

přilíš výrazné důsledky na přesnost projekce reaktoru. Teplota v ose trubky totiž souvisí jen málo se střední teplotou směsi, která je rozhodující pro rychlost chemické reakce. Osová teplota se týká jen velmi malého objemu katalyzátoru, zatímco velký podíl katalyzátoru poblíž stěny trubky má teplotu mnohem bližší střední, bilanční teplotě.

#### Jiné možné parazitní efekty

Charakteristickým rysem teplotního profilu naměřeného v ose trubky je dlouhá část s nízkou střední teplotou. Toto snížení teploty v ose trubky by mohlo být způsobeno i vedením tepla termoizolačnou trubkou a drátem termoizolánu, protože termoizolační trubka je vestavěna ve víku trubky, které je ochlazováno studenou směsí a dráty termoizolánu vycházejí do chladného okolí trubky. Modelování vedení tepla trubkou a dráty termoizolánu prokázalo, že vliv podélného vedení tepla je zanedbatelný. Výsledky zde neuvádíme. Druhou příčinou snížení osové teploty by mohla být skutečnost, že reakční směs nevstupuje do trubky v ose trubky, ale asymetricky. Tím by se mohla vytvořit v části trubky méně protékající oblast. Její modelování je však obtížné pro nedostatek údajů o charakteru toku v této oblasti a o rychlosti přenosu

tepla v ní. I když by bylo možné sestavit model s asymetrickým vstupem, výsledek by byl asi jen spekulativní, protože by bylo nutné vycházet z mnoha odhadů.

#### Závěr

Výsledky dokazují, že dvourozměrný model umožňuje vysvětlit naměřené závislosti teploty v ose trubky na délce trubky, je tedy zřejmé, že dvourozměrný model je dokonalejší formou modelu parního reformingu. Pro projektantskou praxi je však patrně zbytečné tento model zavádět, protože zvýšení jemnosti popisu je překryto vlivem nejistých parametrů zadávaných do výpočtů.

#### Literatura

1. Stehlik P., Šika J., Běhar L.: Chem. prům. 36, 342 (1988). —
2. Stehlik P., Šika J., Běhar L.: Chem. prům. 36, 454 (1988). —
3. Šika J., Stehlik P., Běhar L.: Chem. prům. 36, 512 (1988). —
4. Michel M.: Diplomová práce, VŠCHT, Praha, 1986. —
5. Horák J., Prágrův M., Běhar L.: Chem. prům. 35, 231 (1985). —
6. Kulkarni B. D., Doraiswamy L. K.: Cat. Rev. — Sci. Eng. 22, 431 (1984). —
7. Pexidr V., Černý J., Pašek J.: Chemical Reaction Engineering, Proceedings of the fourth European Symposium, Brussels, September 1968, Pergamon Press, Oxford, New York 1971. —
8. Pašek J., Pexidr V.: Chem. prům. 17, 129 (1961). —
9. Pašek J., Pexidr V.: Chem. prům. 17, 1 (1967).

## Vliv využití kapacity ethylenové jednotky na měrnou spotřebu energie

Jan Bartoň,

Chemopetrol, k.á.o. Výzkumný ústav anorganické chemie, Ústí nad Labem,

Jaroslav Růžička, Vlastimil Oháňka,

Chemopetrol, k. p. Chemické závody ČSSP, Látovna

547.313.2  
68.012.37

Redakce došlo 16. 7. 1987

*V práci je na příkladě ethylenové jednotky ukázán vliv prosazení na měrnou spotřebu páry při-  
váděné změjšku do parního systému výroby. Je  
ukázáno, že měrná spotřeba páry závisí nejen na  
využití kapacity výroby, ale ovlivňuje ji i prů-  
měrné zatížení jednotlivých pyrolyzních pecí.*

#### Úvod

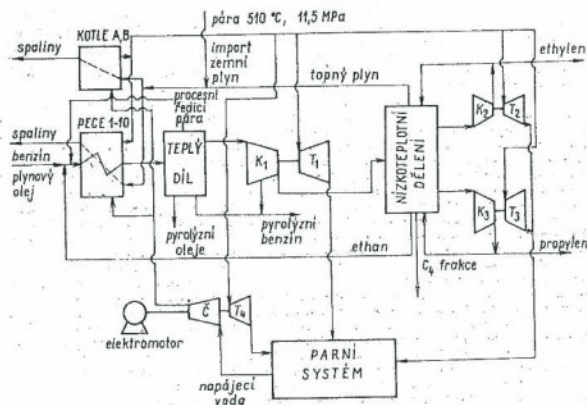
Výrobní linka je projektována na jistou kapacitu, pro niž jsou dimenzovány rozměry aparátů, výkonnost čerpadel, kompresorů ap. Je-li kapacita výrobní linky v některé části nevyužita, může to způsobit v některých případech vzrůst měrných spotřeb energií na jednotku finálního produktu. Jde zejména o zhoršení efektivity čerpání médií ve výrobní. Plynná média jsou obvykle dopravována turbokompresory. Ty při dopravování menšího množství plynu, než pro které byly vyprojektovány, pracují v režimu přepouštění části vytlačované tekutiny na sání tak, aby v kompresoru nevznikaly rázy. U odstředivých čerpadel navržených na jistý výkon je třeba při nižších průtocih škrtit na výtlaku, pokud nejsou opatřena regulační výkonu čerpadla regulací otáček. Zvýšení měrných spotřeb energií u výroben, v nichž se využívá

teplo exotermních reakcí pro výrobu páry nebo teplo produktů endotermních reakcí pro výrobu páry, je způsobeno nutností zvýšit dodávku páry z externích zdrojů mimo vlastní výrobní linku při poklesu prosazení výroby.

U výměníků, v nichž se vyměňuje teplo mezi technologickými proudy či se technologické proudy chladí vodou nebo ohřívají párou, se obvykle snížení průtoku výměnkem projeví pozitivně, a to proto, že se pro žádanou technologickou teplotu proudy za výměnkem spotřebuje relativně méně chladící vody nebo páry. V literatuře<sup>1)</sup> se např. uvádějí tzv. energetické charakteristiky kotlů na výrobu páry, kde se snížení výkonu kotle promítá do zvýšení účinnosti využití dodaného tepla do kotle spálením paliva, t. j. snižuje se měrná spotřeba paliva na jednotku vyrobené páry.

Podobné problémy je třeba řešit při intenzifikaci výrobní linky nad projektovanou kapacitu, čímž se zabývá práce<sup>2)</sup>.

V předložené práci se budeme zabývat měrnou spotřebou energie v ethylenové jednotce, a to v její tzv. teplé části zahrnující pyrolyzní pece a parní systém. Na tomto konkrétním příkladě ukážeme vliv prosazení na měrnou spotřebu tepla vztaženou na



Obr. 1. Schéma ethylenové jednotky

hmotnostní jednotku zpracovávaných surovin a uká-  
že možnosti racionalizovat měrnou spotřebu tepla  
v případě, že kapacita ethylenové jednotky není plně  
využívána.

### Rozebíráme problém

Na obrázku 1 je schematicky znázorněna ethyleno-  
vá jednotka. Suroviny se ze zásobních tanků (v pří-  
padě ethanu se pyrolyzují tzv. vratný ethan vzniklý  
pyrolyzou benzínu nebo plynového oleje) vedou do  
pece, smísí se s procesní ředící parou a zahřejí se spá-  
lením topného plynu na teplotu kolem 800 °C, při níž  
proběhne pyrolyza. Reakční produkty spolu s procesní  
ředící parou vytvářejí tzv. pyrolyzní plyn, který se  
z pyrolyzní pece nejprve vede do kotle na odpadní  
teplo (ten je součástí pyrolyzního plynu, v němž se  
ochladí na asi 450 až 500 °C a jeho chlazením se vyrábí  
velmi vysokotlaká pára. V teplém díle se z pyrolyzního  
plynu oddělí pyrolyzní oleje, pyrolyzní benzin a  
procesní ředící pára, která se opět recykluje do pece.  
Z teplého dílu odchází plyn obsahující zejména  
uhlovodíky C<sub>1</sub>—C<sub>6</sub>, který se stlačí kompresorem K<sub>1</sub>,  
přičemž zkondenzují nejlehčí podíly pyrolyzního  
benzínu. Zbytek se vede do nízkoteplotního dělení k  
izolaci ethylenu a propylenu. Oba tyto olefiny se současně  
recyklují v chladicích okruzích ethylenu a propylenu.  
V nízkoteplotním dělení se dále oddělí topný plyn  
(převážně methan), který se spaluje v pyrolyzních  
pecích, dále ethan, který se recykluje jako výchozí  
surovina pro pyrolyzu, a frakce C<sub>4</sub>, z níž se izoluje  
1,3-butadien (tato izolace není součástí ethylenové  
jednotky).

Velmi vysokotlaká pára se používá k pohonu čtyř  
turbín T<sub>1</sub>—T<sub>4</sub>, pohánějících kompresory pyrolyzního  
plynu K<sub>1</sub>, ethylenu K<sub>2</sub>, propylenu K<sub>3</sub>. Čerpadlo Č  
dopravuje napájecí vodu do kotlí na výrobu páry A,  
B a pece 1 až 10. Podrobnější informace o parním  
systému ethylenové jednotky jsou uvedeny v práci<sup>10</sup>.

Podle typu (benzín, plynový olej, ethan) a množství  
zpracovávané suroviny, délce provozu pece (ovlivňu-

jící zanesení teplosměnných ploch koksovými úsa-  
dami) se může na jediné peči vyrábět 20 až 40 tun  
páry za hodinu. Kotle A, B mají kapacitu 100 tun  
páry za hodinu.

Měrná spotřeba energie vztážená na tunu vyrobe-  
ného ethylenu činí podle literatury<sup>8)</sup> asi 1000 kWh,  
podle práce<sup>9)</sup> 4000 až 9000 kWh. Měrná spotřeba  
energie nalezená (v práci<sup>7)</sup> činí asi 1200 kWh na tunu  
vyrobeného ethylenu. V tomto případě se má na mysli  
pouze energie dodaná do ethylenové jednotky z exte-  
rních zdrojů, tj. uvažuje se pouze importovaný zemní  
plyn, elektrická energie a pára. Z hodnoty 1200 kWh  
na tunu ethylenu nalezené (v práci<sup>7)</sup> tvoří asi 60 %  
právě import zemního plynu.

V předložené práci se zaměříme na tu část energie,  
která je dodávána do kotlí A, B, v nichž se vyrábí  
menší část (asi 30 až 40 %) celkem vyrobené velmi  
vysokotlaké páry potřebné pro pohon turbín T<sub>1</sub>—T<sub>4</sub>  
(obr. 1). Kotle A, B spalují podstatnou část zemního  
plynu importovaného do jednotky, a proto snížení  
měrné spotřeby tepla vztážené na jednotku zpra-  
cované suroviny a vyrobené v kotlích A, B má zásadní  
význam pro snížení celkové měrné spotřeby energie  
v ethylenové jednotce.

### Závislost měrné spotřeby velmi vysokotlaké páry vyrobené v kotlích A, B na prosazení výroby

Ve zprávě<sup>3)</sup> jsou uvedeny výsledky bilančních mě-  
ření v parním systému ethylenové jednotky. Tabulka  
I shrnuje hodnoty průtoků uhlovodíků do pece (ben-  
zín: plynový olej: ethan = 4 : 4 : 1) a vyrobené velmi  
vysokotlaké páry po vyrovnání naměřených dat  
programem KOMAT<sup>4)</sup>. V příkladě 3 z tabulky I byla  
mimo provoz turbína pohánějící čerpadlo napájecí  
vody Č (obr. 1) a toto čerpadlo bylo poháněno elek-  
tromotorem. Naměřené hodnoty výroby páry po vy-  
rovnání byly přepočteny u výroby kotlí A, B a celko-  
vé výroby páry za podmínky, že je v provozu turbína  
T<sub>4</sub>, pohánějící čerpadlo napájecí vody. Původně na-

Tabulka I

Vyrované hodnoty hmotnostních průtoků suroviny pro pyrolyzu ( $m_{\text{uhl.}}$ ), průtoků velmi vysokotlaké páry z kotlí A, B ( $m_{\text{A,B}}$ ), z pecí ( $m_p$ ), celkové výroby páry ( $m$ ) a teploty spalín z pecí ve komině ( $t_k$ )

a) $m_{\text{uhl.}}$ ( $\text{kg h}^{-1}$ )	počet pecí v provozu	průměrný nástřik na pec ( $\text{kg h}^{-1}$ )	$m_p$ ( $\text{kg h}^{-1}$ )	$m_{\text{A,B}}$ ( $\text{kg h}^{-1}$ )	$m$ ( $\text{kg h}^{-1}$ )	$t_k$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
1 191600	8	23950	225800	139180	355980	210,6
2 179510	8	22439	220060	122980	343040	201,8
3 153800	7	21971	179076	137496(124280) <sup>b)</sup>	316560(303350) <sup>b)</sup>	196,2
4 130140	6	21690	140910	106410	296550	195,5

a) poměr hmotnostních průtoků benzínu: plynovému oleji: ethanu do pyrolyzy přibližně 4 : 4 : 1.

b) naměřené hodnoty po vyrovnání jsou uvedeny v závorce; ve sloupci je uvedena hodnota předpočítaná pro případ provozu turbíny pohánějící turbonapáječku tak, aby byly v tabulce konstantní údaje.

Tabulka II

Vyrované vstupní hodnoty pro výpočet celkového součinitele prostupu tepla kótlů na odpadní teplo  $k$

	$m_{\text{sp}}$ ( $\text{kg h}^{-1}$ )	$t_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$t_2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$t_3^a$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$X^b$ ( $\text{m}^2$ )	$\Delta t_{\text{te}}$ ( $\text{K}$ )	$Q'$ /10 <sup>6</sup> ( $\text{kJ h}^{-1}$ )	$k$ ( $\text{kJ h}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ )
1	341720	809,9	485,09	321,3	1440	297,2	3,3298	777,7
2	326200	819,6	498,9	321,3	1440	310,9	3,1383	700,7
3	270411	811,9	490,4	321,3	1260	301,9	2,6081	685,7
4	232680	802,0	498,1	321,3	1080	305,9	2,1213	646,3

a) průměrný tlak velmi vysokotlaké páry byl 11,5 MPa

b) průměrná hodnota výměnné plochy kótlů na odpadní teplo činí 180 m<sup>2</sup> na 1 pec

měřené resp. vyrované hodnoty výroby páry v kotlicích A, B a celkové výroby jsou u příkladu 3 uvedeny v závorce.

Jak již bylo zmíněno výše, pára z pecí je vyráběna v tzv. kotlicích na odpadní teplo. V tabulce II jsou obsaženy vyrované hodnoty průtoků pyrolyzního plynu z pecí, jeho průměrná teplota na vstupu  $t_1$  a výstupu  $t_2$  z kótlů na odpadní teplo, teplota na straně vyráběné páry  $t_3$  a výkon kotle  $Q'$  vypočtený podle vztahu

$$Q' = m_{\text{sp}} c_p (t_1 - t_2) \quad (1)$$

Pro kotle na odpadní teplo je vypočtena hodnota součinitele prostupu tepla  $k$ , jestliže průměrná výměnná plocha kotle na odpadní teplo na jedné peci činí 180 m<sup>2</sup>.

$$k = Q' \ln \frac{t_1 - t_3}{t_2 - t_3} / ((t_1 - t_2) F) \quad (2)$$

Střední měrné teplo pyrolyzního plynu je uvažováno v souladu s výsledky<sup>3)</sup> entalpičkových bilancí kotle na odpadní teplo  $c_p = 3 \text{ kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ .

Z tabulky II pozorujeme, že měření probíhala s různě zanesenými kotli na odpadní teplo (součinitel prostupu tepla mezi případy 1 a 4 z tabulky II se liší asi o 17 %). Různě znečištěné výměnné plochy kótlů na odpadní teplo by nutně zkreslily výsledky výpočtu měrných spotřeb tepla. Proto byla výroba páry v pecích předpočtena na stejnou hodnotu  $k = 777,7 \text{ kJ h}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ .

Pro teplotu  $t_2$  platí

$$t_2 = \frac{t_1 - t_3}{e^{(kF)/(m_{\text{sp}}c_p)}} + t_3 \quad (3)$$

a pro předpočet výroby velmi vysokotlaké páry z pecí pro  $k = 777,7 \text{ kJ h}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$  platí

$$m_p/m_k = (t_1 - t_2) / (t_1 - t_2) \quad (4)$$

kde hodnoty označené čárkou byly vypočteny pro  $k = 777,7 \text{ kJ h}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ . Výsledky předpočtu jsou uvedeny v tabulce III.

Údaje z tabulky III byly použity pro výpočet měrné spotřeby páry vyráběné v kotlicích A, B, vztahené na jednotku nástřiku suroviny. Výsledky výpočtů jsou uvedeny v tabulce IV.

Měrná spotřeba tepla  $q$  je vypočtena pro účinnost kótlů A, B 90 %. Teplo potřebné na výrobu tuny páry o tlaku 11,5 MPa a teplotě 510  $^{\circ}\text{C}$  z napájecí

Tabulka III

Výsledky předpočtu výroby páry v pecích a kotlicích A, B pro  $k = 777,7 \text{ kJ h}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$

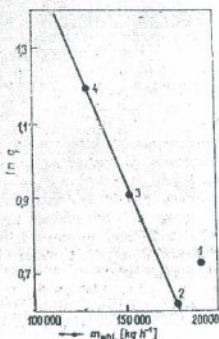
	$m$ ( $\text{kg h}^{-1}$ )	$t_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$t_2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$m_p^a$ ( $\text{kg h}^{-1}$ )	$m'_{\text{A,B}}$ ( $\text{kg h}^{-1}$ )
1	355 980	485,09	485,09	225 800	130 180
2	343 040	498,9	479,9	233 097	109 942
3	316 560	490,4	481,9	191 600	124 957
4	296 550	498,1	465,6	155 979	140 570

Tabulka IV

Měrná spotřeba páry  $S$  vyrobené v kotlicích A, B a měrná spotřeba tepla  $q$  na výrobu páry v kotlicích A, B vztahené na tunu suroviny pro pyrolyzu

	$m_{\text{uhl.}}$ ( $\text{kg h}^{-1}$ )	$S$ ( $\text{t t}^{-1}$ )	$q$ ( $\text{GJ t}^{-1}$ )	$\ln q$
1	191 600	0,879	2,067	0,720
2	179 510	0,818	1,863	0,622
3	153 800	0,813	2,472	0,905
4	130 140	1,080	3,268	1,190





Obr. 2. Závislost  $\ln q$  na  $m_{nhl}$  (číslování bodů shodné s tabulkami I—IV)

vody o teplotě 150 °C a tlaku 11,5 MPa pak při účinnosti kotlá 90 % činí<sup>6)</sup> 3,04 GJ t<sup>-1</sup>.

Výsledky měrných spotřeb  $S$  a  $q$  z tabulky IV podávají zajímavou informaci o vlivu prosazení na měrnou spotřebu energie. Jestliže jsou pyrolyzní pece zatíženy přibližně stejným množstvím suroviny (příklady 2 až 4 z tabulky I až IV), potom měrná spotřeba  $q$  vykazuje s rostoucím prosazením jednotky klesající trend. V případě 1 z tabulek I až IV bylo zvýšené prosazení jednotky dosaženo zvýšením průměrného nástřiku na pece proti příkladu 2 asi o 1500 kg h<sup>-1</sup>. V tomto případě měrná spotřeba tepla  $q$  u příkladu 1 ve srovnání s příkladem 2 vzrostla.

Tento jev souvisí s experimentálně ověřeným vztahem uvedeným ve zprávě<sup>7)</sup>, podle něhož se energetická náročnost výroby velmi vysokotlaké páry na peči zvyšuje se zvyšujícím se prosazením uhlovdíků pečí tj. s klesající účinností využití tepla dodaného do pece spálením plynu. Snížení účinnosti využití tepla spalin při vyšším průměrném zatížení pečí je patrné i z komínové teploty spalin z pečí, která se snižuje s klesajícím průměrným zatížením pečí (viz tabulka I, sloupce  $t_K$ ).

Vztah mezi měrnou spotřebou tepla  $q$  a prosazením ethylenové jednotky vykazuje v souřadnicích  $\ln q$  versus  $m_{nhl}$  lineární závislost, z níž se vymyká výrazné bod 1 z důvodů již výše diskutovaných (obr. 2).

### Závěr

V ethylenové jednotce klesá měrná spotřeba tepla, dodávaného z externích zdrojů páry, na tunu zapracovan

vané suroviny, jestliže se prosazení jednotky zvyšuje tak, aby průměrné zatížení pečí bylo přibližně konstantní. V případě, že se zatížení jednotky zvyšuje při konstantním počtu paralelně zapojených pečí, měrná spotřeba tepla na tunu zpracované suroviny se zvyšuje. Z tohoto výsledku vyplývá, že i při nevyužívání kapacity ethylenové jednotky je výhodné provozovat maximální počet paralelně zapojených pečí. Tyto závěry vyplývající z globálního pohledu byly potvrzeny experimentálním stanovením energetických charakteristik pyrolyzních pečí uvedených v práci<sup>7)</sup>. I při nevyužívání kapacity ethylenové jednotky je možné zásadním způsobem snížit měrné spotřeby tepla, jsou-li využity poznatky systémového přístupu k problému.

### Seznam symbolů

$A, B$	— kotle na výrobu velmi vysokotlaké páry
$c_p$	— střední měrné teplo pyrolyzního plynu [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\dot{Q}$	— čerpadlo napájecí vody
$F$	— výmětná plocha kotlá na odpadní teplo [m <sup>2</sup> ]
$K$	— kompresor
$k$	— součinitel prostupu tepla v kotlích na odpadní teplo [kJ h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$m_{A,B}$	— hmotnostní průtok páry vyrobené v kotlicích $A, B$ , [kg h <sup>-1</sup> ]
$m_{sp}$	— hmotnostní průtok pyrolyzního plynu [kg h <sup>-1</sup> ]
$m_n$	— hmotnostní průtok páry vyrobené v pečích v kotlicích na odpadní teplo [kg h <sup>-1</sup> ]
$m_{nhl}$	— hmotnostní průtok uhlovdíků do pyrolyzních pečí [kg h <sup>-1</sup> ]
$m$	— celkový hmotnostní průtok velmi vysokotlaké páry
$Q'$	— výkon kotlá na odpadní teplo [kJ h <sup>-1</sup> ]
$q$	— měrná spotřeba tepla v kotlicích $A, B$ vztažená na jednotku nástřiku uhlovdíků do pečí [GJ t <sup>-1</sup> ]
$S$	— měrná spotřeba velmi vysokotlaké páry vyrobené v kotlicích $A, B$ vztažená na jednotku nástřiku uhlovdíků do pečí [t t <sup>-1</sup> ]
$t$	— teplota [°C]
$t_K$	— teplota spalin z pečí v komíně [°C]
$\Delta t_K$	— logaritmický střed rozdílů teplot [K]

### Literatura

1. Marocki J.: *Hospodárná výroba tepla a elektřiny v teplárnách*, SNTL, Praha 1978. — 2. Madron F.: *Chem. prům.* 35, 226 (1985).
3. Novotný P., Bartoň J.: *Racionalizace parního systému ethylenové jednotky (předběžná zpráva)*, VÚAnCh, Ústí nad Labem 1985. — 4. Madron F.: *Chem. prům.* 35, 517 (1985). — 5. Novotný P., Bartoň J.: *Použití úspor energií v teplém dílu výroby ethylena a propylenu*, VÚAnCh, Ústí nad Labem 1983. — 6. Rivkin S. L., Alexandrov A. A.: *Termodynamické svojstva vody i roztaveného para*, Energoatomizdat, Moskva 1984. — 7. Bartoň J., Novotný P.: *Racionalizace parního systému ethylenové jednotky (závěrečná zpráva)*, VÚAnCh, Ústí nad Labem 1986. — 8. Garbe E.: *Chem. prům.* 35, 336 (1985). — 9. Patrikjevna N. J.: *Chim. prom. za rubežem 11,1* (1984). — 10. Bartoň J., Nějemník J., Ratiška J.: *Chem. prům.* 37, 57 (1987).