

# Tepelná bilance kontinuálního sladovacího procesu

(Pokračování)

JAROSLAV LOOS, Potravinoprojekt, Praha

863.432/.439

Základní parametry, které přicházejí v úvahu u chladicího zařízení pro odvedení vyvinutého tepla v kontinuální klíčirně sladu a pro další upotřebení tohoto tepla ve formě tepla ze vzduchu vzduchového kondenzátoru, umožňují ve svém celoročním průměru topnou hospodárnost z všeobecného energetického hlediska. To znamená, že je možno technicky využít „přečerpaného“ tepla. Tímto ovšem není ještě zaručena celková hospodárnost instalovaného zařízení v kontinuální sladovací lince. Je nutno zvážit poměry a možnosti spotřeby tepla z kondenzátorů pro okamžité kontinuální sušení v rámci rovnováhy v celém sladovacím procesu, tj. posoudit co znamená získané teplo ze vzduchu kondenzátoru v celkové kalorické bilanci kontinuální výroby sladu za časovou jednotku.

Styčným bodem v tomto procesu je množství vzduchu, a to na jedné straně množství, které vychází z kondenzátoru a na druhé straně to, které je nezbytně nutné pro technologicky dokonalé a fyzikálně správné sušení sladu. V ideálním případě, který by zaručoval maximální hospodárnost celého procesu, by měla být tato množství vyrovnána a zásadní snahou bude tomuto stavu se co možná nejvíce přiblížit.

## Teoretická bilance tepla ve výrobě sladu

Kontinuální výroba sladu je charakterizována hodinovým výkonem hotového sladu a k tomu potřebným množstvím ječmene k namočení, jejichž vzájemný poměr je dán sladovací ztrátou. Pro tuto úvahu předpokládáme, že ze 100 kg namočeného ječmene bude vyrobeno asi 80 kg suchého sladu a že každých 100 kg namočeného ječmene vyvine za celkem pět klíčicích dnů asi 20 000 kcal, které přejdou do prostoru klíčirny. To znamená, že klíčicí kontinuální linka teoretického výkonu 100 kg ječmene (k namočení) za 1 hodinu bude mít současně na klíčicích pásech celkem  $100 \text{ kg} \times 5 \times 24 = 12 000 \text{ kg}$  (měřeno teoreticky v suchém ječmeni). Tento ječmen bude každou hodinu vyvíjet v klíčirně  $(120 \text{ q} \times 20 000 \text{ kcal/q}) : (5 \times 24 \text{ h}) = 20 000 \text{ kcal/h}$ , které převodem tepelným čerpadlem bude teoreticky možno použít pro sušení na hvozdu.

Spotřeba tepla pro hvozdní při použití venkovního vzduchu ohřátého na teplotu asi  $86^\circ\text{C}$  a za předpokladu, že zelený slad přichází na hvozdu 45% vlhkostí, teploty asi  $15^\circ\text{C}$  a je odsoušen v průměru na 4% vlhkost, bude během roku kolísat v závislosti

na teplotě a vlhkosti venkovního vzduchu. Na obr. 6 je graficky znázorněn roční průběh hodnot spotřeby tepla v kaloriích topné páry v závislosti na průměrných středních měsíčních teplotách venkovního vzduchu.

Teoretická spotřeba tepla bude během roku kolísat v rozmezích 65 000–80 000 kcal/100 kg sladu s odhadnutým ročním průměrem kolem 73 000 kcal/100 kg sladu. Kdybychom tyto hodnoty aplikovali do kontinuální sladovací linky výkonu 100 kg namočeného ječmene/hod, znamenalo by to v této lince spotřebu tepla v rozmezí 52 000 až 64 000 kcal/hod, při ročním průměru asi 58 000 kcal/hod na kontinuálním hvozdu. Podle této hrubé úvahy se jeví předpoklad, že by bylo možno v ideálním případě při úplném využití tepla z klíčirny ušetřit v páře pro hvozdní asi 39 až 31 % potřebného tepla při odhadnuté roční průměrné hodnotě kolem 34 %. Velikost tohoto procenta je velmi slibná a potvrzuje úvahu, že je vcelku opodstatněné zabývat se podrobněji využitím tepla z klíčirny v naznačené moderní technologii výroby sladu.

## Vyložení vzduchového kondenzátoru

Dosažení uspokojivého procenta využití tepla z klíčirny je v první řadě závislé na základních parametrech použitého vzduchového kondenzátoru. Rozhodujícími veličinami bude ekonomická a technicky zdůvodněná volba kondenzační plochy a jejího poměru k množství chladicího vzduchu a tlakové ztrátě kondenzátoru. V první části článku bylo poukázáno na hlavní parametry chladicího zařízení, tj. na odpařovací teplotu a průběh kondenzační teploty a v tab. 1 byla uvedena souvislost s potřebným kondenzačním topným výkonem  $Q^x$ . Danými teplotami vzduchu vstupujícího ( $t_1$ ) a vystupujícího ( $t'$ ) z kondenzátoru je určeno množství vzduchu pro kondenzaci čpavkových par podle vztahu

$$Q^x = V \cdot c_p \cdot \gamma (t' - t_1) \text{ kcal/h}$$

kde  $V$  je množství vzduchu [ $\text{m}^3/\text{h}$ ];

$c_p$  — specifické teplo vzduchu [ $\text{kcal/kg } ^\circ\text{C}$ ];

$\gamma$  — specifická váha vzduchu [ $\text{kg/m}^3$ ].

Vlastní dimenzování kondenzátoru je pak dáno rovnicí

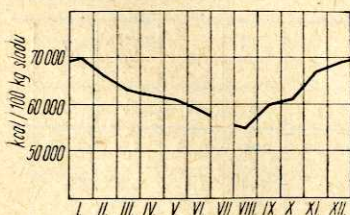
$$Q^x = k \cdot F \cdot \Delta t$$

kde  $F$  je účinný povrch kondenzátoru [ $\text{m}^2$ ];

$\Delta t$  — střední tepelný spád mezi kondenzační teplotou čpavku a teplotou kondenzačního vzduchu [ $^\circ\text{C}$ ];

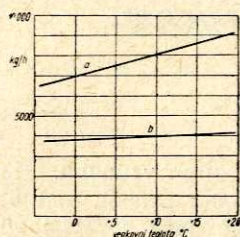
$k$  — koeficient přestupu tepla [ $\text{kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$ ], který je dán konstruktivním provedením kondenzátoru a rychlostí proudícího vzduchu.

Pro další úvahu předpokládáme, že kondenzační teplota je přímo závislá na vstupní, tj. venkovní teplotě vzduchu a není uvažováno její další řízení a souvislost se změnou zatížení kompresorového okruhu. Toto je mimo rámec zpracovávané úvahy, rovněž tak jako souvislost konstruktivního prove-



Obr. 6. Teoretická spotřeba tepla na 100 kg suchého sladu





Obr. 7. Průběh množství vzduchu pro kondenzátor a pro potřebu hvozdění

a — vzduch pro kondenzátor v kg/hod na 100 kg sladu/hod; b — vzduch pro hvozdění v kg/hod na 100 kg sladu/hod

dení kondenzátoru a koeficientu  $k$ . Naše strojírenské závody se zabývají vývojem moderních vzduchových kondenzátorů a bližší a podrobnější vztahy bude možno zpracovat v samostatné práci s ohledem na aplikaci pro kontinuální sladovací proces po provedených zkouškách prototypů.

Zůstáváme pouze u posouzení vzájemné souvislosti vzduchu pro hvozdění a vzduchu nutného pro kondenzátory a u jejich vlivu na hospodárnost celého procesu. Výpočty ukazují, že v kontinuální sladovací lince je, za výše uvedených předpokladů, vždy větší spotřeba vzduchu pro kondenzátor než vzduchu pro hvozdění, takže se nedosáhne maximální hospodárnosti, o níž je zmínka v dřívější kapitole. Průběhy obou spotřeb v závislosti na venkovní teplotě mají odlišné tendence, takže procento využití vzduchu pro hvozdění (ze vzduchu z kondenzátoru) se bude rovněž měnit v závislosti na venkovní teplotě, a to zhruba od 40 do 55 %.

Tato úvaha jinými slovy znamená, že kolem 50 % tepla, získaného tepelným čerpadlem z klíčirny, nemůže být využito při normální technologii sušení ve hvozdu a zdá se, že v celkové tepelné bilanci je zapotřebí příslušné množství vzduchu a tudíž i teplo pustit mimo hvozď do atmosféry. Za tohoto předpokladu je zapotřebí ukázat na komplexní tepelnou bilanci sladovacího procesu a vzít v úvahu i teplo přicházející do procesu s venkovním vzduchem. Tento koloběh absolutní tepelné energie je znázorněn Sankeyovým diagramem pro poměry při venkovním vzduchu 20 °C na obr. 8. Jednotlivé hodnoty v tab. 2 jsou vyjádřeny procentním podílem ze 100 %, které tvoří základní hodnota  $Q_{100}$ , určená absolutní spotřebou tepla nutného k přivedení pod spodní lísku kontinuálního hvozdů. Při 20 °C venkovního vzduchu je to teplo obsažené ve vzduchu 35 °C teplém a při -2 °C je to teplo ve vzduchu 13 °C a činí v prvním případě asi 110 000 kcal/100 kg sladu a ve druhém případě asi 82 300 kcal/100 kg sladu.

Hodnoty  $Q$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_{ALI}$ ,  $Q_x$ ,  $t_k$  jsou popsány u obr. 3 a jejich velikosti jsou vztaženy v tomto diagramu na hodnotu  $Q_{100}$ .

Jak vyplývá z hodnot v tab. 2, tvoří teplo vyvinuté v klíčící hromadě v prvním případě (při 20 °C)

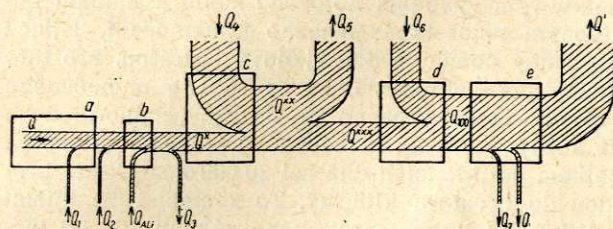
23 % celkového absolutního tepla pro hvozdění a ve druhém případě (při -2 °C) až 30,7 %, takže průměrná roční hodnota využití tohoto tepla se bude pohybovat odhadem kolem 26 %. Toto využití, srovnáme-li je s ideálním využitím, uvedeným v odstavci 6, které je 34 %, dosahuje hodnoty, která stojí za úvahu i za tu cenu, že není využita část tepla ze vzduchu z kondenzátoru, poněvadž jeho okamžité množství je pro hvozdění přebytkové.

Vliv přečerpaného tepla v takto navrženém kontinuálním sladovacím procesu se může posoudit reálněji, srovnají-li se úspory tepla přímo v topné páře s normálním hvozděním. Na obr. 9 jsou vynešeny průběhy spotřeb tepla  $Q_{100}$  a  $Q_6$  v závislosti na venkovní teplotě, z nichž je zřejmé, že největší vliv tepelného čerpadla na celkovou spotřebu tepla je v létě a s klesající venkovní teplotou na jeho významu klesá. Spotřeba tepla v přivedené páře  $Q_6$  je v průběhu roku menší proti spotřebě páry při normálním hvozdění asi o 15 až 17 %.

### Cesty k dalšímu zhospodárnění navrženého procesu

Účelem výše uvedených úvah bylo ukázat základní vztahy při provozu tepelného čerpadla během roku a jeho vliv na celkovou energetickou hospodárnost procesu. Jak je z obr. 5 patrné, je značný rozdíl mezi letem a zimou ve skutečném topném faktoru a hodnoty v tab. 2 ukazují podstatný rozdíl v celkovém teple ve vzduchu ze vzduchového kondenzátoru během roku pro další využití.

Jednou z cest pro zvýšení hospodárnosti procesu



Obr. 8. Sankeyův diagram tepelné bilance kontinuálního sladovacího procesu za použití přečerpávání tepla

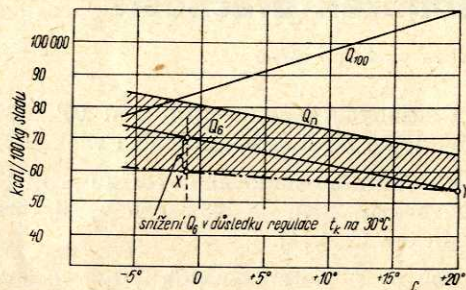
a — klíčirna; b —  $\text{NH}_3$  kompresor; c —  $\text{NH}_3$  kondenzátor; d — parní kalorifery hvozdů; e — sušící lísky hvozdů

$Q_4$  je teplo obsažené ve venkovním vzduchu vstupujícím do kondenzátoru;  $Q_{xx} = Q_x + Q_4$  — teplo ve vzduchu vystupujícím z kondenzátoru;  $Q_5$  — teplo ve vzduchu, kterého nebude použito pro hvozdění a odchází do atmosféry mimo hvozď;  $Q_{xxx} = Q_{xx} - Q_5$  — teplo přicházející z tepelného čerpadla z kondenzátoru do hvozdů před kalorifery;  $Q_6$  — teplo obsažené v páře pro ohřev vzduchu pro hvozdění;  $Q_{100} = Q_{xxx} + Q_6$  — teplo ve vzduchu pro sušení pod spodní lískou hvozdů = 100 %;  $Q_7$  — tepelné ztráty hvozdů;  $Q_8$  — teplo odcházející z hvozdů;  $Q' = Q_{100} - Q_7 - Q_8$  — teplo odcházející vzduchem z hvozdů po skončení sušícího procesu;

Tabulka 2

	$t_1$	$t_k$	$Q$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_{ALI}$	$Q_x$	$Q_4$	$Q_{xx}$	$Q_5$	$Q_{xxx}$	$Q_6$	$Q_{100}$	$Q_7$	$Q_8$	$Q'$	
	°C		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	+20	+40	23	1,75	1,3	0,4	5	30,65	84,5	115,15	64,5	50,65	49,35	100	0,45	4,5	95,05	
2	-2	+18	30,7	-1,73	-0,15	-0,63	3,03	31,22	0	31,2	15,2	16	84	100	1,2	5,8	93	
3	-2	+30	30,7	-1,73	-0,15	-0,63	4,7	32,8	0	32,8	4,85	27,9	72,2	100	1,2	5,8	93	





Обр. 9. Зѧвислость спѧтреб теплѧ  $Q_{100}$ ,  $Q_6$  и  $Q_n$  на венковнѧ теплотѧ

буде jistѧ snaha zmenŝit rozdѧl mezi mnoŝtvѧm vzduchu, kterѧ potрѧbuje kondenzѧtor a mnoŝtvѧm vzduchu pro hvozdenѧ. Za druhѧ pak bude vѧhodnѧ najѧt upotрѧbenѧ pro teplo ze vzduchu, kterѧ odchѧzѧ mimo hvoz d [Q<sub>5</sub>]. Druhѧ zpѧsob se zdѧ celkem reѧlnѧ, neboť jsou teoretickѧ pрѧedpoklady pro pouŝitѧ tohoto vzduchu pro pрѧedsuŝenѧ naklѧѣenѧho jeѣmene na jeho cestѧ z klѧѣirny na hvoz d. Vѧznam tohoto vyuŝitѧ bude ovŝem opѣt vѣtŝѧ v lѣtѧ neŝ v zimѧ, a to zѧ pрѧedpokladu, ŝe strojнѧ рѣшенѧ bude po technicko-ekonomickѧ strѧnce uspokojivѧ reali-zovatelnѧ.

Po technickѧ strѧnce bude zajѧmavѣjŝѧ a co do souvislostѧ sloŝitѣjŝѧ zpѧsob zmenŝovѧnѧ mnoŝstvѧ vzduchu pro kondenzѧtor. Tѧm se zmenŝѧ odpadнѧ teplo a zѧroveň se snѧzѧ spѧtрѧeba пѧры pro hvoz d. Jak je vidѣt z obr. 5 je topнѧ faktor v zimѧ pрѧedpoklѧdѧn dostѧ vysokѧ, ponѣvѧdŝ není u chladѧѣѧho okruhu uvaŝovѧna ŝѧdnѧ regulace kondenzaѣнѧ tep-loty. Je jasnѧ, ŝe tento faktor lze v roѣнѧm pрѧѧmѣru snѧzѧt na asi  $\epsilon_{sk} = 5$ , aby jeŝtѧ z vŝeobecnѧho energetickѧho hlediska nevznikala ztrѧta. Toto snѧzѧenѧ je prѧvѧ moŝnѧ nejvѧce v zimнѧch mѣsѧcѧch. Kdybychom pro hrubou rozvahu vzali za zѧklad snѧzѧenѧ  $\epsilon_{sk}$  v mѣsѧci lednu na 5,3, znamenalo by to, ŝe kondenzaѣнѧ teplota vzduchu by vystoupila v pрѧmѣru na 30 °C v tomto mѣsѧci. Tѧm bychom dostali asi poloviѣннѧ potрѧbnѧ mnoŝstvѧ vzduchu pro kondenzѧtor a pro dosaŝenѧ potрѧbnѧho kondenzaѣнѧho vѧkonu v urѣitѧ zѧvislosti takѧ zmenŝenѧ kon-denzaѣнѧ plochy. Znamenѧ to regulaci kondenzaѣнѧ teploty zmenŝovѧnѧm aktivнѧ vzduchovѧ plochy a bude jeŝtѧ moŝnѧ aplikovat novѣjŝѧ zpѧsob, tj. zaplavovѧnѧ ѣѧstѧ kondenzѧtorѧ kapalinou. Tento zpѧ-sob je vѧhodнѧ zvlѧŝtѧ v zimѧ, kdy nѧzкѧy konden-

zaѣннѧ tlak by znemoŝnil funkci automatiky рѣшенѧho okruhu, resp. vstрѧkovѧch ventilѧ.

Vypracujeme-li celkovou tepelnou bilanci pro slѧdovѧcѧ proces podle diagramu uvedenѧho na obr. 8 pro pomѣry: teplota venkovнѧho vzduchu  $t_1 = -2$  °C, kondenzaѣнѧ teplota  $t_k = 30$  °C pрѧ  $\epsilon_{sk} = 5,3$  (viz tab. 2), pak spѧtрѧeba теплѧ v пѧрѧ  $Q_6$  znamenѧ jѧz citelnѧ pokles (ѡspora je asi 26 %) proti теплу normѧlnѧho hvozdenѧ  $Q_n$ . Na obr. 9 je tento bod oznaѣen pѧsmenem X. Pro celoroѣннѧ pro-voz by to znamenalo, ŝe bychom рѣшенѧm konden-zaѣннѧ teploty mohli tepelnou bilanci vѣst tak, aby spѧtрѧeba теплѧ v пѧрѧ na 100 kg/slѧdu v zѧvislosti na venkovнѧ teplotѧ se pohybovala zhruba podle pрѧѧmky XY podle obr. 9. Tѧm by celkovѧ topнѧ fak-tor okruhu byl v ѡnosнѧch mezѧch kolem  $\epsilon_{sk} = 5$  v pрѧmѣru celѧho roku a efektnѧ ѡspora теплѧ v пѧрѧ by byla dѧna hodnotѧmi mezi pрѧѧmkou XY a  $Q_n$  podle obr. 9. Pro dѧlŝѧ zѧvŝenѧ hospodѧrnosti zѧstѧ-vѧ jeŝtѧ v zѧloze vyuŝitѧ теплѧ z прѧebyѣѣнѧho vzdu-chu z kondenzѧtoru, jehoŝ bude mѣnѧ a bude mѧt i vѧŝѧ teplotu. Tѧm jeŝtѧ dѧle ovlivнѧ menŝѧ spo-tрѧebu теплѧ  $Q_6$ .

### Зѧвѣр

Z ѡvah podѧнѧch v tomto ѣlѧnku o tepelnѧ bi-lanѣннѧch vztѧzѧch v континуѧlnѧm slѧdovѧcѧm pro-cesu je naznaѣena sloŝitost celѧ problematiky a smѣry, kterѧmi je nutno vѣst vѧvoj, aby континуѧlnѧ slѧdovѧcѧ linka byla po strѧnce tepelnѧ technickѧ a hospodѧrskѧ zvlѧdnuta jako dokonalѧ pрѧѧmyslovѧ vѧroba. Je patrнѧ, ŝe континуѧlnѧ slѧdovѧnѧ mѧ takѧ vŝechny pрѧedpoklady a podmѧnky k dѧlŝѧ vѧvojovѧ fѧzi, tj. k ѡplнѧe automatizaci celѧho процесu, kte-rou lze obvykle vyvѧjet aŝ na zѧkladѧ dokonalѧho zvlѧdnutѧ vŝech technologickѧch a provozнѧch sou-vislostѧ. Vѧpoѣty bude nutno korigovat po zѧskѧnѧ skuteѣннѧch ѡdѧjѧ z prototypѧ vzduchovѧch konden-zѧtorѧ a podle praktickѧch vѧsledkѧ vѧzкumнѧ prѧ-це na континуѧlnѧm suŝenѧ.

V souhrnu ѣlѧnek naznaѣuje, ŝe jsou teoretickѧ pрѧedpoklady pro ekonomickѧ zvlѧdnutѧ otѧzek re-generace теплѧ a zѧleŝѧ hlavnѧ na ѡѣelnѧm zvlѧd-nutѧ strojнѧ konstruktivнѧho provedenѧ vŝech sou-borѧ, aby континуѧlnѧ slѧdovѧcѧ linka vykazovala komplexнѧ ekonomii, tj. nejvѧŝѧ moŝnѧ snѧzѧenѧ vlastнѧch nѧklѧdѧ na tunu vyrobenѧho slѧdu proti vѧrobѧ taktovѧ.

Doŝlo do redakce 29. 1. 1963.

### ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО СОЛОЖЕНИЯ

В статье рассматриваются теоретические основы экономического решения вопроса регенерации тепла в установках для непрерывного соложения. Подчеркивается решающее значение правильной конструктивной разработки всех агрегатов, являющейся предпосылкой снижения производственных расходов и обеспечения показателей, превосходящих показатели установок периодического действия, обрабатывающих солод отдельными партиями.

### DIE WÄRMEBILANZ DES KONTINUIERLICHEN MÄLZUNGSPROZESSES

In dem Artikel werden die theoretischen Voraussetzungen für die ökonomische Lösung der Fragen der Wärme-regeneration erörtert. Die Bedeutung der Konstruktion und maschinentechnischen Durchführung aller Komplexe für die optimale Wirtschaftlichkeit des kontinuierlichen Mälzungsprozesses wird unterstrichen, d. h. für die höchstmögliche Selbstkostensenkung auf 1 Tonne Malz im Vergleich mit dem Taktverfahren.

### THERMAL BALANCE OF CONTINUOUS MALTING PROCESS

The article deals with the fundamentals of economical regeneration of heat generated in continuous malting installations. All the elements of the system must be carefully calculated and designed to secure maximum reduction of production costs and achieve thus results superior to conventional batch installations.