

Z výzkumu a praxe

Chlazení a výroba piva

663.452.2 663.452.4 663.41

I. Principy, chladivo, teplotonosné látky, instalovaný výkon

Ing. ANTONÍN KRATOCHVÍLE, Jihočeské pivovary, k. p. České Budějovice

Klíčová slova: pivo, mladé pivo, mladina, chlazení, chladivo, chladivové kompresory, chladicí zařízení, teplotonosná látka

Výroba piva je spojena s relativně vysokým nárokem na chlazení, a to jednak na chlazení vlastního výrobku v různých fázích výroby a jednak na chlazení výrobních prostorů pro zajištění vhodné technologické teploty prostředí.

Výroba chladu představuje asi 30–40 % celkové spotřeby elektrické energie. Navíc je výroba chladu zpravidla spojena s vysokým příkonem elektrické energie — hlavně elektromotorů chladivových kompresorů, který výrazně ovlivňuje celkový odběrový diagram každého pivovaru a současně i složenou cenu za odběr elektřiny. Výrobní náklady jsou určovány nejen náklady na spotřebu elektrické energie, na chladiva a teplotonosné látky, mzdovými náklady obsluhy, ale i odpisy příslušných základních prostředků provozního souboru chlazení. Proto lze nejen racionálním provozem chladicího zařízení ale již i racionálním řešením chlazení dosáhnout úspor jak ve spotřebě energií tak i výrobních nákladů.

Provozní soubor chlazení má na rozdíl od ostatních provozních souborů dvě závažné odlišnosti. Jednak spotřebu chladu na jednotlivých místech spotřeby nelze provozně prakticky měřit a současně nelze exaktně měřit ani vlastní výrobu chladu a přitom měrná spotřeba zejména elektřiny a vody na výrobu chladu se podle provozních podmínek může výrazně měnit. Druhou odlišností je skutečnost, že vlastní podmínky provozu chladicího zařízení, více než u jiných částí provozu, ovlivňují úroveň koroze a tím i provozuschopnost a životnost celého souboru.

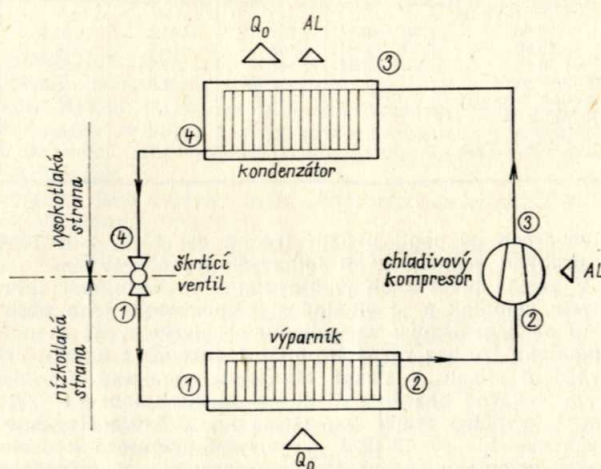
1. ZÁKLADNÍ PRINCIPY A SYSTÉMY

Průmyslová chladicí zařízení pracují na principu adiabatické komprese syté páry chladiva, izobarického odnímání a přívodu tepla a škrcení. I když v praxi běžně mluvíme o výrobě chladu, musíme si uvědomit, že v souladu s první hlavní větou termodynamiky, kterou je zákon o zachování energie, nelze energii (chlad) vyrábět a jak vyplývá z uvedeného principu chladicího zařízení, při jeho provozu v chlazené části soustavy teplo odnímáme (= chladíme), ale současně musíme v jiné části soustavy toto teplo předávat. Podle druhé hlavní věty termodynamiky může teplo přecházet pouze z vyššího teplotního stavu na nižší stav. Protože při chlazení je nutno zajistit přechod tepla opačným směrem, je nutno do soustavy dodávat vnější práci chladivového kompresoru. K zajištění tohoto procesu se v pivovarech používá v naprosté většině kompresorového chladicího zařízení, jehož schéma je uvedeno na obr. 1. Absorpční chlazení, u kterého vnější práci dodáváme ve formě tepla, se prakticky v provozu pivovarů nepoužívají.

Ve znázorněném okruhu kompresorového chladicího zařízení — obr. 1. — se za provozu opakovaně střídá vypařování kapalného chladiva a kondenzace sytých par chladiva, které v okruhu chladicího zařízení nepřetržitě obíhá.

V případě, že k vypařování chladiva dochází ve výparníku, ve kterém se teplo přímo odnímá chlazenému prostředí (vzduchu nebo chlazené kapalině), nazýváme tento systém *chlazením přímým*. Pokud je ve výparníku odnímáno teplo jiné teplotonosné látky, která se ochlazuje a teprve následně zprostředkuje odnímání tepla chlazenému prostředí, přičemž se sama ohřívá, mluvíme

o *chlazení nepřímém*. Přímé chlazení má z energetického hlediska jisté výhody, avšak současně i určité provozní nevýhody a rizika, a proto ve většině pivovarů se používá chlazení nepřímé.



Obr. 1. Funkční schéma okruhu kompresorového chladicího zařízení

Chladiva

Chladivem může být každá látka, která má vhodné termodynamické vlastnosti (zejména vysoké výparné teplo při nízkém tlaku), je neutrální ke konstrukčním materiálům zařízení a není jedovatá. Ideálně tyto požadavky nesplňuje žádná látka a jako chladiva je možno použít např. amoniaku NH_3 , oxidu uhličitého CO_2 , oxidu siřičitého SO_2 , methylchloridu CH_3Cl , ethylchloridu $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$, a nověji halogenmethanů označovaných jako freony, zejména Freon 12 a Freon 22 (v zahraniční literatuře jsou freony označovány obchodními názvy např. Frigen, Frigedohn, Fluorion apod.). Základní vlastnosti používaných chladiv jsou uvedeny v tabulce 1.

Amoniak, který nesplňuje jednu ze základních podmínek — je jedovatý — má výborné termodynamické vlastnosti, a proto je nejpoužívanějším chladivem. Jeho jedovatost však brání širšímu provoznímu využívání přímého chlazení, neboť zejména v potravinářském průmyslu je riziko úniku amoniaku do technologických prostorů velmi vysoké. Amoniak se velmi intenzivně pohlcuje potravinami i kapalinami, které se stávají nepoživatelnými. Zařízení přímého odparu vyžaduje vysoce jakostní materiály, dokonalou a přesnou montáž, důslednou kontrolu a preventivní údržbu a zprísňená bezpečnostní opatření. Výhodou přímého chlazení, vedle vyšší energetické účinnosti je, že je lze snáze automatizovat. Proto se v posledních letech prosazuje přímé chlazení i do velkých průmyslových instalací a současně se i zvyšuje podíl použití freonů jako chladiva, čímž se eliminuje riziko jedovatosti amoniaku. Typickou oblastí aplikace tohoto systému v pivovarech je chlazení cylindrických kvasných tanků. V západoevropských

Tabulka 1. Základní fyzikální hodnoty nejpoužívanějších chladiv.

Text	Jednotky	Amoniak NH ₃	Freon 12 CF ₂ Cl ₂	Freon 22 CHF ₂ Cl
1. Objemový chladicí výkon při -10(+25)+20 -10(+35)+35	kj . m ⁻³ kj . m ⁻³	2 765 2 592	1 676 1 484	2 709 2 391
2. Tlak par při teplotě: +40 °C +30 °C +20 °C +10 °C 0 °C -10 °C -20 °C	MPa MPa MPa MPa MPa MPa MPa	1,5544 1,1666 0,8572 0,6150 0,4294 0,2909 0,1902	0,9582 0,7434 0,5667 0,4230 0,3086 0,2191 0,1509	1,548 1,202 0,917 0,685 0,500 0,356 0,246
3. Měrný objem sytých par při teplotě: -20 °C -10 °C 0 °C	m ³ . kg ⁻¹ m ³ . kg ⁻¹ m ³ . kg ⁻¹	0,6236 0,4184 0,2897	0,1107 0,0781 0,0566	0,0929 0,0654 0,0471
4. Výparné teplo c při teplotě: -20 °C -10 °C 0 °C	kJ . kg ⁻¹ kJ . kg ⁻¹ kJ . kg ⁻¹	1 328 1 293 1 262	163,5 159,4 154,9	220,9 214,4 207,0
5. Bod varu	°C	-33,35	-29,8	-40,8
6. Bod tuhnutí	°C	-77,9	-155	-160
7. Kritická teplota	°C	+132,4	+112,0	+96,0
8. Kritický tlak	MPa	11,297	4,115	4,935

pivovarech se podíl použití freonů asi 10 % v r. 1960 v průběhu sedmdesátých let zvýšil na 40–45 %.

V našich pivovarech je hlavním a rozhodujícím chladivem amoniak a je vhodné si připomenout jeho působení na organismus: ve vzduchu obsahujícím 0,2 g . m⁻³ amoniaku lze bez vážných obtíží dýchat asi 1 hodinu při dráždění sliznic a slzení. Množství amoniaku 1,8–3,2 g . m⁻³ vážně ohrožuje život po 30 minutách, 3,5–7 g . m⁻³ vyvolává téměř okamžitou smrt. Podle Hygienických směrnic sv 39/1978 je nejvyšší přípustná koncentrace amoniaku v pracovním ovzduší — průměrná 40 mg . m⁻³ a mezní 80 mg . m⁻³. Amoniak je nehořlavý, v rozmezí 13–27 % amoniaku ve vzduchu je však výbušný. Příčiny výbušnosti nejsou dosud přesně známy. Amoniak nekoroduje ocel, litinu ani ostatní běžné materiály, ve vodných roztocích však narušuje měď a bronz. Velmi nebezpečný je stav, kdy dojde k úniku amoniaku ve výparníku — chladicí ledové vody, která pak intenzivně koroduje měděné části, např. chladicí hady kvasných kádí a následně v důsledku elektrolytické koroze i ostatní části zařízení.

I při provozu dobře udržovaného zařízení je nutno chladivový okruh chladivem doplňovat. Spotřeba amoniaku na každý 1 kW instalovaného chladicího výkonu je průměrně:

u přímého chlazení	1,70–2,4 kg . rok ⁻¹
u solankového chlazení	0,85–1,4 kg . rok ⁻¹
u kombinovaného chlazení	1,30–2,1 kg . rok ⁻¹

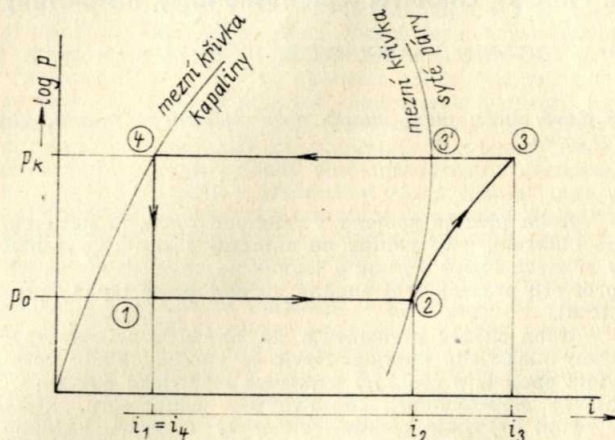
Změny stavu chladiva v průběhu chladicího oběhu

Na obr. 1 je znázorněno schéma chladicího kompresorového zařízení. K objasnění změn chladiva se nejlépe hodí tzv. *i*–*p* diagram, na jehož vodorovné ose jsou udány enthalpie chladiva *i* v kJ . kg⁻¹ a svislá osa v logaritmické stupnici udává tlak chladiva *p*. (Enthalpie je zjednodušeně tepelný obsah látky). Podmínkou změny enthalpie je změna stavu látky (např. vypařování nebo kondenzace) za stálého tlaku, tj. izobarická změna.

V návaznosti na schéma obr. 1 jsou na obr. 2 uvedeny změny stavu chladiva v chladicím okruhu ve formě *i*–*p* diagramu.

a) Vypařování = úsek 1–2: při tlaku vypařování *p*₀ a odpařovací teplotě *t*₀ se ve výparníku odpařuje kapalně chladivo, přičemž chladivo svému okolí odebírá teplo. Množství tohoto tepla je úměrné výparnému teplu chladiva a enthalpie chladiva se zvyšuje z hodnoty *i*₁ na *i*₂.

b) Komprese = úsek 2–3: studené syté páry chladiva s teplotou *t*₀ a tlakem *p*₀ jsou nasávány chladivovým kompresorem a stlačovány na kondenzační tlak *p*_k. Při kompresi je systému dodávána energie (práce) *AL* ve formě tepelného ekvivalentu pohonu elektromotoru chladivového kompresoru. Tím se enthalpie chladiva dále zvyšuje z hodnoty *i*₂ na hodnotu *i*₃. Dochází k přehřátí par chladiva a jejich stav odpovídá bodu 3.

Obr. 2. Změny stavů chladiva v chladicím okruhu znázorněné v Molierově diagramu *i*–*p*

i = enthalpie chladiva (kJ . kg⁻¹), log *p* — tlak chladiva v logaritmické stupnici

c) Kondenzace = úsek 3–4: Z kompresoru přicházejí přehřáté stlačené páry chladiva do kondenzátoru, kde se ochlazením snižuje za stejného tlaku *p*_k (kondenzační tlak) jejich teplota a v bodě 3' se mění na syté páry. Dalším ochlazením se syté páry za kondenzačního tlaku *p*_k obohacují kondenzující kapalinou chladiva, vznikají mokré páry, až v bodě 4 dojde ke zkapaštění veškerých par. V souladu se zákonem o zachování energie se musí z kondenzátoru odvádět nejen teplo *Q*₀, které chladivo přijalo ve výparníku, ale i teplo *Q*_m ekvivalentní kompresní práci *AL*, dodané systému pohonem kompresoru. V kondenzátoru se sníží enthalpie chladiva z hodnoty *i*₃ na *i*₁.

d) Škrtení = úsek 4–1: z kondenzátoru přichází chladivo v tekutém stavu s tlakem *p*_k a teplotou *t*_k do redukčního (škrťacího) ventilu, kde se bez změny enthalpie mění tlak kapalně chladiva na tlak vypařování *p*₀ a teplota na odpařovací teplotu *t*₀. Celý cyklus je uzavřen a konečný stav odpovídá bodu 1. Dále se celý proces opakuje. Ze znázorněného schématu kompresorového chlazení a popisu termodynamických změn vyplývá:

a) množství tepla *Q*₀, které chladivo při vypařování ve výparníku odebralo svému okolí — v praxi nazývané chladicí výkon *Q*₀ — v přepočtu na 1 kg chladiva je dáno rozdílem enthalpií v bodech 2 a 1 = *i*₂ – *i*₁;

b) aby syté páry chladiva z tlaku *p*₀ a teploty *t*₀ byly stlačeny na kondenzační tlak, je nutno zvýšit enthalpii chladiva o rozdíl mezi bodem 3 a 2 = *i*₃ – *i*₂. Toto zvýšení enthalpie je rovno energii spotřebované na pohon chladivového kompresoru, kterou nazýváme kompresní práci *AL*;

c) aby stlačené přehřáté páry chladiva zkapařily a dosáhly stavu při teplotě *t*_k a tlaku *p*_k, což odpovídá bodu 4, musíme z kondenzátoru odvést teplo *Q*_k, které je dáno rozdílem enthalpií chladiva v bodech 4 a 3 = *i*₄ – *i*₃ = *i*₁, což lze vyjádřit také vztahem

$$Q_k = Q_0 + AL$$

Množství tepla, které odebírá ve výparníku 1 m³ par chladiva odsávaných kompresorem závisí na teplotě vypařování a nazývá se teoretickou chladivostí podle objemu, označuje se *q*_{0th} a udává se v jednotkách MJ . m⁻³.

Obdobně kompresní práce *AL* je závislá na výchozím a

Tabulka 2. Přehled základních hodnot chladiva amoniak při různých provozních teplotách a při průměrné celkové účinnosti 0,75

Odpařovací teplota t_o °C	Kondenzační teplota t_k °C	Teoretická chladivost q_{oth} MJ . m ⁻³	Kompresní práce AL_o kWh . m ⁻³	Teoret. měrný chladicí výkon q_{th} MJ . kWh ⁻¹	Orient. skut. chladicí výkon q_{or} MJ . kWh ⁻¹	Orient. měrná spotřeba elektriny kWh . MJ ⁻¹
-15		2,215	0,11437	19,366	14,525	0,0688
-10	25	2,709	0,11732	23,090	17,318	0,0577
-8		2,939	0,11720	25,078	18,808	0,0532
-15	30	2,168	0,12895	16,818	12,613	0,0792
-10		2,850	0,13432	19,731	14,798	0,0676
-8		2,876	0,13527	21,264	15,948	0,0627
-15	35	2,119	0,14352	14,761	11,071	0,0903
-10		2,592	0,15125	17,135	12,851	0,0778
-8		2,814	0,15337	18,345	13,758	0,0727
-15	25	2,215	0,11437	19,366	14,525	0,0688
-10	30	2,168	0,12895	16,818	12,613	0,0792
-8	35	2,119	0,14352	14,761	11,071	0,0903
-15	25	2,709	0,11732	23,090	17,318	0,0577
-10	30	2,850	0,13432	19,731	14,789	0,0676
-8	35	2,592	0,15125	17,135	12,851	0,0778
-15	25	2,939	0,11720	25,078	18,808	0,0532
-10	30	2,876	0,13527	21,264	15,948	0,0627
-8	35	2,814	0,15337	18,345	13,758	0,0727

výsledném tlaku p_o a p_k a těmto tlakům odpovídajícím teplotám t_o a t_k . V přepočtu na 1 m³ par lze kompresní práci AL_o vyjádřit v kWh . m⁻³.

Poměr teoretické chladivosti podle objemu q_{oth} a kompresní práce na 1 m³ AL_o pak udává teoretický měrný chladicí výkon q_{th} , který má rozměr MJ . kWh⁻¹.

$$q_{th} = \frac{q_{oth}}{AL_o} = \frac{\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}}{\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3}} = \text{MJ} \cdot \text{kWh}^{-1}$$

Teoretický měrný chladicí výkon q_{th} je tedy ukazatelem, kolik energie musíme systému ve formě kompresní práce dodat na chladicí výkon odpovídající chladu 1 MJ. Orientačně skutečný chladicí výkon q_{or} získáme, když teoretický chladicí výkon násobíme koeficientem celkové účinnosti zařízení, který má průměrnou hodnotu 0,7 až 0,8.

V tabulce 2 je na základě údajů odborné literatury sestaven přehled příslušných hodnot pro různé provozní podmínky kompresorového chlazení s chladivem amoniak, charakterizované různými teplotami odpařovacími t_o a kondenzačními t_k , pro průměrnou celkovou účinnost 0,75.

Praktický význam uvedené stručné teorie je zřejmý z tohoto příkladu:

je-li celková spotřeba chladu na výrobu 1 hl piva např. 29,3 MJ a vyrábí-li se chlad při odpařovací teplotě $t_o = -15^\circ\text{C}$ a kondenzační teplotě $t_k = +35^\circ\text{C}$, pak chladicí výkon q_{or} je 11,071 MJ . kWh⁻¹ a spotřeba elektrické energie na výrobu chladu v přepočtu na 1 hl piva:

$$29,3 : 11,071 = 2,65 \text{ kWh} \cdot \text{hl}^{-1}.$$

Jestliže však bude chladicí zařízení pracovat při odpařovací teplotě $t_o = -10^\circ\text{C}$ a kondenzační teplotě $t_k = +30^\circ\text{C}$, pak chladicí výkon q_{or} bude 14,789 MJ . kWh⁻¹ a spotřeba elektrické energie na výrobu chladu 29,3 : 14,789 = 1,981 kWh . hl⁻¹, tj. nižší asi o 25 %.

Protože objem par nasávaných chladivovým kompresorem při stálých otáčkách je stále stejný a chladivost chladiva podle objemu se mění v závislosti na teplotě, je zřejmé, že výkon chladivových kompresorů je také závislý na teplotě odpařovací (vypařovací) t_o a teplotě kondenzační t_k . Grafické znázornění této závislosti formou diagramu se nazývá charakteristika kompresoru. Na obr. 3 je uvedena charakteristika chladivového kompresoru typové řady NF.

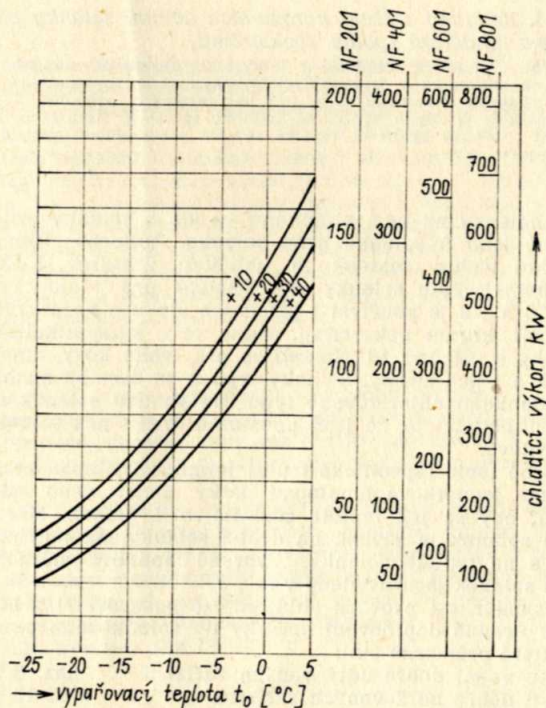
Teplonosné látky

Jak bylo uvedeno, převážně používaný systém chlazení v pivovarech je chlazení nepřímé. Na primární okruh chladiva navazuje ve výparníku sekundární okruh teplonosné látky, která zprostředkovává přenos tepla z konkrétního místa chlazení do výparníku. Charakteristika pivovarského provozu zpravidla vyžaduje dva samostatné sekundární okruhy:

— okruh solankový pro teploty pod 0°C ,
— okruh ledové vody pro teploty nad 0°C .
V solankovém okruhu se převážně používají jako teplonosné látky solanky, i když pro podnulové teploty lze použít směsi voda—alkohol nebo glykol a jiných organických látek.

Solanky jsou roztoky solí, které můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

— solanky na bázi chloridů, tj. roztoky chloridu sodného NaCl, chloridu vápenatého CaCl₂, chloridu hořečnatého MgCl₂, popř. směs CaCl₂/MgCl₂. U průmyslově vyráběných solanek tyto roztoky obsahují inhibitory ke snížení korozivních účinků. Roztoky chloridů jsou však vždy korozivní roztoky a jejich korozivnost je vysoká, zejména je-li solanka zředěná a má-li nízké pH, tj. slabě kyselá. Při nízké koncentraci se zvyšuje rozpustnost vzdušného kyslíku v solance, který korozi podporuje a současně vlivem vzdušného CO₂, popř. i SO₂, se snižuje pH solanky. Korozivně agresivní jsou NaCl solanky, klesne-li jejich hustota pod 18°Bé (= 1145 kg . m⁻³) a

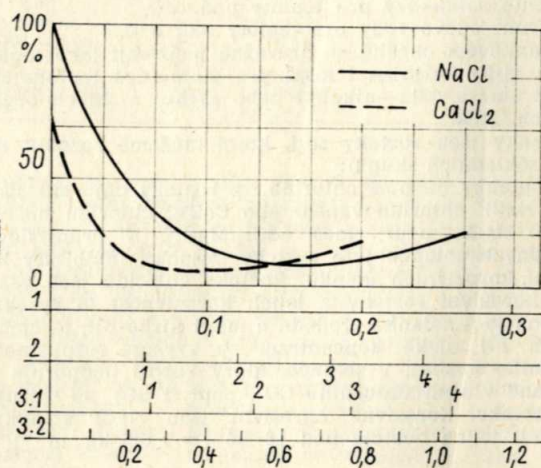


Obr. 3. Charakteristika chladivových kompresorů typové řady NF

solanky $\text{CaCl}_2/\text{MgCl}_2$ klesne-li hustota pod 24°Bé ($= 1195 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). V provozu je proto třeba maximálně omezovat styk solanky se vzduchem, pravidelně 2krát za měsíc kontrolovat pH solanky, které by mělo být v rozmezí pH 8,5 až 10 (při poklesu pH se upravuje alkalita přidávkem hydroxidu sodného NaOH) a pravidelně kontrolovat hustotu solanky, aby neklesla pod uvedenou nebezpečnou hodnotu. Hustota zředěných solanek se upravuje přidávkem koncentrovaných roztoků nebo přímo příslušných solí.

Solanky chloridového typu lze použít v zařízeních ze železa, oceli, barevných a lehkých kovů. Nelze je používat při styku s nerezavějící ocelí, která je ionty Cl^- silně korodována. Pouze speciální oceli legované titanem jsou vůči Cl^- do 50°C odolné. Korozivní účinky solanek se dále zvyšují při vysoké rychlosti proudění solanky v potrubí, která by neměla překročit hodnotu 1,5 až $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Také mechanické nečistoty obsažené ve znečištěné solance urychlují korozi, a proto by se měly občas ze solanky odstraňovat filtrací.

Korozivní účinky solanek snižuje přidávek inhibitorů na bázi chromanů (chroman sodný nebo draselný). Relativní snížení korozivních účinků solanky v důsledku přidávku zmíněných inhibitorů je znázorněno na obr. 4.



Obr. 4. Relativní snížení korozivních účinků solanky při dávce inhibitorů (podle Bäckströma)

stupnice 1: přidávek chromanů v g.l⁻¹ kyseliny chromové, stupnice 2: přidávek chromanů v g.l⁻¹ dvojjodovanu sodného, stupnice 3: 1 — přidávek chromanů v g.l⁻¹ dvojjodovanu sodného, 2 — neutralizační přidávek hydroxidu sodného (g.l⁻¹). Stanoveno při hustotě 1,16–1,20 kg·dm⁻³, teplotě 24°C a při rychlosti proudění $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

— solanky na bázi uhličitánů — jde o solanky označované jako A solanka nebo solanka Anticoro. Hlavní součástí těchto solanek je uhličitán draselný K_2CO_3 (= potaš). Tyto solanky jsou vhodné pro teploty do -12°C a lze je používat i při jejich styku s nerezavějící ocelí, kterou nekorodují. Jedná se o silně alkalické roztoky s pH nad 10. Nehodí se pro lehké kovy, zinek, hliník a jejich slitiny. Solanky typu A se nesmějí míchat se solankami chloridového typu. Nevýhodou solanek na bázi uhličitánů je, že jsou podstatně dražší než solanky chloridové.

Měrné teplo (specifické teplo) je množství tepla, které musíme jednotkové hmotnosti látky dodat nebo odejmout, aby se její teplota změnila o 1 stupeň. Měrné teplo solanek je závislé na druhu solanky, na její hustotě a na teplotě solanky. Vybrané hodnoty měrného tepla solanek jsou uvedeny v tab. 3.

Hospodárnost provozu chlazení lze posuzovat i z hlediska úrovně doplňování solanky do solankového okruhu, které průměrně činí:

- u velmi dobře udržovaných zařízení max. 8 %,
- u dobře udržovaných zařízení 8 až 10 %,
- u špatně udržovaných zařízení nad 10 %

celkové solankové náplně za rok. U uzavřených solankových okruhů je potřeba doplňování solanky nižší než

Tabulka 3. Měrné teplo c [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] solanek při charakteristických hodnotách hustoty a různých teplotách

Druh solanky	Hustota		Měrné teplo c [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] při teplotě	
	Bé	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	-10°C	0°C
NaCl	18,9	1 150	3,395	3,408
	21,1	1 170	3,333	3,341
CaCl_2	24,2	1 200	2,977	3,002
	29,0	1 250	2,813	2,838
MgCl_2	24,2	1 200	2,939	2,964
	28,0	1 240	2,776	2,801
$\text{CaCl}_2/\text{MgCl}_2$	24,2	1 201	2,999	3,018
	28,0	1 241	2,826	2,851
A	30,8	1 270	—	3,023
	33,0	1 295	—	2,956

u okruhů otevřených. Jak je zřejmé z hodnot měrného tepla solanek v tab. 3, je akumulace chladu v solankách dána hlavně celkovým objemem vychlazené solanky, čímž se solankový okruh zásadně liší od okruhu ledové vody.

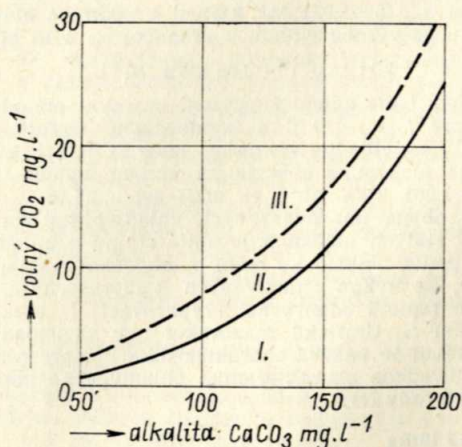
Ledová voda je studniční voda podchlazená na teplotu blízkou 0°C . Na rozdíl od solanek bývá také nazývána sladkou vodou. Pro nutné nepřímé chlazení v rozsahu teplot nad 0°C je voda ideálním nosičem chladu, proto se v pivovarech využívá pro chlazení kvasných kádí a pro chlazení mladiny.

Měrné teplo vody $c = 4,1868 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, což je asi o 40 % vyšší než u solanek. Protože současně hustota ledové vody je asi o 20 % nižší než hustota solanek, je zřejmé, že přenos stejného množství chladu ledovou vodou je možno zajistit s nižší energetickou náročností než při použití solanek.

U ledové vody se její korozivní vliv na kovy uplatňuje v menší míře než u solanek. Je však třeba připomenout, že voda obsahující rozpuštěné plyny, zejména oxid uhličitý CO_2 , kyslík O_2 a sirovodík H_2S , je tím korozivnější, čím více těchto plynů obsahuje, čím je měkčí a čím je kyslejší, přičemž hlavní složkou způsobující korozi je CO_2 , hlavně tzv. volný CO_2 . Na obr. 5 je uvedena závislost korozivnosti vody na obsahu volného CO_2 a alkalitou vody vyjádřenou jako CaCO_3 (v $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$).

Přebytek volného CO_2 lze z vody chemicky odstranit použitím mletého uhličitánu vápenatého CaCO_3 . Spotřeba CaCO_3 je asi 25 g na každých 10 g volného CO_2 .

I pro okruh ledové vody platí stejná zásada jako pro okruh solankový, tj. v maximální míře omezit styk ledové vody se vzduchem. Podstatnou výhodou použití vody ja-



Obr. 5. Závislost korozivních účinků vody na obsahu volného CO_2 a alkalitě vody vyjádřené obsahem CaCO_3 (podle Štichy)

..... krajní hodnoty bez koroze
— křivka rovnováhy CaCO_3
I — oblast bez koroze, II — oblast mírné nebo žádné koroze, III — oblast značné koroze

ko teplotosné látky je její schopnost akumulovat chlad. Při podchlazení vody namrzá na trubkách výparníku vrstva ledu a tak se akumuluje chlad, jehož množství je úměrné měrnému skupenskému teplu tuhnutí vody, které je $333,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, což se přibližně rovná podchlazení asi o 80°C . O využití této vlastnosti vody bude pojednáno v části výparníky.

Směsi alkohol—voda a ethylenglykol—voda

Jako teplotosných látek se zejména v potravinářském průmyslu používá roztoku ethylalkoholu ve vodě. Teplota mraznutí tohoto roztoku je závislá na obsahu ethylalkoholu podle tohoto přehledu:

obsah ethylalkoholu %	teplota mraznutí $^\circ\text{C}$	obsah ethylalkoholu %	teplota mraznutí $^\circ\text{C}$
7,4	-3	19,1	-10
11,5	-5	21,7	-12
18,5	-8	23,8	-14

Obdobně lze použít jako teplotosnou látku roztok ethylenglykolu ve vodě, který při obsahu ethylenglykolu 20 % hm. má teplotu mraznutí -8°C a při obsahu 40 % hm. mrazne při -24°C . Ethylenglykolu se např. používá v dilčním sekundárním (nebo terciárním okruhu chlazeném solankou) okruhu pro chlazení průtokových pastěrů, jejichž desky jsou vyrobeny z běžné nerezavějící oceli, pro které nelze použít chloridové solanky.

Čistý ethylalkohol má měrné teplo $c = 2,428 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. U vodných roztoků lze jejich měrné teplo přibližně odhadnout jako součin měrného tepla vody a váhového zlomku rozpouštědla, tj. vody. Tak např. 15% roztok bude mít měrné teplo

$$c = 4,1868 \cdot (100 - 15) : 100 = 3,558 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Přenos tepla (chlada) pomocí teplotosných látek

Množství tepla Q [$\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$], které teplotosná látka při cirkulaci v sekundárním okruhu přenáší, je funkcí jejího měrného tepla c [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], rozdílu teploty na výstupu z výparníku t_1 a na vratné větvi při vstupu teplotosné látky do výparníku t_2 [$^\circ\text{C}$], průtočného množství (cirkulujícího objemu) V [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$] a hustoty teplotosné látky ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] podle vztahu

$$Q = V \cdot \rho \cdot (t_2 - t_1) \cdot c \quad (\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1})$$

Z tohoto vztahu pak lze odvodit nutný výkon cirkulačních čerpadel jak pro okruh solanky, tak i pro okruh ledové vody $Q_{\text{č}}$:

$$V = Q_{\text{č}} = \frac{Q}{\rho \cdot (t_2 - t_1) \cdot c} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$$

Pokud do uvedeného vztahu místo spotřeby chladu Q [$\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$] dosadíme potřebný příkon chladu P_{ch} v kW, pak výkon čerpadla $Q_{\text{č}}$ je udán v jednotkách $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Pro případ, že spotřeba chladu je v průběhu dne nepřetržitá (např. chlazení výrobních prostorů), ale dávka chladu je uskutečňována pouze část dne (vyjádřenou počtem hodin h), pak je nutno uvedený vztah pro nutný výkon čerpadla $Q_{\text{č}}$ doplnit o tyto časové poměry:

$$Q_{\text{č}} = \frac{Q \cdot 24}{\rho \cdot (t_2 - t_1) \cdot c \cdot h} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$$

Například: ležácký sklep na základě propočtu vyžaduje příkon chladu 100 kW , tj. spotřeba chladu $360\,000 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$, a při nepřetržitém chlazení, při $(t_2 - t_1) = 2,5^\circ\text{C}$, $\rho = 1\,200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $c = 3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, by byl nutný výkon čerpadla solanky

$$Q_{\text{č}24} = \frac{100}{1\,200 \cdot 2,5 \cdot 3} = 0,0111 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1};$$

bude-li však chlazení v provozu pouze 14 hodin denně, pak nutný výkon čerpadla bude

$$Q_{\text{č}14} = \frac{100 \cdot 24}{1\,200 \cdot 2,5 \cdot 3 \cdot 14} = 0,0190 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}.$$

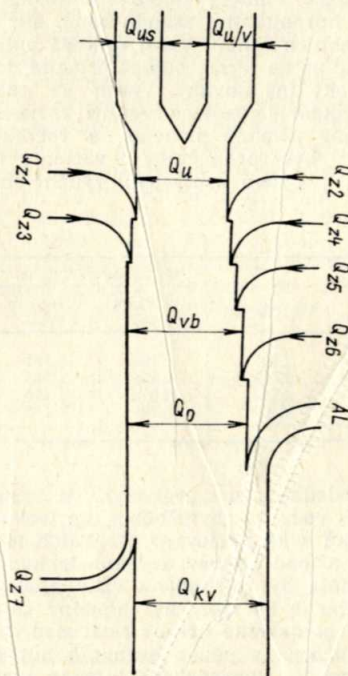
2. INSTALOVANÝ VÝKON CHLADICÍHO ZARÍZENÍ

Instalovaným výkonem Q_i chladicího zařízení se zpravidla rozumí součet hrubého chladicího výkonu Q_0 všech instalovaných chladivových kompresarů

$$Q_i = Q_{01} + Q_{02} + Q_{03} + \dots + Q_{0n}$$

Na obr. 6 je zjednodušený Sankeyův diagram přenosu tepla při provozu kompresorového nepřímého chlazení.

Z diagramu vyplývá, že hrubý chladicí výkon kompre-



Obr. 6. Sankeyův diagram přenosu tepla při provozu kompresorového nepřímého chlazení

Q_{us} — užitečný výkon solankového okruhu, $Q_{u/v}$ — užitečný výkon okruhu ledové vody, Q_u — celkový užitečný chladicí výkon = teplo odnímané teplotosnou látkou v místě spotřeby chladu, Q_{z1} , Q_{z2} — ztráty v okruhu teplotosných látek, Q_{z3} , Q_{z4} — ztráty — tepelný ekvivalent příkonu čerpadel teplotosných látek, Q_{z5} — tepelné ztráty teplotosných látek ve výparníku, Q_{z6} — tepelné ztráty chladiva ve výparníku, AL — tepelný ekvivalent kompresní práce = příkon kompresoru, Q_{z7} — tepelné ztráty chladiva mezi kompresorem a kondenzátorem, Q_{kv} — teplo odváděné v kondenzátoru (vodou, odparem, vzduchem)

soru Q_0 kromě užitečného chladicího výkonu Q_u (Q_u je množství tepla odnímaného teplotosnou látkou na místě spotřeby chladu) zahrnuje i příslušné ztráty. V instalovaném výkonu Q_i je zahrnuta i příslušná provozní rezerva.

V podmínkách pivovarského provozu instalovaný výkon musí odpovídat maximální spotřebě chladu, jak v okruhu solanky tak i v okruhu ledové vody v průměrném dnu maximálního letního měsíce. Potřebný instalovaný výkon Q_i pro ten který pivovar je pak dán součinem měrného instalovaného výkonu q_i [$\text{kW} \cdot \text{hl}^{-1}$] a ročního výstupu piva VP hl:

$$Q_i = q_i \cdot VP \quad (\text{kW})$$

V běžném pivovarském provozu se v klimatických podmínkách střední Evropy hodnota měrného instalovaného výkonu pohybuje v rozmezí $q_i = 2,2$ až $3,6 \text{ kW} \cdot \text{hl}^{-1}$.

S použitím těchto hodnot je možno pro různé kategorie velikosti pivovarů stanovit minimální a maximální instalovaný výkon Q_0 chladivových kompresorů:

roční výstav $VL \text{ hl. a}^{-1}$	nutný instalovaný výkon kompresorů kW	
	minimální	maximální
50 000	110 000	180 000
100 000	220 000	360 000
200 000	440 000	720 000
500 000	1 100 000	1 800 000
750 000	1 650 000	2 700 000

Instalovaný výkon Q_i má přímý vliv jednak na investiční náklady, a to nejen vlastního chladicího zařízení, ale i na návazné soubory zejména trafostanici, rozvodnu nn, vodní hospodářství závodu apod. ale i na rozsah nutných stavebních fondů. Vyšší celková pořizovací hodnota těchto ZP se ve formě odpisů promítá do výrobních nákladů. Vysoký instalovaný výkon se zcela logicky promítá v nízkém směnovém využití zařízení a strojů.

V konkrétním případě pivovaru s ročním výstavem 300 000 hl. a⁻¹ byly propočteny 4 varianty instalovaného výkonu Q_i a z toho vyplývající využití strojů a zařízení:

Q_i kW	q_i kW . hl ⁻¹	Ø směnové využití strojů a zař.		
		v zimním měs.	v letním měs.	Ø roční
676 000	2,25	0,703	2,191	1,657
1 014 000	3,38	0,469	1,940	1,105
1 352 000	4,50	0,352	1,458	0,829
1 690 000	5,63	0,281	1,165	0,663

Uvedené výsledky jasně prokazují, že vysoký instalovaný výkon Q_i vede ke zbytečnému umrtvování investičních prostředků a ke zvyšování výrobních nákladů. Proto pro každý případ obnovy a rekonstrukce chladicího zařízení by měla být provedena vždy bilance spotřeby chladu a současně by měly být hledány cesty, jak potřebu provozu pivovarské výroby řešit sice naprosto bezpečně, ale současně s pouze nezbytně nutným instalovaným výkonem Q_i . Vypracovaná bilance spotřeby chladu podle konkrétních podmínek provozu je současně i vhodným podkladem pro kontrolu provozu chladicího zařízení. Základní pohledy na tyto otázky budou obsahem částí II a III v příštích číslech Kvasného průmyslu.

Literatura

- [1] DVORÁK, Z. - ČERVENKA, O.: Průmyslová chlazení, SNTL Praha, 1962
[2] BÄCKSTRÖM, M.: Technika chlazení, SNTL Praha, 1959

- [3] ŠTÍCHA, V.: Vodárenství, SNTL Praha, 1960
[4] URBAN, M.: Chladicí zařízení v potravinářském průmyslu, SNTL Praha 1964
[5] SLUNÍČKO, B. - URBAN, M.: Chladicí solanky, Ministerstvo potravinářského průmyslu Praha, 1956
[6] UNTERSTEIN, K.: Brauwelt, 1978, č. 34, s. 1 231
[7] BRETTING, H. L.: Brauwelt, 1983, č. 28, s. 1 175

Kratochvíle, A.: Chlazení a výroba piva I. Kvas. prům., 31, 1985, č. 10, s. 227—232.

Článek stručně objasňuje základní principy chlazení, uvádí vlastnosti běžných chladiv a teplotnosných látek a přenos tepla teplotnosnými látkami. V části 2 je pak formulován nutný instalovaný výkon chladicího zařízení ve vztahu k roční výrobě piva. Článek je úvodní částí pro vysvětlení technicko-provozních podmínek chlazení v pivovarském provozu, které budou obsahem částí II a III v následujících číslech časopisu.

Кратохвиль, А.: Процесс охлаждения и производство пива I. Квас. прим. 31, 1985, № 10, стр. 227—232.

Статья вкратце объясняет основные принципы процесса охлаждения, приводит свойства охлаждающих веществ и теплоносных веществ и описывает теплопередачу теплоносными веществами. В следующей части формулируется необходимая установленная мощность холодильной установки в отношении к годичному производству пива. Статья является вводной частью для изложения технико-производственных условий охлаждения в производстве пива, которые будут публиковаться в следующих номерах настоящего журнала, как часть II и III.

Kratochvíle, A.: Chilling and Beer Output I. Kvas. prům., 31, 1985, No. 10, pp. 227—232.

Basic principles of chilling, properties of coolants and heat transfer by coolants are briefly described. In the part 2 a magnitude of the chilling capacity with respect to the annual beer output is derived. The article forms the first part explaining the technical conditions of chilling in a brewery. The parts II and III will follow in the next numbers of the journal.

Kratochvíle, A.: Kühlung und Bierherstellung I. Kvas. prům., 31, 1985, Nr. 10, S. 227—232.

Der Artikel enthält eine zusammenfassende Erklärung der Grundprinzipie der Kühlung; es werden die Eigenschaften der üblichen Kühlmittel und wärmeübertragender Stoffe erwähnt und die Grundsätze der Wärmeübertragung mittels der wärmeübertragender Substanzen erörtert. In dem 2. Teil wird die erforderliche installierte Leistung der Kühlanlage in Beziehung zur jährlichen Biererzeugung formuliert. Der Artikel stellt den einführenden Teil zu der Erklärung der technisch-betrieblichen Bedingungen der Kühlung im Brauereibetrieb dar, die in den Teilen II und III in den nachfolgenden Nummern enthalten werden.