u_R) = K (u - u_R) \quad (3)$$

integrací v mezích od $u = u_1$ do $u = u_2$

$$\int_{u_1}^{u_2} \frac{du}{u - u_R} = - \int K d\tau \quad (4)$$

lze dospět po úpravě k rovnici

$$\frac{u_1 - u_R}{u_2 - u_R} = e^{K\tau} \quad (5)$$

ve které u_1 je vlhkost sladu na počátku sledovaného úseku, u_2 vlhkost sladu dosažená po čase τ a K koeficient sušení.

Koeficient sušení je definován rovnicí (3)

$$K = \frac{N_I}{u_{kN} - u_R}$$

a představuje směrnici přímky označenou na obr. 1 čárkovaně.

Z rovnice (5) je

$$K = \frac{2,3 [\log (u_1 - u_R) - \log (u_2 - u_R)]}{\tau} \quad (6)$$

kde $\tau = \tau_2 - \tau_1$

Rovnice (6) ukazuje na možnost grafického určení K . Vyneseli-li se do pravouhlých souřadnic $\log (u - u_R)$ v závislosti na τ , dostane se přímka, jejíž směrnice je hledaný koeficient — součinitel sušení K .

Stanoví-li se tedy K za určitých podmínek a je-li známa za těchto podmínek rovnovážná vlhkost sladu, lze z rovnice (5) vypočítat potřebnou dobu sušení nebo je-li stanovena sušicí doba, je možno vypočítat vlhkost u_2 dosaženou za tu dobu.

Poněvadž bylo experimentálně zjištěno, že sušení zeleného sladu probíhá převážně v úseku klesající vlhkosti sušení, může se naznačené teorie použít k zjištění hodnot K za různých podmínek připadajících prakticky v úvahu.

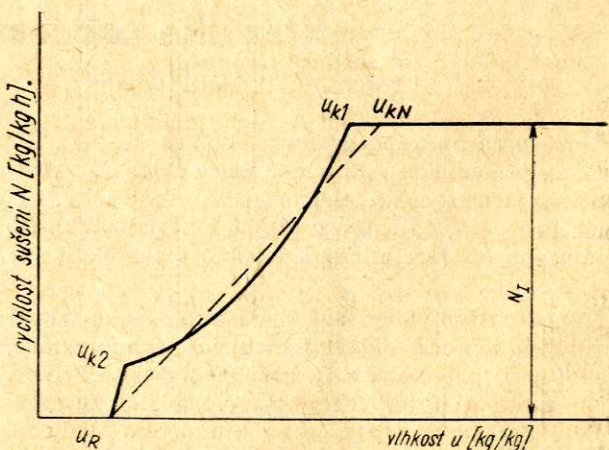
Stanovení součinitele sušení

Rychlost sušení zeleného sladu, a tím i součinitel sušení je u teplovzdušných sušáren v podstatě závislý na 4 faktorech, které lze snadno pokusně ověřit:

- a) teplotě vstupujícího vzduchu,
- b) vlhkosti vstupujícího vzduchu,
- c) rychlosti proudění vzduchu,
- d) zatížení sušicí plochy (nejlépe kg sušiny/m²).

Součinitel sušení je obecnou charakteristickou hodnotou pro průběh procesu za konstantních podmínek. Zahrnuje všechny změny při sušení z hlediska rychlosti sušení. Vzhledem k specifickým proměnlivým vnějším podmínkám, za kterých probíhá hvozdění zeleného sladu, je třeba určit K dvojím způsobem:

1. Za konstantních podmínek v celém rozsahu sušení.



Obr. 1. Křivka rychlosti sušení hygroskopických materiálů

2. Za proměnlivých vnějších podmínek, odpovídajících technologicky požadovanému řádu (proces se rozdělí na několik úseků s konstantními podmínkami).

Vliv tepelné hodnoty vzduchu byl sledován na základních pokusech při stabilním zatížení sušicí plochy a stejném proudění vzduchu.

Z uvedené teorie kinetiky sušicího procesu vyplývá, že součinitel sušení v úseku klesající rychlosti sušení ve sledovaných podmínkách má konstantní hodnotu, a to až do bodu druhé kritické vlhkosti u_{k2} ; od tohoto bodu se změní a je zpravidla vyšší.

Body druhé kritické vlhkosti byly určeny jednak z průběhu křivek rychlosti sušení provedených sušících pokusů, jednak grafickým určením, vycházejícím z rovnice (6). Podle tohoto vztahu je součinitel sušení, vynes-li se v pravouhlých souřadnicích na osu ordinát $\log(u - u_R)$ a na osu abscis čas τ , vyjádřen směrnici přímky. Hledaný bod druhé kritické vlhkosti se nachází na lomu vynesené přímky.

Součinitel sušení byl vypočten jako aritmetický průměr z dílčích intervalů sušicího procesu, většinou 30 minutových a to tak, že od počátku sušení až k bodu druhé kritické vlhkosti byl vypočítán první — vyšší součinitel sušení a od tohoto bodu druhý — nižší součinitel sušení. Z vypočtených hodnot byly sestaveny křivky součinitele sušení v závislosti na teplotě a vlhkosti proudícího vzduchu pro $u > u_{k2}$ a pro $u < u_{k2}$.

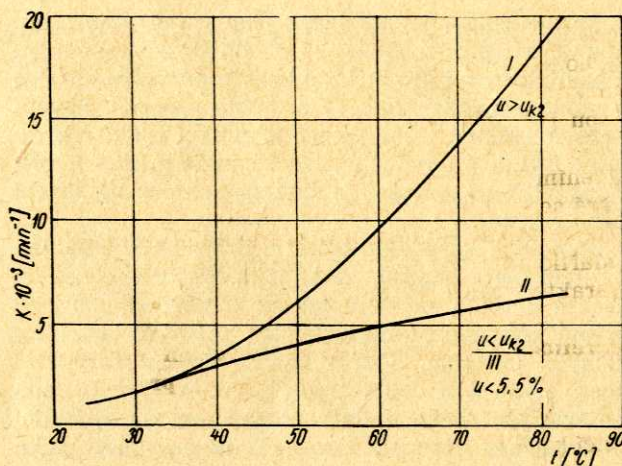
Z pokusů vyplynulo, že ze sledovaných vlivů má větší význam teplota vzduchu než jeho vlhkost, která se uplatňuje jen na počátku sušení při nižších teplotách.

Vliv zbývajících 2 faktorů na K , tj. proudění vzduchu w a měrného zatížení G_s , byl sledován při teplotě 60° a relativní vlhkosti 10 %, tedy hodnot pohyblivých se v okolí středu používaného sušicího řádu. Předpoklad, že průběh součinitele sušení v závislosti na w a G_s bude shodný pro jinou tepelnou hodnotu vzduchu přicházející v úvahu při hvozdění, byl do určité míry potvrzen několika sušícími pokusy, při nichž bylo použito konstantních teplot ($31,5, 35,0, 65,0$ a $75,0^\circ\text{C}$), různého měrného zatížení a různého proudění vzduchu.

Pro eliminaci vlivu uvedených činitelů byly zavedeny korekční hodnoty, a to pro změnu proudění $w = 0,1 \div 0,5$ m/s odpovídá korekční rozsah hodnot $a_w = 0,38 \div 1,30$, pro změnu měrného zatížení $G_s = 10 \div 100$ kg/m² hodnotě $b_{G_s} = 1,50 \div 0,42$. Korekční hodnoty jsou poměrná čísla, vyjadřující poměr součinitele sušení při určitém proudění či zatížení k součiniteli sušení, získaného za podmínek pokusu uvedených v diagramu součinitele sušení.

Protože sušící řád, vedený za konstantních podmínek, neodpovídá praktickému průběhu, odchylují se i hodnoty součinitele sušení požadované skutečnosti.

Byla provedena série sušících pokusů v proměnlivých podmínkách, zachycujících dosud uznávané technologické požadavky. Z experimentálních hodnot byly vypočteny součinitelé sušení pro různé podmínky a přepočteny na srovnávací proces. Z takto získaných bodů byly sestaveny křivky I a II tak,



Obr. 2. Průběh součinitele sušení v proměnlivých podmínkách srovnávacího procesu
 $G_s = 42$ kg/m²; $w = 0,300$ m/s; $t \neq \text{konst.}$

aby jejich průběh zasahoval spodní hranici rozptylu naměřených hodnot, neboť součinitele sušení, jak ukázaly některé pokusy, mohou ovlivnit odrůdové vlastnosti ječmene, popř. i podmínky sladování.

Těmito pokusy bylo zásadně zjištěno, že součinitel sušení je při režimu, který odpovídá skutečnému průběhu v provozu vyšší, než při konstantních podmínkách v rozsahu celého procesu. Je to pravděpodobně způsobeno tím, že za konstantních podmínek při vyšších teplotách je intenzita sušení na počátku procesu vyšší, což vede k smrštění povrchových kapilár zrna. Transport vody k povrchu zrna je pak více či méně omezen.

Při nízké vlhkosti sladového zrna a dotahovací teplotě vzduchu není třeba používat korekci na proudění a měrné zatížení (viz obr. 2, přímka III).

Lze však připustit i hodnotu nižší než uvádí přímka III v případě, že při hvozdění dojde k nepříznivým poměrům přestupu vlhkosti uvnitř zrna.

Rovnovážná vlhkost sladu

Slad je třeba pokládat z hlediska jeho vysoušení za materiál s koloidní nejednotnou kapilárně porézní strukturou endospermu. Je to způsobeno:

a) účinkem složitých biochemických procesů, kterým podléhá zrno ječmene od namočení až po hotový slad;

b) odrůdovými vlastnostmi ječmene;

c) zrno, jakožto živoucí jedinec se vyznačuje nestejným rozložením i ohraničením jednotlivých vnitřních složek. To vše způsobuje, že vlhkost vnitřku zrna má různé formy vazby, lišící se navzájem různou intenzitou i tím, že k jejich porušení je zapotřebí nestejné energie.

Bližším zkoumáním jednotlivých vazeb vlhkosti se zjistilo, že látka dosáhne po určité době vlhkosti, která je v jednoznačném vztahu s teplotou a vlhkostí okolního prostředí. Takováto vlhkost je označována vlhkostí rovnovážnou a lze ji definovat takto:

Rovnovážná vlhkost látky je obsah vlhkosti, při kterém je tlak páry vlhkosti v látce roven parciálnímu tlaku páry téže vlhkosti obklopujícím prostředím daných parametrů. Rovnovážná vlhkost stanovená v prostředí relativní vlhkosti 100% byla nazvána vlhkostí hygroskopickou.

Rovnovážné vlhkosti látek jsou velmi důležitými hodnotami pro ekonomické řízení provozu sušáren a jsou nezbytné pro zjištění součinitele sušení a pro stanovení křivky kinetiky sušicího procesu. Rovnovážnou vlhkost sladu, která je funkcí teploty a relativní vlhkosti vzduchu, lze zobrazit graficky, přičemž získaná křivka se nazývá isothermou sušení nebo vlhčení.

Stanovení sorpčních isotherm pro slad naráží, jak již bylo připomenuto, na značné těžkosti. Hvozdicí proces probíhá za měnících se vnějších podmínek, ovšem podmínek odpovídajících přísným technologickým nárokům. Soubor rovnovážných stavů vlhkostí sladu pro celý rozsah procesu vytváří řadu isotherm pro různé teploty. Běžná metoda zjišťující rovnovážnou vlhkost, založená na gravimetrickém principu, vede v tomto případě k značným chybám, protože při stanovení pokračují v zrnu procesy, podobnější se na změně hmoty sušiny, zvláště při vysoké relativní vlhkosti a nízké teplotě vzduchu. Bylo proto pro stanovení použito inertního plynu k zamezení životních pochodů v zrnu.

Zjištěním sorpčních isotherm se zabývala sušárenská laboratoř Státního výzkumného ústavu tepelné techniky [5]. Podařilo se experimentálně stanovit isothermy při teplotách 20, 30 a 40 °C. Isothermy pro teploty 50 a 60 °C byly vypočteny [6] a průběh křivky byl v několika bodech ověřen experimentálně. Isothermy pro teploty 70 a 80 °C byly vypočteny.

Výpočet sušicí křivky

Určením hodnot součinitele sušení K a rovnovážné vlhkosti sladu u_R je dána možnost za použití rovnice (5) provést výpočet sušicí křivky, která zobrazuje dosažený sušicí řád, a tím i technologický průběh procesu. Naznačený postup je zvláště výhodný pro výpočet kontinuálně pracujícího hvozdu. Pro tento účel se hvozď rozdělí na několik pásem

jak ve směru vertikálním, tak i horizontálním a výpočet se provádí pro střední hodnoty každého uvažovaného úseku.

Pokusná část

Sušicí pokusy byly konány na modelovém zařízení hvozdu uzpůsobeném tak, že se dalo použít různého proudění vzduchu (0,1 až 0,5 m/s vztaženo na volnou plochu lísky) a teploty. Vlhčicí zařízení umožnilo nastavit rozličné relativní vlhkosti vháněného vzduchu. Úbytek vlhkosti při procesu se měřil v požadovaných intervalech vážením. Plocha lísky 0,20 m² byla maximálně zatížena 35 kg zeleného sladu.

Stanovení součinitele sušení

Pokusy pro toto stanovení byly provedeny v rozsahu teplot vzduchu 25 až 80 °C a absolutní vlhkosti vzduchu 8 až 32 g vody na kg suchého vzduchu. Vliv měrného zatížení (výšky vrstvy) a proudění vzduchu byl sledován při teplotě 60 °C a relativní vlhkosti vzduchu 10 % v rozsahu 21,5 až 84,0 kg sušiny na m² a proudění 0,1 až 0,5 m/s. K bylo vypočteno z rovnice (5).

Stanovení rovnovážných vlhkostí sladu

K tomuto určení bylo použito 2 metod: gravimetrické vakuové [7] a gravimetrické dynamické [8].

Literatura

- [1] Huber: Zeitschrift f. d. ges. Brauwesen 55, 14 (1932).
- [2] Schlenk R.: Woch. f. Br. 46, 37 (1928).
- [3] Rothmeier K.: Studie über den Zusammenhang von Darrmetodik Malzqualität und Wärmewirtschaft bei Malzdarren (disertační práce) Mnichov 1953.
- [4] Popov V. L.: Trudy Leningradskogo tech. inst. pišč. prom. T III, str. 79 (1953).
- [5] Tůma V.: Technický záznam SVÜTT 62-05129, 1962.
- [6] Maltry W.: Wissenschaftliche Zeitschrift der TH Dresden, č. 2, (1961).
- [7] Tůma V.: Metody stanovení rovnovážných vlhkostí SVÜTT, 60-05004, 1960.
- [8] Szafnicki J.: Przemysł chemiczny č. 5 (1961).

Došlo do redakce 3. 4. 1963.

КИНЕТИКА ПРОЦЕССА СУШКИ СОЛОДА

В статье рассматриваются теоретические основы сушки солода и выводятся уравнения для расчета факторов, определяющих ход сушки при установившихся условиях процесса. Объясняется расчет определения коэффициента сушки и показывается важное значение правильного определения сорбционных изотерм как одного из параметров, влияющих на сушку. В заключительной части статьи рассматривается построение кривой сушки.

KINETIK DES DARRPROZESSES

In der Arbeit werden zusammenfassend die theoretischen Grundlagen der Trocknung erörtert und die Trocknungskoeffizienten für konstante Prozessbedingungen abgeleitet. Die Methodik der Ermittlung des Trocknungskoeffizienten wird beschrieben und die Bedeutung der Bestimmung der Sorptionsisothermen für das Darren des Malzes erklärt. Zum Schluß wird die Methode zur Errechnung der Trocknungskurve angedeutet.

KINETICS OF MALT DRYING PROCESS

The article deals with the theoretical fundamentals of malt drying. Equations are derived calculating factors determining the evaporation rates and the efficiency of the process under stabilized conditions. The importance of sorption isotherms and their correct determination is explained in detail. The method of calculating the drying process curve is briefly outlined in the closing paragraphs.