

Aplikácia maticového modelu hydrocyklónu pri úprave uhlia

Slavomír Hredzák¹, Štefan Jakabský¹ a Michal Leško²

Application of the Matrix Model of Hydrocyclone in Coal Preparation

The paper describes mathematical model of the "water only" cyclone function on the basis of experimental data. The experiments have been realized in a pilot plant cyclone. The model was verified in the case of steam coal preparation from the Cígeľ, Handlová and Nováky localities. The obtained results confirmed that the applied model is suitable for the design of cyclones parameters under the operating condition.

Key words: water only cyclone, steam coal preparation, matrix model.

Úvod

V súčasnosti sa vo svete venuje veľká pozornosť znečisteniu ovzdušia oxidom siričitým, úletmi, ako aj ďalšími splodinami, ktoré vznikajú pri spaľovaní energetického uhlia. Tento stav vyvolal oživenie výskumných aktivít a vývoja rozdrúzovacích zariadení pre úpravu uhlia s cieľom znížiť obsah síry a popolovín. Podobné ekologické problémy existujú aj na Slovensku, pretože naše energetické uhlie možno charakterizovať ako vysokopoplnaté (26 – 50% popola v sušine), so zvýšeným obsahom síry, ba dokonca aj arzénu (najmä novácke uhlie okolo 3% síry a 660 ppm arzénu), preto aj u nás v posledných rokoch badať zvýšenú aktivitu v oblasti úpravy uhlia.

Okrem úpravy uhlia v ťažkosuspenzných rozdrúzovačoch, vhodných pre hrubozrnné triedy až kusové uhlie, sú najčastejšie na uhoľných úpravniach používané sádzačky a hydrocyklóny. V hydrocyklónoch sa bežne používa ako rozdrúzovacie médium vodná suspenzia magnetitu. Naproti tomu u tzv. „water only“ cyklónov, ktoré majú odlišný uhol, resp. celkové usporiadanie kónickej časti, odpadáva nutnosť použitia zaťažkávadla.

Water only“ cyklón bol vyvinutý v roku 1959 v Centrálnnej skúšobnej stanici Holandských štátnych baní v Treebecku. Tento cyklón si vytvára vlastné ťažké rozdrúzovacie médium akumuláciou častíc vo svojej kónickej časti. Známe sú tri základné typy water-only cyklónov, a to DSM cyklón, s konštantným uhlom kónickej časti okolo 80°, Var-a-Wall cyklón, ktorého kónická časť sa skladá z dvoch sekcií s rozdielnym uhlom, pričom sekcia priliehajúca k valcovej časti má tupší uhol. Nakoniec je to tzv. zložený cyklón, ktorého kónická časť sa skladá z troch sekcií. Prvá sekcia, priliehajúca na valcovú časť cyklónu, má uhol v rozmedzí intervalu 80° až 140°, druhá okolo 60°, tretia je typická najostrejším uhlom 20°-30°. Tento cyklón je vhodný pre úpravu uhlia, Pb-Zn, Sn Au rúd (Suresh et al., 1990).

V poslednom období sa aplikáciou tohto cyklónu pri úprave ťažného uhlia zaoberali Rubiera et al. (1997). Vzorka bola pomletá pod 0,2 mm a následne rozdrúzovaná v cyklóne. Pri vsádzke s obsahom popola 31,8% a 3,02% síry malo prané uhlie pri hmotnostnom výnose 83,6%, obsah popola 26,5% a síry 2,17%. V odpade bol stanovený obsah popola 59,1% a síry 7,36%.

Water only“ cyklón bol testovaný aj na vzorkách energetického uhlia z Hornonitrianskej panvy (Jakabský et al., 1997, Hredzák et al., 1998), pričom obsah popola v pranom uhlí klesol z pôvodných 27 až 41% na 8 až 16%, pri zvýšení výhrevnosti na hodnotu 17 až 19 MJ.kg⁻¹ (z 9 až 13 MJ.kg⁻¹).

Úprava energetického uhlia vo „water only“ cyklóne

Energetické uhlie z lokalít Cígeľ, Handlová a Nováky, bolo po podrvení na zrnitosť < 5 mm, podrobené rozdrúzovaniu v hydrocyklóne bez zaťažkávadla (tzv. water-only cyklón), ktorý má nasle-

¹ Ing. Slavomír Hredzák a Ing. Štefan Jakabský, CSc. Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice

² Doc. Ing. Michal Leško, CSc. Katedra mineralurgie a environmentálnych technológií F BERG TU, Park Komenského 19, 043 84 Košice

(Recenzovaná a revidovaná verzia doručená 30.10.1998)

dovné parametre: vnútorný priemer valcovej časti 150 mm, výška valcovej časti 200 mm, priemer prepadovej rúry 70 mm, priemer na výtoku 18 mm, s hodnotami vnútorných uhlov kónickej časti 135°-75°-20°. Pokusy boli uskutočnené pri pomerne nízkej hustote rmutu, cca 50 g.l⁻¹. Pri jednom pokuse bolo spracovaných okolo 200 l rmutu.

Ľahký a ťažký produkt bol zachytávaný do nylonových vriec, s okatnosťou cca 250 μm. Kal teda predstavuje materiál so zrnitosťou pod uvedenú hranicu. V produktoch bol sledovaný obsah popola, síry celkovej, síry sulfidickej+pyritickej a železa celkového. Základnú bilanciu produktov rozdrúžovania energetického uhlia z Cígľa, Handlovej a Novák sumarizujú tabuľky č. 1 - 3.

Na základe získaných hodnôt je možné konštatovať, že došlo k výraznému zníženiu obsahu popola v pranom uhlí (ľahkom produkte), pri nízkej výťažnosti popola. Ohľadom celkovej síry je zrejme, že približne polovica z nej prechádza do ľahkého produktu, avšak výťažnosť pyritickej a sulfidickej síry do ľahkého produktu je o 10 % nižšia, čo svedčí o tom, že táto zložka, viazaná na sulfidy, resp. persulfidy, sa viacej koncentruje do ťažkého produktu, v závislosti na otvorení zrna a prípadne aj na tom, do akej miery uhlím uzatvorené kryštály sulfidov a persulfidov ovplyvňujú celkovú mernú hmotnosť separovaných zrn vsádzky, pri úprave v hydrocyklóne. Železo sa približne spolovice zhromažďuje v kalovom produkte.

Tab.1. Bilancia produktov úpravy v hydrocyklóne energetického uhlia z Cígľa.

Produkt	Výnos [%]	Popol v sušine A ^d		Síra celková S _c		Síra pyr. +sulf.		Železo celk. Fe _c	
		Obsah [%]	Výťaž. [%]	Obsah [%]	Výťaž. [%]	Obsah [%]	Výťaž. [%]	Obsah [%]	výťaž. [%]
Ľahký	42,60	11,29	12,40	1,82	50,03	0,36	40,79	0,91	23,25
Ťažký	21,40	45,56	25,14	1,92	26,51	0,67	38,14	2,16	27,73
Kal	36,00	67,28	62,46	1,01	23,46	0,22	21,07	2,27	49,02
	Σ100,00	φ 38,78	Σ100,00	φ 1,55	Σ100,00	φ 0,38	Σ100,00	φ 1,67	Σ100,00

Tab.2. Bilancia produktov úpravy v hydrocyklóne energetického uhlia z Handlovej.

Produkt	Výnos [%]	Popol v sušine A ^d		Síra celková S _c		Síra pyr. +sulf.		Železo celk. Fe _c	
		Obsah [%]	Výťaž. [%]	Obsah [%]	Výťaž. [%]	Obsah [%]	Výťaž. [%]	Obsah [%]	Výťaž. [%]
Ľahký	41,30	13,71	13,31	1,28	41,66	0,22	24,26	0,91	24,85
Ťažký	31,30	51,93	38,90	1,56	38,48	0,53	44,29	1,75	36,21
Kal	27,40	72,88	47,79	0,92	19,86	0,43	31,45	2,15	38,94
	Σ100,00	φ 41,79	Σ100,00	φ 1,27	Σ100,00	φ 0,37	Σ100,00	φ 1,51	Σ100,00

Tab.3. Bilancia produktov úpravy v hydrocyklóne energetického uhlia z Novák.

Produkt	Výnos [%]	Popol v sušine A ^d		Síra celková S _c		Síra pyr. +sulf.		Železo celk. Fe _c	
		Obsah [%]	Výťaž. [%]	Obsah [%]	Výťaž. [%]	Obsah [%]	Výťaž. [%]	Obsah [%]	Výťaž. [%]
Ľahký	50,40	11,44	20,79	2,52	54,20	0,22	34,59	0,91	32,31
Ťažký	30,60	37,71	41,62	2,44	31,86	0,35	33,41	1,70	36,64
Kal	19,00	54,86	37,59	1,72	13,94	0,54	32,00	2,32	31,05
	Σ100,00	φ 27,73	Σ100,00	φ 2,34	Σ100,00	φ 0,32	Σ100,00	φ 1,41	Σ100,00

Následne boli vykonané zrnitostné analýzy ľahkého a ťažkého produktu, triedením na sítach za sucha. V získaných produktoch triedenia bol sledovaný obsah popola a celkovej síry, ako aj ich distribúcia. Produkty rozdrúžovania po odtriedení zrnitostnej frakcie -0,5 mm boli ďalej podrobené rozplavovaniu podľa mernej hmotnosti. Ako ťažká kvapalina bol použitý roztok chloridu zinočnatého, ktorého riedením, resp. vyparovaním boli pripravené roztoky s príslušnou hustotou. Výsledky týchto rozborov, čiastočne aj pre Handlovú a Nováky boli využité pri rozpracovaní matematického modelu rozdrúžovacej charakteristiky hydrocyklónu.

Charakteristika pracovného režimu „water only“ cyklóna

Pre energetické uhlie z bane Cígľa, Handlová a Nováky boli na "water-only" cyklóne realizované experimenty, pri ktorých boli namerané prevádzkové parametre rozdrúžovania:

- vstupný tlak suspenzie [10 kPa],
- objemová (hmotnostná) koncentrácia tuhej fázy v suspenzii [50 g . l⁻¹] pri daných konštantných parametroch hydrocyklónu.

Rozdeľovacia charakteristika hydrocyklónu (vypočítaná v tabuľke č. 4) bola získaná pri úprave uhlia z Cígl'a a graficky je znázornená na obr. č. 1.

Tabuľka č. 4. Hydrocyklón - rozdeľovacia charakteristika, cígeľské uhlie, rozdelenie podľa hustoty $\gamma_p = 0,6667$; $\gamma_v = 0,3333$.

Hustota	Experimentálne výsledky		Prepočet na vsádzku			Deliace číslo	
	prepad HC γ_{pi}	Výtok HC γ_v	$\gamma_{pi} .0,6667$	$\gamma_{vi} .0,3333$	γ_i	$\epsilon_{TK}(\rho_i)$	$\epsilon_{TO}(\rho_i)$
-1,3	28,17	3,71	18,78	1,24	20,02	93,81	6,19
1,3-1,4	47,56	14,03	31,72	4,67	36,39	87,14	12,86
1,4-1,5	17,44	19,11	11,63	6,37	18,00	64,61	35,39
1,5-1,7	5,75	25,65	3,83	8,55	12,38	30,94	69,06
+ 1,7	1,07	37,51	0,71	12,50	13,21	5,37	94,63
Σ	100,00	100,00	66,67	33,33	100,00		

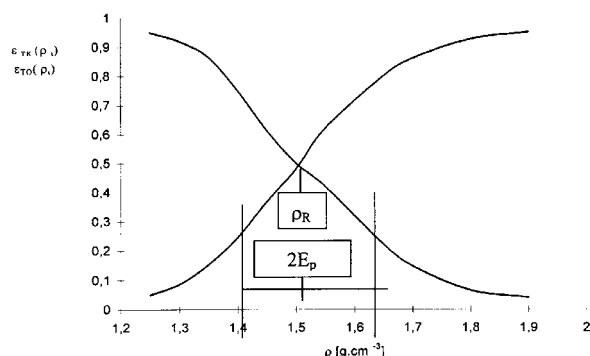
Podobným spôsobom boli vypočítané rozdeľovacie charakteristiky podľa zrnitosti, v tabuľke č. 5 a ich grafický obraz, obr. č. 2. Na vysvetlenie je potrebné uviesť, že z analýzy bola vybraná zrnitostná trieda 0 - 1 mm (0 - 0,5 a 0,5 - 1 mm). Táto zrnitostná trieda v cyklóne vytvára prirodzenú suspenziu, v ktorej dochádza k rozdeľovaniu zrnitého materiálu a vo svojej podstate predstavuje kalový podiel.

V záujme zachovania pôvodných vlastností suspenzie je potrebné suspenziu v pracovnom okruhu regenerovať, vylúčením určitého podielu kalu z obehu.

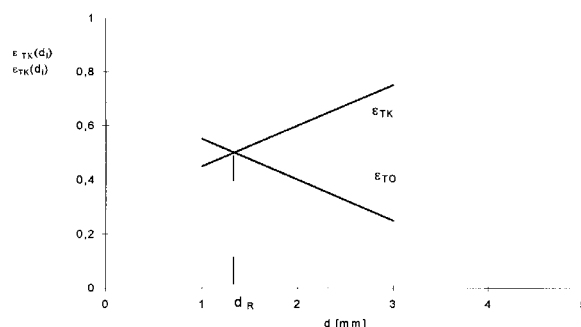
Tabuľka č. 5. Hydrocyklón - rozdeľovacia charakteristika, cígeľské uhlie, rozdelenie podľa zrnitosti $\gamma_p = 0,6667$; $\gamma_v = 0,3333$.

Hustota	Experimentálne výsledky		Prepočet na vsádzku			Deliace číslo	
	prepad HC γ_{pi}	Výtok HC γ_v	$\gamma_{pi} .0,6667$	$\gamma_{vi} .0,3333$	γ_i	$\epsilon_{TK}(\rho_i)$	$\epsilon_{TO}(\rho_i)$
1 - 2	16,84	41,25	11,23*	13,75	24,98	44,96	55,04
2 - 3	28,48	38,69	18,98	12,90	31,88	59,57	40,43
3 - 4	35,78	18,19	23,86	6,06	29,92	79,77	20,23
+ 4	18,89	1,87	12,60	0,62	13,22	95,31	4,69

*Zrnitostné zloženie, prepočítané na zmes, bez triedy 0 - 1 mm.



Obr.1. Rozdeľovacia charakteristika hydrocyklónu.



Obr.2. Rozdeľovacia charakteristika hydrocyklónu.

Z grafov na obr. č. 1 a 2 sa môžu odčítať základné parametre rozdeľovacej charakteristiky:

- podľa hustoty - tabuľka č. 4 a obr. č. 1.

$$\rho_R = 1,52 \text{ g.cm}^{-3}, E_T(\rho) = 0,105, S_p = 0,16$$

- podľa zrnitosti - tab. č. 5. Z obrázku č. 2 vyplýva, že rozdeľovacia charakteristika sa v tomto prípade nemôže aproximovať normálnym rozdelením. Vhodnou aproximujúcou funkciou môže byť priamka.

Parametre priamky vypočítané na základe metódy najmenších štvorcov sú: $k = 0,171$, $q = 0,271$.

Na overenie zhody experimentálnych a teoretických deliacich čísel bol v obidvoch prípadoch využitý štatistický χ^2 - test zhody. Výsledky testov sú uvedené v tabuľkách č. 6. a 7.

Na základe porovnania vypočítanej hodnoty $\chi^2 = 1,08$, s kritickou hodnotou $\chi^2_{\alpha, f} = 5,99$ ($\alpha = 0,05$, $f = 2$), môžeme konštatovať, že medzi porovnávanými rozdeľovacími charakteristikami - teoretickou $\varepsilon_{TO}(\rho)$ a empirickou $\varepsilon_{TO}(\rho)$, nie sú štatisticky významné rozdiely, a preto ich považujeme za zhodné a aproximujúca funkcia - s parametrami $\rho_R = 1,52 \text{ g.cm}^{-3}$ a $S_R = 0,16 \text{ g.cm}^{-3}$, je adekvátna a s vyhovujúcou presnosťou vyjadruje sledovanú závislosť.

Tab.6. χ^2 -test rozdeľovacej charakteristiky hydrocyklónu podľa hustoty.

Hustota	Hustota ρ_i	$\frac{\rho_i - 1,52}{u_j = \text{-----}}$ 0,16	$\varepsilon^2_{TO}(\rho)$	$\varepsilon_{TO}(\rho)$	χ^2
-1,3	1,2	-1,687	4,65	6,19	0,510
1,3 - 1,4	1,35	-1,062	14,32	12,86	0,149
1,4 - 1,5	1,45	-0,437	33,32	35,39	0,129
1,5 - 1,7	1,6	0,5	69,15	69,06	0,000
1,7 - 2,1	1,9	2,375	99,91	94,63	0,279
$\chi^2 = 1,077$					

Na základe analýzy výsledkov uvedených v tabuľke č. 7 môžeme posúdiť vhodnosť aproximácie rozdeľovacej charakteristiky podľa zrnitosti funkciou priamky:

$$\varepsilon_{TO}(d) = 0,271 + 0,171 \cdot d$$

Tab.7. χ^2 - test rozdeľovacej charakteristiky hydrocyklónu podľa zrnitosti.

X	Empirická $\varepsilon_{TO}(d)$	Teoretická $\varepsilon_{TO}(d)$	χ^2
1	44,96	44,26	0,013
2	59,57	61,33	0,049
3	79,77	74,42	0,024
4	95,30	95,51	0,0004
$\chi^2 = 0,086$			

Pretože vypočítaná hodnota $\chi^2 < 1$, aj bez testovania môžeme konštatovať adekvátnosť zvolenej aproximujúcej funkcie pre rozdeľovaciu charakteristiku hydrocyklónu.

Veľkosť deliaceho zrna stanovíme graficky alebo výpočtom pomocou aproximujúcej funkcie:

$$0,5 = 0,271 + 0,171 \cdot d_R$$

$$d_R = 1,34 \text{ mm,}$$

čo veľmi dobre korešponduje s hodnotou odčítanou z obr. č. 2.

Overenie matematického modelu rozdeľovacej charakteristiky „water only“ cyklóna

Na základe výsledkov rozdrúžovania cigelfského energetického uhlia boli v tabuľke č. 4 vypočítané rozdeľovacie charakteristiky jednotlivých frakcií. Frakčné zloženie handlovského a nováckeho uhlia je vypočítané z frakčného rozboru - tabuľka č. 8. Uvažuje sa iba uhlie bez kalu.

Tab.8. Vypočítané frakčné zloženie energetického uhlia z Novák a Handlovej.

Hustota [g.cm ⁻³]	Nováky			Handlová		
	$\gamma_p = 0,6229$ Prepad	$\gamma_v = 0,3771$ výtok	1,0 Vsádzka	$\gamma_p = 0,5689$ prepad	$\gamma_v = 0,4311$ výtok	1,0 vsádzka
-1,3	16,81	9,28	13,97	28,57	2,37	17,28
1,3-1,4	29,32	10,37	22,17	49,50	15,96	35,04
1,4-1,5	48,28	36,93	44,00	15,91	19,40	17,41
1,5-1,7	4,85	17,03	9,45	4,55	17,75	10,24
1,7-2,1	0,74	26,39	10,41	1,47	44,52	20,03

Výpočet očakávaných hmotnostných výnosov pri úprave daného uhlia v hydrocyklóne toho istého typu a pri tých istých prevádzkových podmienkach je možný pomocou maticovej rovnice. Na výpočet bol využitý vzťah v nasledujúcom tvare (Leško, 1985, 1998):

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccccc|c|ccc}
 & & R & & & * & \bar{X} & = & \bar{Y} & & \\
 & & & & & & & & & & \\
 0,9381 & 0 & 0 & 0 & 0 & | & 13,97 & & 13,10 & & \\
 0 & 0,8714 & 0 & 0 & 0 & | & 22,17 & & 19,32 & & \\
 0 & 0 & 0,6461 & 0 & 0 & | & 44,00 & = & 28,43 & 64,33 & \\
 0 & 0 & 0 & 0,3094 & 0 & | & 9,45 & & 2,92 & & \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0537 & | & 10,41 & & 0,56 & & \\
 \hline
 0,9381 & 0 & 0 & 0 & & | & 17,28 & & 16,21 & & \\
 0 & 0,8714 & 0 & 0 & & | & 35,04 & & 30,53 & & \\
 0 & 0 & 0,6461 & 0 & & | & 17,41 & = & 11,25 & 64,24 & \\
 0 & 0 & 0 & 0,3094 & & | & 10,24 & & 3,17 & & \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0537 & | & 20,03 & & 1,08 & & \\
 \hline
 \end{array}
 \end{array}$$

kde matica R je diagonálna matica reprezentujúca rozdeľovaciu charakteristiku hydrocyklónu, \bar{X} a \bar{Y} , vstupný a výstupný vektor, charakterizujúci frakčné, resp. zrnitostné zloženie materiálového prúdu.

Keď porovnáme skutočné výsledky, uvedené v záhlaví tabuľky č. 8 s vypočítanými - očakávanými, môžeme konštatovať, že celková relatívna chyba výpočtu hmotnostného výnosu

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta}{\gamma_p} \cdot 100 \quad [\%]$$

je pre Nováky:

$$\varepsilon_R = \frac{64,3 - 62,3}{62,33} \cdot 100 = 3,2 \%$$

a pre Handlovú:

$$\varepsilon_R = \frac{62,24 - 56,89}{56,89} \cdot 100 = 9,4 \%$$

čo je porovnateľné s chybami experimentu, a preto rozdeľovaciu charakteristiku hydrocyklónu, hlavne pre cígel'ské a novácke uhlie, môžeme aproximovať distribučnou funkciou normálneho rozdelenia.

Podobným spôsobom môžeme prepočítať aj prognózu výsledkov pri rozdrúžovaní akéhokoľvek iného uhlia, aj pri zohľadnení kvality budúcich produktov.

Záver

Prezentovaný matematický model hydrocyklónu umožňuje riešiť výskumno-vývojové, projekčné, a technologické úlohy v oblasti prognózy kvantity a kvality výroby pri zmenených podmienkach prevádzky a vsádzky, s využitím simulačných postupov.

Táto práca vznikla v rámci slovensko-amerického projektu „Slovak Brown Coal“ ID 031-95.

Literatúra

- Suresh, N., Vannangamundi, M. and Rao, T.C.: „Water-Only“ Cyclones. *Min.Mag. Apr. 1990, 266-268.*
- Rubiera, F., Hall, S. T. and Shah, C. L.: Sulfur removal by fine coal cleaning processes. *Fuel, Vol. 76, 1997, No. 13, 1187-1194.*
- Jakabský, Š. a kol.: Komplexné využitie slovenského hnedého uhlia a ekologicky čistých technológií v energetike. *Správa ČÚ 01 k VTP č. 95-513-III-07 "Zvýšenie ekonomickej efektívnosti energetických premien" E 1.3. časť A. Výročná správa ÚGt SAV Košice 1997, 62 s.*
- Hredzák, S., Jakabský, Š., Lovás, M. and Mockovčiaková, A.: Preparation of steam coal from Cígel and Handlová localities in hydrocyclones. In: (Fečko, Bulawa, Holík, eds.): *Proc. of the 4th Conf. on Environment and Mineral Processing, VŠB-TU Ostrava 1998, Part II., 477-482.*
- Leško, M.: Úpravnícka technologická analýza. *ES VŠT Košice, 1985.*
- Leško, M.: Maticové modely technologických systémov. *ES TU Košice, 1998.*