

9 Operace se sdílením tepla a látky

9.1 HMOTNOSTNÍ A ENTALPICKÁ BILANCE ODPARKY

Úkol: Naučte se obsluhovat poloprovozní vakuovou odparku, prakticky si osvojte zásady práce s vakuovými zařízeními a změřte veličiny pro výpočet hmotnostní a entalpické bilance odparky.

Teoretický úvod

Hmotnostní bilance odparky je jednak bilancí roztoku s počáteční hmotností m_{r1} , která se odpařením hmotnosti m_b rozpouštědla změni na konečnou hmotnost m_{r2}

$$m_b = m_{r1} - m_{r2} \quad (9.1)$$

jednak bilancí rozpuštěné látky, která má výchozí koncentraci w_1 , vyjádřenou hmotnostním zlomkem rozpuštěné látky, a po odpaření koncentraci w_2

$$m_{r1}w_1 = m_{r2}w_2 \quad (9.2)$$

Z entalpické bilance vroucího roztoku se vstupní h_{r1} a výstupní h_{r2} specifickou entalpií za vzniku brýdové páry o specifické entalpii h_b můžeme vypočítat spotřebu tepla jen k odpařování podle rovnice

$$Q_1 = m_{r1}(h_{r2} - h_{r1}) + m_b(h_b - h_{r2}) \quad (9.3)$$

Teplu Q_1 dodané do odparky hmotností m_t topné páry se specifickou entalpií h_{t1} , při odvodu kondenzátu se specifickou entalpií h_{t2} , vypočteme podle vztahu

$$Q_t = m_{t1}(h_{t1} - h_{t2}) \quad (9.4)$$

Toto teplo je větší než teplo Q_1 (spotřebované jen k odpařování) o nevyužitě ztrátové teplo Q_z . Nevyužitě teplo zmenšuje účinnost odpařování η , která je ekonomickým kritériem odpařování. Vypočteme ji podle rovnice

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_t} \quad (9.5)$$

Podobně můžeme stanovit i účinnost ohřevu η_0 roztoku se specifickou entalpií h_{r0} na teplotu varu, kdy má roztok specifickou entalpii h_{r1} . Teplo spotřebované k ohřevu vypočteme podle kalorimetrické rovnice a účinnost podle vzorce

$$\eta_0 = \frac{m_{r1}(h_{r1} - h_{r0})}{Q_{t2}} \quad (9.6)$$

Q_{t2} počítáme podle rovnice (9.4), ve které nahradíme hmotnost páry m_{t1} hmotností m_{t2} spotřebovanou k ohřevu.

Účinnost kondenzace η_k vypočteme z výtěžku m_k kondenzátu

$$\eta_k = \frac{m_k}{m_b} \quad (9.7)$$

Z tepelné bilance kondenzátoru můžeme vypočítat spotřebu chladicí vody m_v , která při kondenzaci zvětší svou specifickou entalpii z hodnoty h_{v1} na hodnotu h_{v2} . Specifická entalpie brýdových par klesne na specifickou entalpii kondenzátu h_k . Pro spotřebu vody pak platí

$$m_v = \frac{m_b(h_b - h_k)}{(h_{v2} - h_{v1})} \quad (9.8)$$

Minimální spotřebu vody vypočítáme, dosadíme-li h_k za h_{v2} .

Příklad zadání úlohy

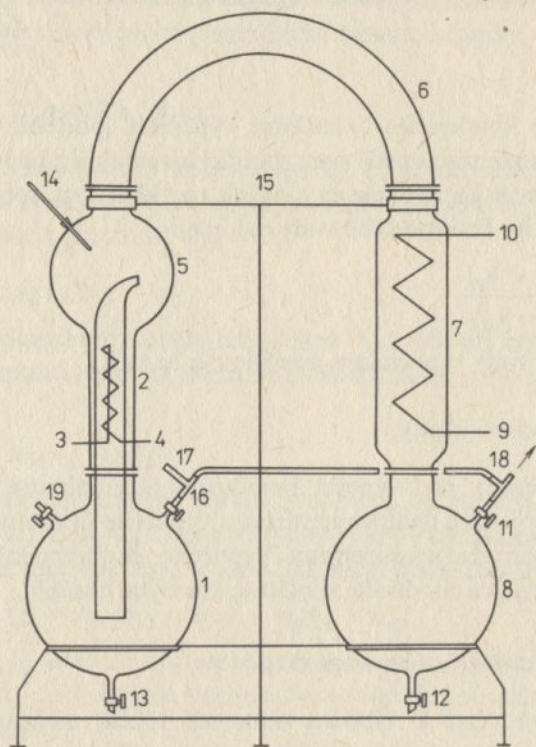
Změřte hodnoty pro výpočet hmotnostní a entalpické bilance zvoleného množství roztoku dané koncentrace a vypočtěte účinnost ohřevu k varu, účinnost odpařování a kondenzace. Vypočtěte též minimální spotřebu vody pro kondenzaci a zhodnoťte spotřebu, které jste dosáhli.

Koncepce a doporučení aparatury

Hodnoty potřebné k výpočtu zadaných veličin můžeme měřit buď na kontinuální, nebo na diskontinuální odparce. Diskontinuální odparka je výhodnější, protože odpadají problémy s realizací a měřením průtoků. Pokud bychom chtěli odpařovat vodné roztoky za atmosférického tlaku, museli bychom mít k dispozici tlakovou páru. Proto je výhodné volit vakuovou odparku, ve které můžeme dosáhnout varu při vytápění párou o atmosférickém tlaku. Potíže mohou nastat i při výpočtu specifických entalpií roztoků, neboť specifické tepelné kapacity rozpuštěných látek

nebývají v běžně používaných tabulkách uváděny. Při odpařování roztoků bychom měli uvažovat i zředovací tepla. Potíží se vyhneme volbou silně zředěných roztoků a omezením doby odpařování tak, aby malá změna koncentrace umožnila bilancovat prakticky čisté rozpouštědlo. Odparka musí dovolovat snadné měření veličin uvedených v rovnicích (9.1) až (9.8).

Splnit požadavky zadání umožňuje nejlépe sériově vyráběná poloprovozní odparka (obr. 48). Roztok určený k odpařování se načerpá do zásobní baňky 1, do které zasahuje spodní část ohříváče 2. Odparka se vytápí párou o atmosférickém tlaku, přiváděnou z varné baňky do ohříváče hrdlem 3.



Obr. 48. Schéma vakuové odparky

1 – zásobní baňka, 2 – ohříváč, 3 – hrdlo pro přívod páry, 4 – hrdlo pro odvod kondenzátu, 5 – odpařovací baňka, 6 – koleno, 7 – kondenzátor, 8 – baňka na kondenzát, 9 – hrdlo pro přívod chladicí vody, 10 – hrdlo pro její odvod, 11 – kohout pro připojení zdroje nízkého tlaku, 12, 13 – vypouštěcí kohouty, 14 – teploměr, 15 – nosná konstrukce, 16 – regulační kohout, 17 – připojení U-manometru, 18 – tvarovka T, 19 – plnicí a zavzdušňovací kohout

Kondenzát se odvádí hrdlem 4, na němž je nasazena pryžová hadice se skleněnou tvarovkou T osazenou teploměrem, měřícím teplotu kondenzátu. Vroucí kapalina se rozstříkuje v odpařovací baňce 5. Neodpařený podíl stéká zpět do baňky 1 a brýdové páry odchází kolenem 6 do kondenzátoru 7, kde kondenzují a chladí se. Kondenzát stéká do baňky 8 na jímání brýdového kondenzátu. Chladicí voda se přivádí do kondenzátoru hrdlem 9 a odvádí hrdlem 10 do odpadu. Kondenzátor má též funkci pojistné láhve. Zdroj nízkého tlaku (vývěva) se připojuje na kohout 11, ke kterému je připojena tvarovka T 18 s hadicí spojující baňku 8 s baňkou 1. Baňky se po ukončení práce vyprazdňují kohouty 12 a 13. Teplota během odpařování se kontroluje teploměrem 14. U-manometr na měření sníženého tlaku se připojuje na tvarovku T 17 připojenou na kohout 16, kterým se reguluje rozdíl tlaků mezi baňkami 1 a 8 tak, aby hladina vody vystoupila nad ohřívák 2. Kohoutem 19 se při vytvoření sníženého tlaku v odparce nasaje roztok k odpařování a na konci odpařování se jím odparka zavzdušní (tlak v ní se vyrovná s atmosférickým).

Odparka je uchycena na nosné konstrukci 15, která umožňuje její přemístění bez rozebírání. Během práce s nízkým tlakem používáme obličejových štítů jako ochrany před implozí a pracujeme za stěnou z bezpečnostního skla, abychom neohrozili okolí.

Doporučený postup při měření

Nejprve změříme atmosférický tlak a teplotu a zapíšeme je. Odparku připojíme tvarovkou 18 na výkonnou vodní nebo olejovou rotační vývěvu. Mezi tvarovku a vývěvu zařadíme kohout. Na tvarovku 17 připojíme U-manometr naplněný rtuť s délkou ramen 1 m. Nasadíme obličejové štíty a při otevřených kohoutech 16 a 11 a uzavřených kohoutech 12, 13 a 19 odparku evakuujeme, až dosáhneme na U-manometru rozdílu výšek hladin alespoň 700 mm. Pak uzavřeme kohout mezi vývěvou a tvarovkou 18, vývěvu zastavíme a během dvou minut sledujeme hladiny rtuť v U-manometru. Nezmění-li se jejich poloha, jsou odparka i pryžové spoje těsné a můžeme začít s prací.

Do zvážené nádoby odvážíme asi 5 kg vody a změříme její teplotu. Zapneme vývěvu a otevřeme kohout spojující vývěvu s odparkou. Na kohout 19 nasadíme hadici a ponoříme ji do nádoby s vodou. Pozvolným otevřením kohoutu 19 nasajeme vodu do baňky 1. Po vyprázdnění nádoby uzavřeme kohout 19, vypneme zdroj nízkého tlaku, nádobu zvážíme a z di-

ference vážení vypočteme hmotnost m_1 vody nasáté do odparky. Na nátrubek 3 nasadíme hadici spojující topný had s varnou baňkou o objemu alespoň 3 l, opatřenou pojistnou trubicí, ve které vyvíjíme topnou páru. Spojovací hadice má být co nejkratší a tepelně izolovaná, aby se v ní omezila kondenzace páry na minimum. Na nátrubek 4 se připojí tvarovka T s teploměrem a hadicí pro odvod kondenzátu do zvážené kádinky o objemu asi 500 ml. Po připojení topného hadu začneme vyvíjecí baňku ihned zahřívat. Jakmile začne voda vřít, zapneme vývěvu a opatrným přivřením kohoutu 16 vyvineme v baňce 1 vyšší tlak než v baňce 8. Tento tlak je potřebný k tomu, aby voda vystoupila nad topný had do baňky 5 po vyznačenou rysku, umístěnou asi 5 cm pod otvorem trubice, kterou se přivádí směs páry a roztoku z ohříváku 2. Kondenzát topné páry jímáme do zvážené kádinky a měříme jeho teplotu až do okamžiku, kdy začne voda vřít. Pak kádinku s kondenzátem vyměníme za jinou kádinku, do které jímáme kondenzát. Po dobu odpařování udržujeme konstantní tlak, a tím i teplotu, případným zvýšením tlaku pootevřením kohoutu 19 a následným snížením hladiny v baňce 5 pootevřením kohoutu 16 a další opatrnou manipulací s nimi až do dosažení požadovaného tlaku. (Manipulaci si ze cvičných důvodů zkusíme, i když není třeba tlak regulovat.) Kádinku s kondenzátem topné páry jímaným po dobu ohřevu zvážíme a zjištěnou hmotnost použijeme pro výpočet účinnosti ohřevu.

Pracovní tlak p vypočteme jako rozdíl atmosférického tlaku p_a , změřeného barometrem, a tlakové difference $\Delta p = \Delta h \rho g$, dané rozdílem výšek hladin Δh manometrické kapaliny v U-manometru připojeného na odparku

$$p = p_a - \Delta p = p_a - \Delta h \rho g \quad (9.9)$$

Kohoutem 16 udržujeme potřebný tlakový rozdíl mezi baňkami 1 a 8. Po odpaření asi 1 kg vody odpařování ukončíme. Přestaneme vyvíjet topnou páru, vypneme vývěvu a úplně otevřeme kohout 16. Tím se tlaky v baňkách 1 a 8 vyrovnají a voda z baňky 5 steče do baňky 1. Pak pomalu otevíráme zavzdušňovací kohout 19 a sledujeme vodní hladinu v baňce 1. Začne-li voda v trubici spojující baňku 1 s baňkou 5 rychle stoupat, pak to znamená, že jsme otevřeli kohout 19 příliš a je třeba jej ihned zavřít a vyčkat poklesu hladiny ve spojovací trubici; jinak hrozí nebezpečí vytlačení vody do baňky 5 a její stržení proudem nasátého vzduchu do kolena 6 a baňky 8, a tím zmaření celé předchozí práce. Čím rychleji se vyrovnává snížený tlak v aparatuře, tím rychleji ji můžeme zavzdušňovat. Po vyrovnání tlaku s tlakem atmosférickým vypustíme vodu zbylou v baňce 1 otevřením kohoutu 13

do zvážené nádoby. Pak vypustíme brýdový kondenzát otevřením kohoutu 12 a změříme jeho teplotu. Zvážíme kondenzát topné páry, vodu zbylou po odpařování a brýdový kondenzát.

Způsob vyhodnocení

Při doporučeném postupu měření je bilancování zjednodušeno tím, že specifická entalpie roztoku je rovna specifické entalpii vody. Specifické entalpie vody a páry vyhledáme v entalpické tabulce 32, která je zařazena na konci učebnice.

Účinnost ohřevu η_0 vypočteme podle rovnice (9.6). Za h_{r1} dosadíme specifickou entalpii vody při jejím bodu varu změřeném při odpařování na teploměru 14, za h_{r0} specifickou entalpii vody před jejím nasátím do odparky. Dodané teplo Q_{t2} vypočteme podle rovnice (9.4), ve které za h_{t1} dosadíme specifickou entalpii vodní páry při 100 °C a za h_{t2} entalpii vody při průměrné teplotě kondenzátu topné páry, jímaného během ohřevu.

Účinnost odpařování η vypočteme podle rovnice (9.5). Teplo Q_v dodané topnou párou během odpařování, vypočteme podle rovnice (9.4), teplo Q_1 podle rovnice (9.3), ve které má první člen nulovou hodnotu, protože při odpařování vody místo roztoku $h_{r2} = h_{r1}$. Hodnotu m_b vypočteme z rozdílu hmotnosti vody nasáté před odpařováním do baňky 1 a hmotnosti vody z této baňky vypuštěné po skončení odpařování. Hodnotu h_b najdeme v entalpické tabulce 32 pro vodní páru při teplotě odečítané během odpařování na teploměru 14.

Účinnost kondenzace η_k vypočteme podle rovnice (9.7) z hmotnosti brýdových par m_b a hmotnosti brýdového kondenzátu, vypuštěného po skončení odpařování z baňky 8. Výpočet je poněkud zkrácen zadržemi v aparatuře.

Skutečnou a minimální spotřebu chladicí vody vypočteme podle rovnice (9.8). Za h_k dosadíme entalpii kondenzátu, vypuštěného z baňky 12. Entalpii zjistíme podle změřené teploty kondenzátu. Za h_{v2} dosadíme specifickou entalpii chladicí vody, odváděné z hrdla 10 při teplotě měřené v nádobě, do které chladicí vodu vypouštíme. Při výpočtu minimální spotřeby dosadíme hodnotu h_k . Za h_{v1} dosadíme měrnou entalpii chladicí vody při teplotě vstupu, kterou můžeme změřit na teploměru ponořeném do čerstvě napuštěné vody v kádince. Pokud spotřebu vody měříme, porovnáme obě vypočtené hodnoty spotřeby s hodnotou změřenou.

Na závěr porovnáme tlak sytých par při teplotě varu měřené teplomě-

rem 14 s jejich tlakem změřeným na základě čtení h U-manometru podle rovnice (9.9).

KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Podle kterého fyzikálně chemického zákona lze vypočítat zvýšení bodu varu ideálního roztoku?
2. Podle kterého fyzikálně chemického zákona lze vyjádřit závislost tlaku sytých vodních par na teplotě?
3. Nakreslete schéma hmotnostní bilance odpařování a definujte ji slovně i matematickým zápisem.
4. Nakreslete schéma tepelné bilance ohřevu roztoku a odpařování; formulujte je slovně a matematicky.
5. Nakreslete schéma tepelné bilance kondenzace (nezapomeňte na teplo nezkondenzované brýdové páry, odvedené do vývěvy) a napište bilanční rovnici. Jak vypočítáte teplo odvedené v nezkondenzované páře do vývěvy?

9.2 HMOTNOSTNÍ BILANCE KRYSTALIZACE OCHLAZOVÁNÍM

Úkol: Vypočítejte přípravu roztoků z bezvodých solí a výtěžky jejich krystalizace ve formě hydrátů. Výpočty prakticky ověřte.

Teoretický úvod

Při výpočtech přípravy roztoků ke krystalizaci a bilance krystalizace použijeme k vyjádření složení roztoků relativní hmotnostní zlomky, protože rozpustnost tuhých látek bývá nejčastěji uváděna hmotností rozpuštěné látky ve 100 g rozpouštědla.

Výtěžek krystalizace ochlazováním, tj. hmotnost krystalů m_p , vypočteme z hmotnostní bilance krystalizace

$$m_p = mX_1 - mX_2 = m(X_1 - X_2) \quad (9.10)$$

kde m je hmotnost vody ve výchozím i matečném roztoku, X_1 – relativní hmotnostní zlomek krystalické složky ve výchozím roztoku, X_2 – relativní hmotnostní zlomek krystalické složky v matečném louhu.

Krystaluje-li z roztoku hydrát, můžeme jeho výtěžek m_{ph} přepočítat na výtěžek bezvodé soli m_{pb} podle vzorce vyplývajícího ze stechiometrie

$$m_{pb} = \frac{m_{ph}M_b}{M_h} \quad (9.11)$$

kde M_b je molární hmotnost bezvodé soli, M_h – molární hmotnost hydrátu.

Máme-li překrystalovat bezvodou sůl a krystaluje-li hydrát z jejího roztoku, je hmotnost vody m_1 ve výchozím roztoku větší než její hmotnost m_2 v matečném roztoku. Platí tedy

$$m_{pb} = m_1X_{1b} - m_2X_{2b} \quad (9.12)$$

kde X_{1b} a X_{2b} jsou relativní hmotnostní zlomky rozpuštěné bezvodé soli ve výchozím roztoku a v matečném louhu.

Hmotnost vody m_1 , potřebné k rozpuštění bezvodé soli, vypočteme z bilance vody

$$m_1 = m_h + m_2 \quad (9.13)$$

kde m_h je hmotnost vody vázané v hydrátu, kterou vypočteme z rovnice vyplývající ze stechiometrie

$$m_h = \frac{m_{ph}(M_h - M_b)}{M_h} \quad (9.14)$$

Jsou-li v tabulkách uvedeny rozpustnosti hydrátů (X_1, X_2), uplatníme při výpočtech hmotnosti $m_2 \equiv m$ rovnici (9.10)

$$m_2 = \frac{m_p}{X_1 - X_2} \quad (9.15)$$

K vypočtené hmotnosti vody m_2 připočteme hmotnost vody m_h vázané v hydrátu. Tato hmotnost je získána z hmotnosti m_{1b} bezvodé soli, rozpuštěné ve výchozím roztoku. Platí

$$m_h = \frac{m_{1b}(M_h - M_b)}{M_b} \quad (9.16)$$

Příklad zadání úlohy

Překrystalujte 1 kg bezvodé soli (např. síranu nebo uhličitanu sodného) a izolujte ho ve formě dekahydrátu s daným nebo zvoleným výtěžkem. Krystalizaci proveďte ochlazováním roztoku vhodné teploty na teplotu např. 20 °C a sestavte bilanční tabulku.

Jinou variantou může být příprava určeného množství hydrátu z bezvodé soli při daném nebo zvoleném výtěžku (v procentech) s možností volby vhodného teplotního intervalu, ve kterém bude krystalizace probíhat.