

## METODIKA ZVÝŠENÍ VYUŽITÍ TEPLA V CHEMICKÉ VÝROBNĚ

JAROSLAV POŽIVIL a VLADIMÍR HANTA

*Ústav počítačové a řídicí techniky, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6  
pozivilj@vscht.cz*

Došlo 19.4.12, přijato 22.8.12.

Klíčová slova: metodika zvyšování energetické účinnosti, simulační model, výroba kyseliny sírové

### Úvod

Příspěvek se zabývá zvyšováním energetické účinnosti chemické výroby. Vychází ze zkušenosti získaných při zvyšování efektivnosti výroby kyseliny sírové. Popisovaná metodika je natolik obecná, že ji lze použít i při intenzifikaci jiných chemických výroben.

V typické chemické výrobě je mnoho zdrojů energie stejně jako řada možností jejího využití. Existuje několik metod, jak optimalizovat využití energie, resp. odpadního tepla ve výrobním procesu. Ve stadiu projekce je např. rozšířená známá pinch analýza. V příspěvku jsme se zabývali postupem vhodným pro existující výroby, který by byl přístupný pro provozní inženýry.

### Metodika zvyšování energetické účinnosti chemické výroby

Navržená metodika je založena na systémovém přístupu, který bere do úvahy proces jako celek se všemi recykly hmoty a energie. Postupuje se po následujících krocích:

- (1) identifikace všech zdrojů energie (fyzikálních, fyzikálně-chemických a chemických) a všech spotřebičů energie;
- (2) dekompozice výroby do zón, kde se energie využívá a do zón, kde se energie bez užítka odvádí z výrobního procesu;
- (3) identifikace možností zlepšení energetické účinnosti výroby;
- (4) posouzení realizovatelnosti a ekonomické efektivnosti návrhů.

### Příklad použití navržené metodiky

Metodika zvyšování energetické účinnosti chemické výroby je ilustrována na příkladu výroby kyseliny sírové. Nejrozšířenější způsob získávání kyseliny sírové je

výroba ze síry kontaktním procesem s dvojitou konverzí. Výrobní proces je vysoce exotermní, a tak využití energie je důležitou částí ekonomie provozu.

Podle popsané metodiky je zapotřebí nejprve identifikovat všechna místa vzniku a spotřeby energie. V popisovaném procesu se energie uvolňuje při fyzikálních operacích (kompresi vzduchu), při fyzikálně-chemických procesech (ředění kyseliny, kondenzaci par) a při chemických reakcích (spalování síry, oxidace oxidu siřičitého, absorpce oxidu sírového). Reakční a další tepla se částečně využívají k výrobě páry (přibližně ze 60 %), značná část energie se však bez užítka odvádí z výrobního procesu chladicí vodou.

Podstatným krokem systémové analýzy výroby je její rozdělení na zónu spotřeby energie a zónu její produkce. Výrobu kyseliny sírové lze na základě této analýzy rozdělit na dvě části: na zónu I, kde se teplo využívá k výrobě páry a na zónu II, kde se teplo bez užítka odvádí chladicí vodou. Zóna I zahrnuje technologické uzly spalování síry a oxidace oxidu siřičitého, zóna II zahrnuje technologické uzly sušení vzduchu a absorpce oxidu sírového (viz obr. 1).

Třetím krokem metodiky je analýza vztahu obou zón. Rozborem provedeným např. podle obr. 1 lze nalézt tyto možnosti zvýšení energetické účinnosti výroby, resp. zvýšení výroby páry:

- 1) Zvýšení množství tepla uvolněného v zóně I.
- 2) Převedení zdrojů tepla ze zóny II do zóny I.
- 3) Snížení teploty proudů ze zóny I do zóny II.
- 4) Zvýšení teploty proudů ze zóny II do zóny I.
- 5) Snížení průtoku inertů v prouděch ze zóny I do zóny II.
- 6) Omezení ztrát tepla do okolí.
- 7) Využití tepla v zóně II.

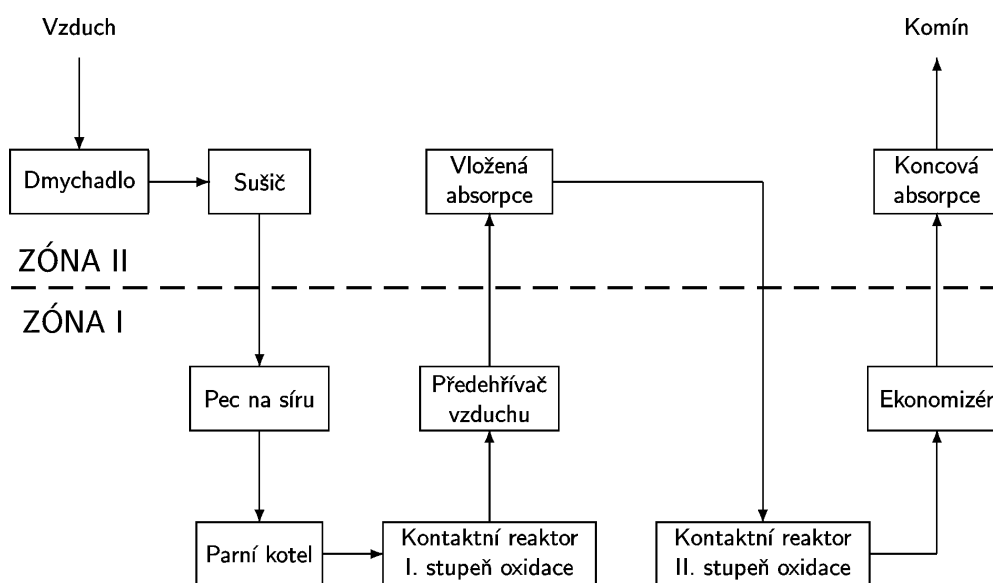
Závěrečným a nejdůležitějším krokem je analýza možností zvýšení stupně využití energie. Pro každou uvedenou možnost je třeba navrhnout technické řešení a diskutovat jeho realizovatelnost a ekonomickou efektivnost. Při vyhodnocování přínosu realizace jednotlivých možností lze použít výpočetní techniku. Je výhodné vytvořit simulační model, implementovat do něj navržené modifikace a provést potřebné simulační experimenty.

#### Zvýšení množství tepla uvolněného v zóně I

Spalování síry probíhá kvantitativně, takže zde není prostor pro zvýšení množství uvolněného tepla. Stupeň přeměny oxidace oxidu siřičitého je běžně vysoký: 99,5 až 99,7 % (i kvůli znečišťování ovzduší), takže je zde jen velmi malý prostor pro zvýšení množství uvolněného reakčního tepla. Takové zvýšení by však bylo možné jen za cenu nárůstu investičních nákladů na větší množství katalyzátoru a nárůstu provozních nákladů na pohon dmyhadla vzhledem k větší tlakové ztrátě.

#### Převedení zdrojů tepla ze zóny II do zóny I

Jednou z možností je zapojení dmyhadla za sušič. Při používaném zapojení (dmyhadlo na začátku procesu,



Obr. 1. Dekompozice výroby kyseliny sírové do zón

následuje sušící věž) má vzduch na výstupu ze sušiče teplotu nátokové kyseliny, která se udržuje na konstantní hodnotě. Kompresní teplo (přibližně 1 MW ve výrobně kyseliny sírové o kapacitě 900 t/den) je odváděno ze sušičích okruhů chladičí vodou. Po převedení dmychadla za sušič zvyšuje kompresní teplo teplotu vzduchu do pece na spalování síry a následně výrobu páry. Současně se snižují nároky na chlazení sušinové kyseliny. Zavedení tohoto opatření brání obavě z poškození dmychadla korozí v případě selhání odlučovačů mlhy (demisterů).

#### Snížení teploty proudů ze zóny I do zóny II

Konverzní plyn z prvního stupně oxidace se vede do vložené absorpce při teplotách 180–220 °C (obvykle 200 °C). Plyn z druhého stupně oxidace se vede do koncové absorpce při obdobných teplotách. Naše výpočty rosného bodu konverzního plynu ukazují, že lze snížit teplotu plynu na 140–160 °C, aniž by byly tepelný výměník a ekonomizér ohroženy korozí kapičkami kyseliny sírové.

#### Zvýšení teploty proudů ze zóny II do zóny I

Další možností zlepšení energetické účinnosti výroby je zvýšení teploty vzduchu ze sušičí věže a teploty plynu z vložené absorpční věže. Zvýšení teploty nátokových kyselin z 50 °C na 60–70 °C vede k vyšší teplotě plynu za pecí, resp. k nižším nárokům na předehřívání plynu na reakční teplotu před druhým stupněm oxidace. Obě opatření vedou ke zvýšení výroby páry a snížení nároků na chlazení kyselin.

#### Snížení průtoku inertů v prouděch ze zóny I do zóny II

Z energetického hlediska by bylo výhodné zpracovávat plyn s největší možnou koncentrací oxidu siřičitého. Vzduch totiž vstupuje do procesu při atmosférické teplotě (ve zkoumané výrobně je průměrná roční atmosférická teplota 9 °C) a jako reakční plyn opouští zónu I při přibližně 200 °C. S klesajícím množstvím dusíku v plynu se snižuje množství tepla odváděné konverzním plynem ze zóny I (kde se využívá) do vložené a koncové absorpce (do zóny II, kde se bez užítu odvádí chladičí vodou). Zvyšování koncentrace oxidu siřičitého v reakčním plynu je však limitováno úsilím o co nejvyšší konverzi  $\text{SO}_2$  na  $\text{SO}_3$  (a o co nejnižší znečištění atmosféry), která při vyšší koncentraci klesá. Úvahy o spalování síry v čistém kyslíku nebo v plynu obohaceném kyslíkem se ukázaly jako ekonomicky neefektivní.

#### Omezení ztrát tepla do okolí

Ztráty tepla do okolí představují v běžné výrobně kyseliny sírové přibližně 4 % dostupné energie. Zařízení a potrubí v uzlech spalování síry a oxidace oxidu siřičitého jsou již tepelně izolována, takže možné přínosy jsou velmi malé. Uzly sušení vzduchu a absorpce izolovány nejsou, ale to ani není žádoucí, když se zde teplo odvádí bez užítu chlazením. Potrubí s plynem o teplotě okolo 200 °C se obvykle neizoluje. Jedná se o poměrně dlouhá potrubí vedoucí plyn mezi zónami I a II. Naše výpočty ukázaly, že jejich izolací by bylo možné získat nezanedbatelné množství tepla, přibližně 1 % dostupné energie.

## Využití tepla v zóně II

Využití tepla v zóně II, která zahrnuje uzel sušení vzduchu a uzel absorpce oxidu sírového, se vzhledem k jeho množství jeví jako nejvýznamnější možné opatření. Chladicí voda z absorpčních okruhů se však ohřívá jen na nízké teploty a využití nízkopotenciálního tepla je obecně obtížné. Pro využití tepla by bylo třeba provozovat absorpci při výrazně vyšších teplotách. To vyžaduje speciální zařízení využívající "korozní okénko" při určitých teplotách a koncentracích (patentovaný MECS Heat Recovery System<sup>1</sup>, který se však zatím nerozšířil).

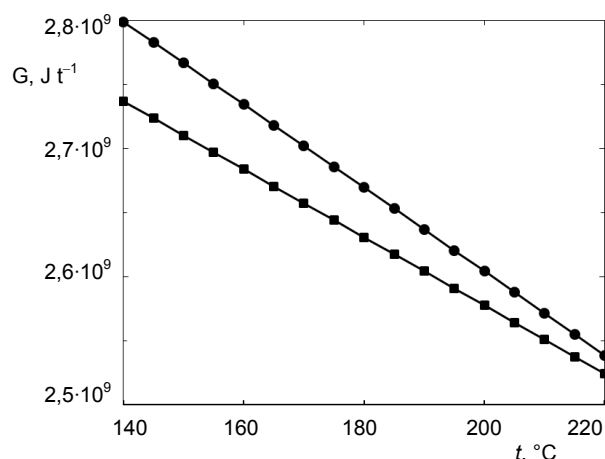
## Výpočetní prostředky

K provedení entalpické bilance chemické výroby a k vyhodnocení jednotlivých návrhů a modifikací výrobního procesu existuje celá řada vhodných nástrojů. Autoři upřednostňují simulační program HYSYS, resp. Aspen HYSYS, který patří mezi celosvětově nejrozšířenější simulační programy, a který je určen především pro statickou simulaci kontinuálních chemických procesů. Vzhledem k rozsáhlé databázi fyzikálně-chemických dat a fyzikálně-chemických modelů je vhodný i pro samostatné entalpické výpočty. Často ani není třeba sestavovat modely jednotlivých aparátů, ale vystačí se s modelováním proudů. Program je vybavený uživatelsky příjemným grafickým prostředím a inteligentní expertní nápovědou, takže jeho obsluha je snadná. Doba potřebná k vyškolení uživatele činí jen několik desítek hodin. Jeho používání tak není vyhrazeno expertům, ale je vhodné pro všechny techniky.

## Výsledky výpočtů

Přínos opatření na zvýšení energetické účinnosti výroby kyseliny sírové byl vyčíslen pro výrobu o kapacitě 900 t 100% kyseliny sírové (monohydrátu) denně. Kyselina sírová se vyrábí ze síry kontaktním procesem s technologií dvojité konverze. První stupeň oxidace zahrnuje tři lůžka vanadového katalyzátoru, druhý stupeň oxidace má jednu etáž katalyzátoru. Reakčním teplem z prvního stupně se ohřívá na reakční teplotu plyn z vložené absorpce a předeřívá se vysušený vzduch do pece. Reakční teplo z druhého stupně se využívá v ekonomizéru. Výpočty byly provedeny se simulačním modelem vytvořeným v prostředí simulačního programu HYSYS. Ve zkoumané výrobě se produkuje mírně přehřátá pára o tlaku 2,03 MPa a teplotě 220–230 °C. Pro snadné porovnání a zobecnění výsledků neprezentujeme výrobu páry v tunách, ale v J/1 t 100% kyseliny sírové.

Obr. 2 ukazuje účinek snížení teploty plynu z prvního stupně oxidace do vložené absorpce a účinek snížení teploty plynu z druhého stupně oxidace do koncové absorpce. Snížení teploty plynu do vložené absorpční věže z 200 °C na 150 °C vede ke zvýšení výroby páry o 6,2 %. Snížení teploty plynu do koncové absorpční věže z 200 °C na

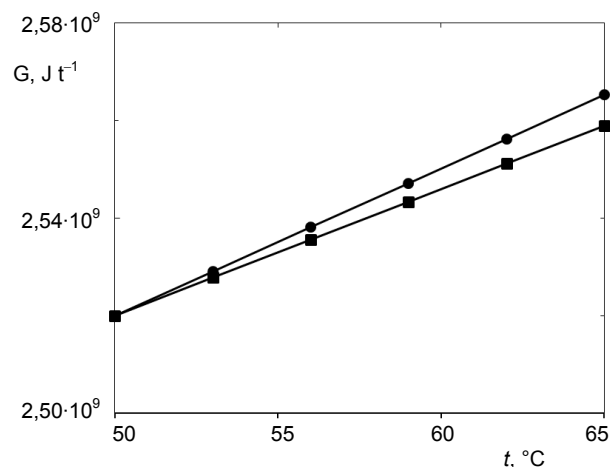


Obr. 2. Vliv snížení teploty proudů plynu ze zóny I do zóny II; ● vliv teploty plynu do vložené absorpce, ■ vliv teploty plynu do koncové absorpce,  $t$  – teplota,  $G$  – výroba páry vztahovaná na 1 t 100 % kyseliny sírové

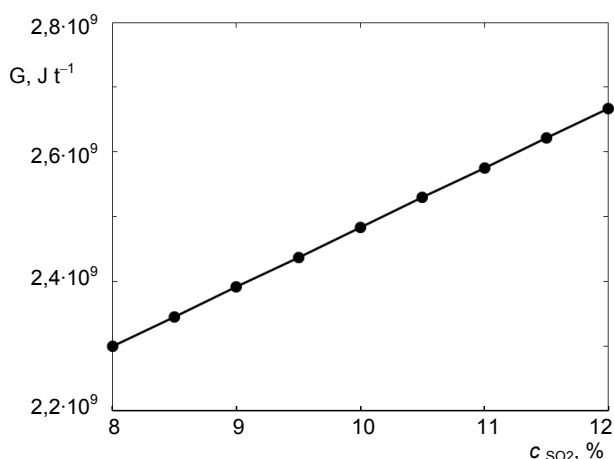
150 °C vede ke zvýšení výroby páry o 5,1 %. Obě opatření dohromady umožňují zvýšení výroby páry o 11,3 %.

Obr. 3 znázorňuje účinek zvýšení teploty vzduchu ze sušící věže a teploty plynu z vložené absorpce na výrobu páry. Zvýšení teploty vzduchu ze sušící věže z 50 °C na 65 °C vede ke zvýšení výroby páry o 1,8 %. Zvýšení teploty plynu z vložené absorpce z 50 °C na 65 °C vede ke zvýšení výroby páry o 1,5 %. Obě opatření dohromady umožňují zvýšení výroby páry o 3,3 %.

Obr. 4 znázorňuje vliv koncentrace oxidu siřičitého v reakčním plynu (v plynu za peci na síru, koncentrace je přepočtena na nulovou konverzi) na výrobu páry. Zvýšení koncentrace oxidu siřičitého 10 % na 11,5 % vede ke zvýšení výroby páry o 5,6 %.



Obr. 3. Vliv zvýšení teploty proudů plynu ze zóny II do zóny I; ● vliv teploty plynu ze sušiče, ■ vliv teploty plynu z vložené absorpce,  $t$  – teplota,  $G$  – výroba páry vztahovaná na 1 t 100 % kyseliny sírové



Obr. 4. Vliv snížení průtoku inertů v prouděch ze zóny I do zóny II;  $c_{\text{SO}_2}$  – koncentrace oxidu siřičitého,  $G$  – výroba páry vztážená na 1 t 100 % kyseliny sírové

## Závěr

Príspevek se zabývá návrhem obecněji použitelné metodiky zvyšování energetické účinnosti chemické výroby. Metodika je ilustrována na příkladu výroby kyseliny sírové. Výsledky ukazují, že je možné realizovat nízkonákladová opatření ke zvýšení energetické účinnosti výroby. Snížení teploty proudů plynu ze zóny I do zóny II umožňuje zvýšení výroby páry o 11,3 %. Zvýšení teploty proudů plynu ze zóny II do zóny I umožňuje zvýšení výroby páry o 3,3 %. Snížení průtoku inertů v prouděch ze zóny I do zóny II umožňuje zvýšení výroby páry o 5,6 %. Benefity ze zvyšování energetické účinnosti představuje snížení výrobních nákladů a zlepšení ochrany životního prostředí.

## LITERATURA

1. McAlister D. R., Ziebold S. A.: US Patent 4,576,813, 1986.

**J. Poživil and V. Hanta** (*Department of Computer and Control Engineering, Institute of Chemical Technology, Prague*): **Methodology of Enhancing Heat Utilization Efficiency in a Chemical Plant**

There are many methods of minimizing energy consumption in chemical processes at the design stage such as the well-known pinch analysis. We have tried to create a methodology suitable for existing plants and their site engineers. First, all the energy sources and consumers are identified. Then the plant is divided into parts where waste heat is utilized and those where the waste heat is released. The opportunities of improving energetic efficiency are identified. Finally, feasibility of measures and economic effectiveness are assessed. The use of the methodology is illustrated on the example of a sulfuric acid plant. To advantage the simulation program HYSYS with a simple user-friendly graphics interface can be used for evaluation of different modifications of the process.