

UPOTREBA RAČUNALA U OPLEMENJIVANJU MINERALNIH SIROVINA

Branko SALOPEK, Slavka PFAFF, Mirjana GARAPIĆ i Suzana FILIPOVIĆ

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, YU – 41000 Zagreb

Ključne riječi: Modeli, Simulacija, Mlin s kuglama, Sito

U oplemenjivanju mineralnih sirovina računalo najčešće koristimo za potrebe simulacije postojećih odnosno projektiranje novih uređaja i procesa. Za to je neophodno poznavanje teorije procesa i odgovarajućih modela koji određeni proces vjerno opisuju. U radu su klasificirani modelni parametri te procijenjena pouzdanost pojedinih modela. Poblježe su objašnjeni modeli mljevenja i klasiranja. Na primjeru iz prakse prikazana je primjena modela u simulaciji.

Uvod

Uspješan rad pojedinih oplemenjivačkih uređaja i procesa ovisi o čitavom nizu različitih parametara od kojih je neke ponekad vrlo teško ili čak nemoguće izmjeriti, tako da njihov utjecaj ostaje nepoznat. Međutim, ako ove teško mjerljive parametre definiramo prikladnim matematičkim izrazima i ugradimo u matematički model koncipiran na osnovi izmjerenih parametara i pojedinih fizikalnih zakona možemo uz pomoć računala ispitati njihov utjecaj a time i čitav model potpunije definirati. Izrada modela ponekad je vrlo složen posao jer se već pri modeliranju relativno jednostavnih uređaja i procesa javlja velik broj utjecajnih parametara. Na sl. 1 prikazan je proces mljevenja i klasiranja u kojem je navedeno 20 različitih parametara od kojih svaki u određenoj mjeri utječe na grano–sastav vorteksa hidrociklona.

Tako npr. promjenom odnosa čvrsto/tekuće na ulazu u hidrociklon promijenit će se i grano–sastav vorteksa, ili pak promjenom grano–sastava ulaza u mlin s palicama promijenit će se grano–sastav i gustoća suspenzije u vodosabirniku, što će utjecati na rad hidrociklona odnosno grano–sastav vorteksa.

Izbor parametara čiji je utjecaj dominantan u određenom procesu bitan je za izradu kvalitetnog modela. U tab. 1 klasificirani su pojedini parametri prema utjecaju u modelu (Broussaud, 1988).

Pored pravilno odabranih parametara, kvaliteta modela ovisi i o udjelu pojedinih fizikalnih zakona i fenomena koje koristimo pri opisivanju procesa. Najkvalitetniji su, iako u oplemenjivanju mineralnih sirovina iznimno rijetki, *teorijski modeli* jer proces u potpunosti opisuju nekim od poznatih fizikalnih zakona, kao što su npr. zakon o održavanju mase ili Stokesov zakon. Pojedine vrijednosti parametara određuju se međusobno nezavisnim eksperimentima

Key-words: Models, Simulation, Ball mill, Screen

In mineral dressing the computer is mostly used for the simulation of operating, and design of new devices and processes. For that, the knowledge of the theory of the process proper as well as of the appropriate models by which the process is truly assessed is indispensable. In the paper, model parameters are classified and reliability of individual models valorized. Milling and classification models are described in more detail. By a plant example the application of a simulation model is shown.

ili se očitaju direktno iz priručnika. Najčešće se koriste *fenomenološki modeli* odnosno modeli koji pored fizikalne osnove koja proizlazi iz npr. prvog kinetičkog zakona, T–krivulje, krivulje odaziva i sl. sadrže i parametre čije se vrijednosti određuju eksperimentiranjem unutar samog procesa. Kvaliteta ovih modela ograničena je opsegom i preciznošću izvođenja eksperimenata. I, konačno, modeli koji važe samo za uređaj ili proces za koji su određeni odnosno na kojima su eksperimenti izvedeni. To su tzv. *empirijski* ili *black–box modeli* koji najčešće nemaju nikakve fizikalne osnove već se određuju na osnovu niza eksperimenata i regresijske analize.

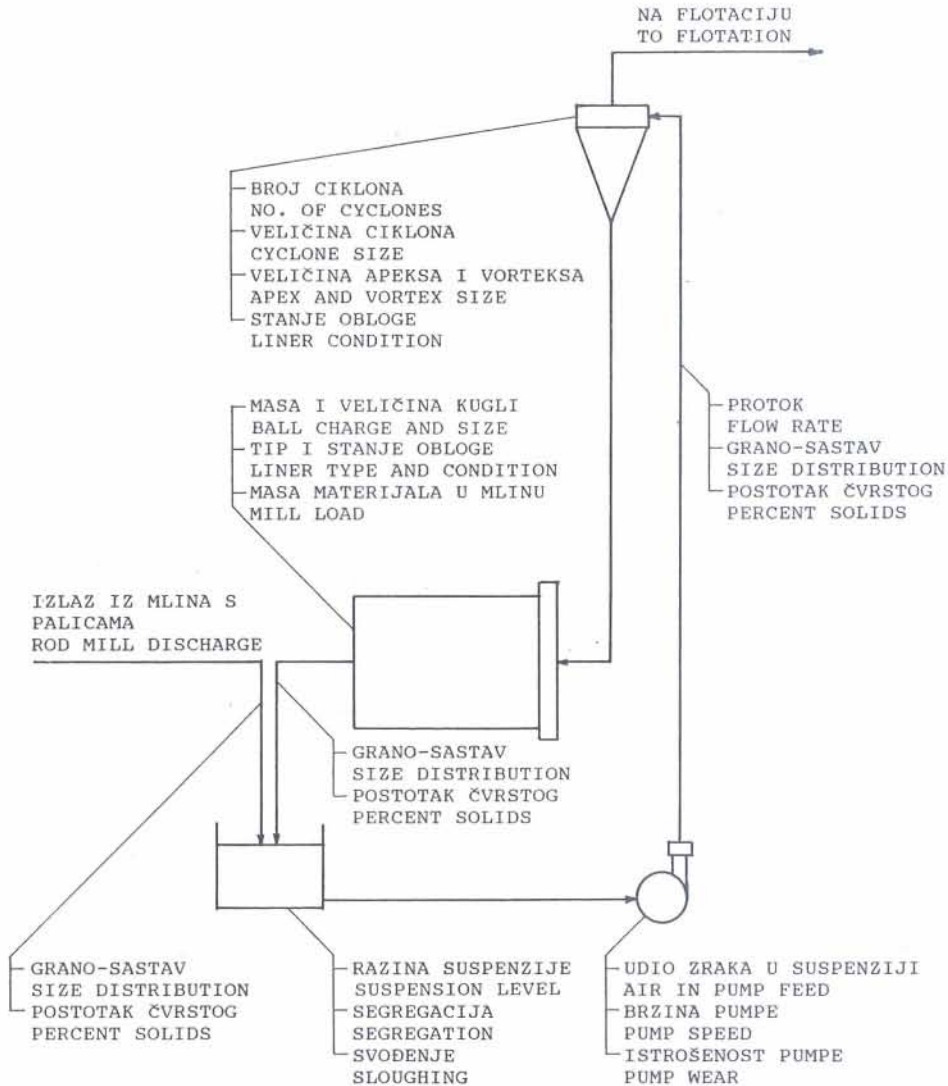
Matematički modeli pojedinih uređaja

Posljednjih godina razvijen je čitav niz matematičkih modela za pojedine oplemenjivačke postupke odnosno uređaje od kojih su neki pored verifikacije u laboratoriju potvrđeni i u pogonu. U tab. 2 dat je pregled postupaka i namjene modela s procjenom pouzdanosti (Broussaud, 1988).

Kako vidimo, najpouzdaniji modeli razvijeni su za potrebe mljevenja i klasiranja, što je i razumljivo kada se ima na umu da o ekonomičnosti ciklusa mljevenja i klasiranja najčešće ovisi i ekonomičnost cijelog pogona. Svako smanjenje utroška energije u procesu sitnjenja direktno utječe na troškove proizvodnje. O uspjehu klasiranja ovisi kvaliteta proizvoda sitnjenja bilo da se radi o finalnom produktu (klase tehničkog kamena) bilo o produktu koji predstavlja ulaz u neki od postupaka koncentracije.

Modeli mlina s kuglama

Najpouzdaniji modeli mljevenja (Bond, 1960; Austin 1971/72; Lynch, 1977; Armstrong,



SI. 1 Neki od parametara u ciklusu mljevenja i klasiranja

Fig. 1 Some of the parameters in a grinding-classification circuit

1986) razvijeni su za mlin s kuglama, što je i razumljivo ako se ima na umu da je ovo mlin koji se još uvijek najčešće koristi. Mlin s palicama, te posebno autogeni mlin, tek posljednjih godina zaokupljaju veću pažnju istraživača, tako da se u budućnosti i tu mogu očekivati modeli koji će se moći koristiti s većom pouzdanošću nego do sada (Lynch, 1977; Menacho, 1986).

Matrični model prvi je model koji je korišten za simulaciju a razvijen je na osnovu istraživanja Epstein (1948) koji je proces mljevenja definirao s dva osnovna parametra i to: funkcijom selekcije $p_n(y)$ i funkcijom drobljenja $F(x,y)$. Funkcija selekcije označava vjerojatnost drobljenja zrna veličine y u n stupnjeva drobljenja, dok je funkcija drobljenja kumulativni prikaz udjela čestica $x < y$ nastalih drobljenjem mase zrna veličine y . Stupanj drobljenja definiran je jednim okretajem mlina ili pak jedinicom vremena. Na osnovi ovako definiranog procesa mljevenja Broadbent i Callcott (1956) predložili su matrični model mljevenja koji pretpostavlja diskretne vremenske intervale i diskretne klase:

$$p = D^n f \quad (1)$$

gdje je

$$D = BS + I - S \quad (2)$$

ili

$$p = (BS + I - S)^n f \quad (3)$$

p i f su vektori grano-sastava proizvoda i ulaza, D matrica mljevenja, S matrica selekcije a I jedinična matrica. Elementi matrice B određuju se prema jednadžbi:

$$B_{i,j} = (1 - e^{-(x_i/x_j)}) / (1 - e^{-1}) \quad (4)$$

odnosno funkcija daje udjele klasa manjih od x_i koje nastaju mljevenjem klase geometrijske sredine x_j (Lynch, 1977). Elementi matrice selekcije određuju se na osnovi poznatog grano-sastava ulaza i proizvoda iz jednadžbe:

$$p = (BS + I - S) \quad (5)$$

Broj stupnjeva mljevenja n određuje se izrazom:

$$MC = Q n \quad (6)$$

Tabela 1. Utjecaj konstruktivnih i radnih parametara u modelu
 Table 1. Influence of design and operational parameters in the model

modelirani uređaj <i>modeled device</i>	utjecaj parametara u modelu <i>Influence of parameters in the model</i>		
	jak <i>rather good</i>	prosječan <i>average</i>	slab <i>poor</i>
mlin s kuglama <i>ball mill</i>	meljivost rude grano-sastav kapacitet veličina mlina <i>ore grindability size distribution flow rate mill size</i>	masa kugli brzina okretanja mlina, <i>ball mass rotation speed</i>	grano-sastav kugli, visk. suspenzije, udio čvrstog <i>ball distribution, slurry viscosity solid content</i>
vibracijsko sito <i>vibrating screen</i>	veličina otvora grano-sastav <i>openings size distribution</i>	veličins sita kapacitet <i>screen size feed rate</i>	frekvencija i amplituda vib., nagib sita <i>vibration freq. and amplitude, screen slope</i>
hidrociklon <i>hydrocyclone</i>	kapacitet grano-sastav <i>flow rate size distribution</i>	veličina ciklona veličina apeksa i vorteksa, udio čvrstog <i>cyclone and spigots size, solid content</i>	viskozitet suspenzije, <i>slurry viscosity</i>
flotacijska ćelija <i>flotation cell</i>	veličina ćelije flotabilnost rude grano-sastav <i>cell size ore flotability size distribution</i>	protok zraka raščin min. zrna <i>air flow rate mineral liberation</i>	reagenti kondicioniranje hidrodinamika <i>reagents conditioning hydrodynamics</i>
spiralni separator <i>spiral concentrator</i>	gustoća rude, raščin min. zrna grano-sastav <i>mineral density mineral liberation, size distribution</i>	kapacitet <i>flow rate</i>	oblik zrna podešenost uređaja, visk. suspenzije <i>particle shape device settings slurry visc.</i>

gdje je MC konstanta mlina a Q kapacitet mlina. Prema tome ako su poznati grano-sastavi ulaza i proizvoda te kapacitet mogu se odrediti S i MC. Poznavanjem S i MC moguće je prognozirati grano-sastav proizvoda za neki drugi Q ili grano-sastav ulaza.

Osnovu *kinetičkog modela* (Lynch, 1977; Herbst et al., 1968) čini prvi kinetički zakon (*first-order rate process*) prema kome se neka klasa i usitnjava intenzitetom proporcionalnim masi čestica u toj klasi, odnosno:

$$\frac{dP_i}{dt} = -S_i P_i \quad (7)$$

gdje je P_i masa klase i a S_i intenzitet sitnjenja klase i . I ovdje je proces mljevenja definiran funkcijom selekcije i funkcijom drobljenja. Funkcija selekcije S mjera je intenziteta sitnjenja i ovisi o uvjetima mljevenja. Funkcija drobljenja B kumulativni je prikaz raspodjele klasa i dobivenih drobljenjem neke veće klase j i ovisi o fizičkim svojstvima i mineralnom sastavu materijala. Na osnovi ovako definirane kinetike mljevenja te uz pretpostavku diskretnih klasa dolazimo do jednadžbe mljevanja:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = -S_i P_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{i,j} S_j P_j(t) \quad (8)$$

odnosno za kontinuirano vrijeme mljevenja masa klase i u proizvodu jednaka je:

$$P_i^c = \int_{t=0}^{\infty} h(t) P_i(t) dt \quad (9)$$

gdje je $h(t)$ vremenska raspodjela zadržavanja materijala u mlinu (Fuerstenaue, 1978) a $P_i(t)$ rješenje jednadžbe (8). Pisana u matricnom obliku jednadžba (8) glasi:

$$P = GF \quad (10)$$

odnosno vektor grano-sastava proizvoda P dobija se množenjem matrice mljevenja G s vektorom grano-sastava ulaza F. Matrica mljevenja G jednaka je:

$$G = AVA^{-1} \quad (11)$$

gdje je V dijagonalna matrica i ovisi o S i uvjetima miješanja u mlinu a A matrica svojstvenih vektora matrice (BS - I)S:

Tabela 2. Oplemenjivački postupci za koje su izradeni modeli i procjena njihove pouzdanosti
 Table 2. Beneficiation operations with developed models and estimated powers

oplemenjivački postupak <i>benefication operation</i>	namjena modela <i>purpose of model</i>		povećavanje modela <i>device up scaling</i> (korišteni odnos) (<i>used ratio</i>)
	simulacija <i>simulation</i>	dimenzioniranje <i>scaling</i>	
Drobljenje <i>Crushing</i>	+++	+	
Mljevenje <i>Grinding</i>			
mlin s kuglama <i>ball mill</i>	+++	+++	+++ (snaga/kap.) (<i>power/feed rate</i>)
mlin s palicama <i>rod mill</i>	++	+++	++ (snaga/kap.) (<i>power/feed rate</i>)
autogeni mlin <i>autogenous mill</i>	+		
Klasiranje <i>Classification</i>			
vib. sito <i>vib. screen</i>	++	+	+++ (površina/kap.) (<i>area/feed rate</i>)
hidrociklon <i>hydrocyclone</i>	++	++	+++ (broj ciklona/kapacitet) (<i>Number of cyc./feed rate</i>)
Flotacija <i>Flotation</i>	++	+	
Gravitacijska koncentracija <i>Gravity concentration</i>			
pt-separacija <i>heavy media</i>	++		++ (broj separatora/kap.) (<i>number of sep./feed rate</i>)
ostalo <i>other</i>			
Magnetska konc. <i>Magnetic conc.</i>			
niski int. <i>low intensity</i>	+		+++ (dužina/kap.) (<i>length/feed rate</i>)
visoki int. suhi <i>dry high int.</i>	+		+++ (dužina/kap.) (<i>length/feed rate</i>)
visoki int. mokri <i>wet high int.</i>	+		
Zgušnjavanje <i>Thickening</i>	+	++	
Filtracija <i>Filtration</i>	+	++	

$$A_{i,j} = \sum_{k=j}^{i-1} \frac{B_{i,k} S_k}{S_i - S_j} A_{k,j} \quad \text{za } i < j \quad (12)$$

$$A_{i,j} = 1 \quad \text{za } i = j \quad (13)$$

$$A_{i,j} = 0 \quad \text{za } i > j \quad (14)$$

Elementi matrice S određuju se na osnovi eksperimenata u laboratorijskom mlinu s kuglama i jednadžbi:

$$\ln \frac{P_i(t)}{P_i(0)} = -S_i t \quad (15)$$

$$\ln S_i = -s_1 - s_2 \ln x_i - s_3 (\ln x_i)^2 \quad (16)$$

a elementi matrice B prema jednadžbi:

$$B_{i,j} = b_1 \left(\frac{x_i}{x_j} \right)^{b_2} + (1 - b_1) \left(\frac{x_i}{x_j} \right)^{b_3} \quad (17)$$

gdje su x_i i x_j geometrijske sredine klasa koje se razlikuju za modul 1,41 a s_1 , s_2 , s_3 , b_1 , b_2 i b_3 konstante.

Za prognoziranje rada pogonskog mlina funkcija selekcije određuje se na osnovi grano-sastava ulaza i proizvoda te jednadžbe (16) koja se prema potrebi dodatno parameterizira. Funkcija s kojom se postigne zadovoljavajuća podudarnost stvarnih i prognoziranih grano-sastava stvarna je funkcija selekcije pogonskog mlina.

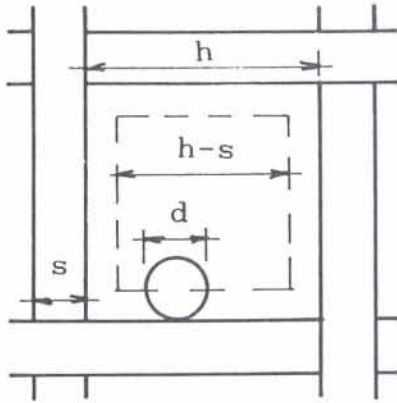
Modeli vibracijskog sita

Matematički opis procesa sisanja najčešće polazi od računa vjerojatnosti ili od Trompove krivulje odsjeva (Calanog et al., 1973; Lynch, 1977; Karra, 1979). I jedan i drugi pristup koriste se za izradu modela, a najuspješniji od njih bit će ovdje prikazani.

Model MI polazi od računa vjerojatnosti i varijabli prikazanih na sl. 2.

Vjerojatnost da zrno promjera d prođe kroz otvor h pri debljini žice s je:

$$p'(d) = [(h - d)/(h + s)]^2 \quad \text{za } d \leq h \quad (18)$$



Sl. 2 Oznaka varijabli u modelu
Fig. 2 Interpretation of the variables in the model

Vjerojatnost da zrno veličine d ne prođe kroz otvor u m pokušaja pri prijelazu preko sita glasi:

$$p'(d) = \{1 - [(h - d)/(h + s)]^2\}^m \quad \text{za } d \leq h \quad (19)$$

pri čemu je broj pokušaja m proporcionalan konstanti efikasnosti k , dužini sita l i faktoru opterećenja sita f :

$$m = k^2 l f \quad (20)$$

Srednja vjerojatnost da zrno klase (d_i, d_{i+1}) ne ode u prosjev u m pokušaja je:

$$\bar{p}(d_i, d_{i+1}) = \frac{(h+s)/\sqrt{m} [I(y_i) - (y_{i+1})]}{d_i - d_{i+1}} \quad (21)$$

gdje je funkcija $I(y)$ aproksimacija integrala:

$$\int_0^\infty \exp(-y^2) dy \quad (22)$$

Udio zrna za pojedinu klasu odsjeva i prosjeva računa se prema izrazima:

$$o_{il} = \frac{\bar{p}(d_i, d_{i+1}) MFf_{il}}{MO} \quad (23)$$

$$u_{il} = \frac{[1 - \bar{p}(d_i, d_{i+1})] MFf_{il}}{MU} \quad (24)$$

gdje su f_{il} , o_{il} i u_{il} udjeli klasa u ulazu, odsjevu i prosjevu a MF , MO i MU mase materijala u ulazu, odsjevu i prosjevu.

Osnovu modela $M2$ čini Trompova krivulja odsjeva dok su pojedine varijable preuzete iz poznatih obrazaca za dimenzioniranje sita. Ravnoteža masa klase i materijala kojeg sijemo glasi:

$$MFf_i = MOo_i + MUu_i \quad (25)$$

pa je razdjelni koeficijent T -krivulje odsjeva jednak:

$$c_i = MOo_i / MFf_i \quad (26)$$

Odnos vrijednosti c_i i geometrijskih sredina klasa d_i daje osnovni oblik T -krivulje. Ta krivulja redovito

sadrži i parametar d_{50} koji označuje onu veličinu zrna kod koje je vjerojatnost da se zrno pojavi u odsjevu ili prosjevu jednaka. Ako sada krivulju normaliziramo odnosno definiramo odnos c_i prema d_i/d_{50} dobit ćemo jednadžbu:

$$c_i = 100 [1 - \exp(0,693 (d_i/d_{50})^{5,846})] \quad (27)$$

gdje c_i označava vjerojatnost klase i da se pojavi u odsjevu. Vjerojatnost d_{50} određujemo prema jednadžbi (28) i sl. 3:

$$d_{50} = h_t \left(\frac{a b c d e f g}{t} \right)^{0,148} \quad (28)$$

$$h_t = (h+d)\cos\varphi - d \quad (29)$$

Linearnom interpolacijom određujemo vrijednosti:

Q ... udio zrna većih od h_t

R ... udio zrna manjih od h_t

X_n ... udio zrna kritične veličine ($0,75 h_t, 1,25 h_t$).

Vrijednosti koeficijenata a do g jednadžbe (28) određujemo prema jednadžbama:

$$a = f_1(h_t) \dots \dots \dots \text{nominalni kapacitet sita po } m^2 \quad (30)$$

$$b = f_2(Q) \dots \dots \dots \text{koeficijent nadzrna} \quad (31)$$

$$c = f_3(R) \dots \dots \dots \text{koeficijent poluzrna} \quad (32)$$

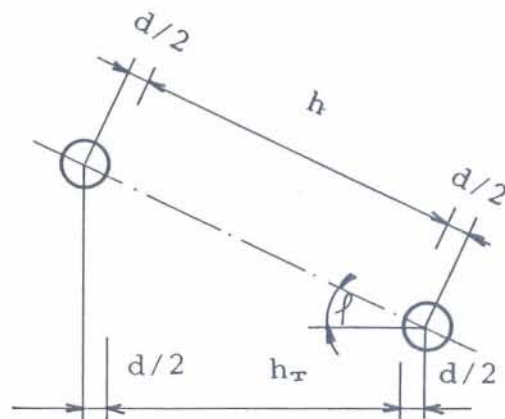
$$d = 1,1 - 0,1s \dots \dots \dots \text{koeficijent etaže sita} \quad (33)$$

$$e = e_1 h_t - e_2 \dots \dots \dots \text{koeficijent za mokro sijanje} \quad (34)$$

$$f = f_4(\gamma) \dots \dots \dots \text{koeficijent gustoće} \quad (35)$$

$$g = f_5(X_n) \dots \dots \dots \text{koeficijent kritičnih zrna} \quad (36)$$

$$t \dots \dots \dots \text{teorijski odsjev } (t/m^2 h)$$

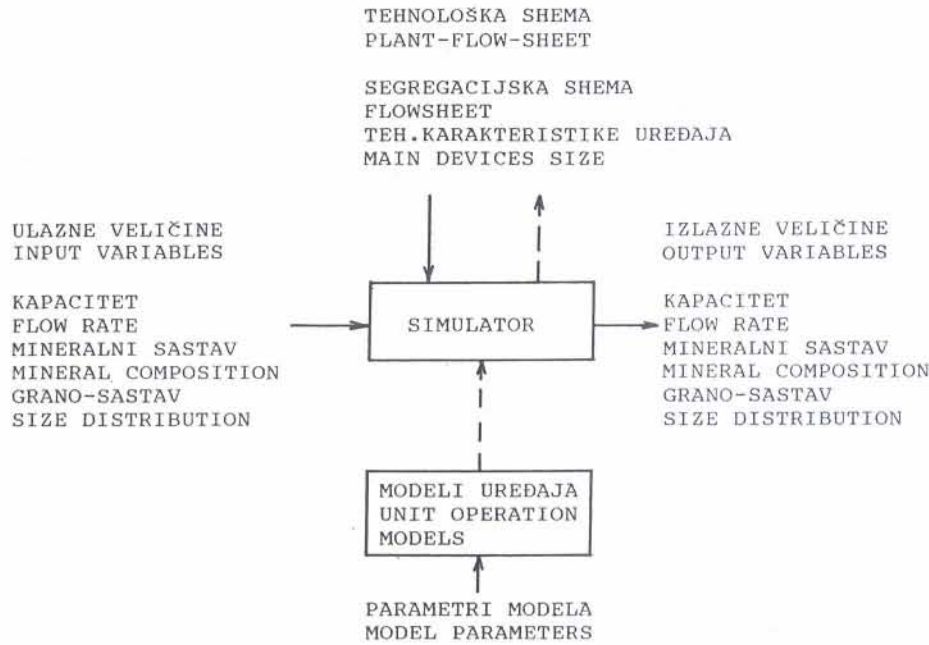


Sl. 3 Efektivni otvor sita, h_t
Fig. 3 Throughfall screen aperture, h_t

Elementi potrebni za proračun jednadžbi (30 do 36) nalaze se u radovima Karra, 1979; Nordberg Proc. Mach., 1976. Na osnovi poznatog d_{50} i geometrijske sredine klase d_i izračunamo vrijednosti c_i prema jednadžbi (27), a zatim za zadani grano-sastav ulaza i kapacitet određujemo grano-sastave te mase odsjeva i prosjeva.

Detaljno razrađeni modeli mlina s kuglama i vibracijskog sita s odgovarajućom laboratorijskom procedurom nalaze se u radovima Salopek et al., (1986, 1987, 1988, 1989).

OPIS .DOC



Sl. 4 Tipična shema simulatora

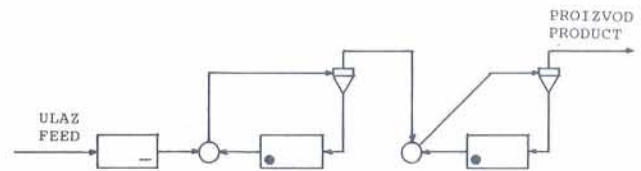
Fig. 4 Typical scheme of a simulator

Simulatori

Većina oplemenjivačkih postrojenja tokom eksploatacije doživljava veće ili manje korekcije tehnološkog procesa bilo da su uzrokovane promjenom karakteristika ulazne sirovine (sadržaj korisnog metala, mineralni sastav, meljivost i dr.) bilo zahtjevima tržišta (sadržaj korisnog metala u koncentratu, grano-sastav i dr.) ili željom za smanjenjem potrošnje energije u procesu sitnjenja. Te korekcije najčešće se odnose na promjene kapaciteta, uvođenje dodatnih stupnjeva drobljenja, promjene u sistemu mljevenja i klasiranja, uvođenje dodatnih stupnjeva flotiranja te efikasnijih tipova pojedinih uređaja i sl. Klasičan način rješavanja tih problema zahtijeva mnogo truda i vremena, pa i pored toga ponekad nas ostavlja bez pravog odgovora. Danas je moguće taj posao obaviti mnogo brže i pouzdanije upotrebom računala i odgovarajućih simulatora koji nam omogućuju uspoređivanje velikog broja varijanti i olakšavaju izbor najboljeg rješenja. Na sl. 4 prikazana je tipična shema simulatora s osnovnim funkcijama.

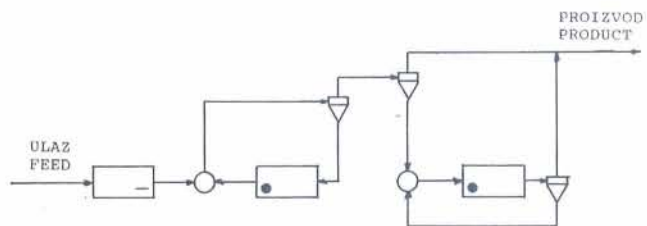
Simulator je dakle *software* koji na osnovi karakteristika ulazne sirovine i postrojenja predviđa vrijednosti izlaznih veličina proizvoda. Sastoji se od glavnog programa te čitavog niza potprograma odnosno statističkih, optimizacijskih i iteracijskih rutina. Glavni program prema zadanoj shemi komunicira s potprogramima, rješava zadane algoritme i određuje vrijednosti izlaznih veličina. Potprogrami sadrže modele pojedinih oplemenjivačkih uređaja, modele za balansiranje tokova masa, uzimanje uzoraka, račin mineralnog zrna, organizaciju eksperimenata i dr.

Primjer korištenja simulacije za korekciju tehnološkog procesa prikazat ćemo na rudniku Heath Steele



Sl. 5 Postojeća shema mljevenja i klasiranja

Fig. 5 Actual scheme of the grinding-classification circuit



Sl. 6 Predložena shema mljevenja i klasiranja

Fig. 6 Proposed scheme of the grinding-classification circuit

– Canada, gdje se oplemenjuje sitnozrna Zn–Pb–Cu–piritna ruda (Hodouin et al., 1980). Shema ciklusa mljevenja i klasiranja prikazana je na sl. 5.

U početku ruda je usitnjavana na 55% $-0,038$ mm, međutim ulaskom u nove dijelove ležišta pokazalo se da je potreban račin od približno 90% $-0,038$ mm. Odlučeno je da se promjene izvrše u ciklusu klasiranja, i to tako da se dobije što više klase 0,053/0,01 mm i što manje klase +0,105 i $-0,01$ mm. Za simulaciju su korišteni matricni i kinetički model za mlin s palicama odnosno kuglama te Lynch–Rao–Plittov model za hidrociklon. Na osnovi uzoraka uzetih u pogonu određen je udio čvrstog u suspenziji, grano-sastav te vrijeme zadržavanja materijala u mlinu s kuglama. Isto tako izvr-

šeno je i balansiranje masa pojedinih tokova materijala, te nakon prilagodbe modela pogonskim uvjetima određeni su i pojedini parametri modela. Tako pripremljen simulator dao je vrlo dobru uskladenost eksperimentalnih (pogonskih) i simuliranih rezultata. Ispitano je ukupno pet kombinacija rasporeda hidrociklona u primarnom i sekundarnom ciklusu te nakon toga predložena nova shema klasiranja. Shema i ostvareni rezultati prikazani su na sl. 6 i u tab. 3.

Tabela 3. Stvarni i simulirani rezultati
Table 3. Actual and simulated results

	kapacitet feed rate t/h	udio klase size portion %		
		-0,037 mm	-0,01 mm	+0,105 mm
Stvarno Actual	80	56,8	17,5	4,0
Simulirano Simulated				
konstantan kap. constant feed rate	80	60,2	18,6	4,1
konstantna klasa constant fraction -0,037 mm	89	56,8	17,5	5,4

Predložena shema klasiranja podvrgnuta je zatim ekonomskoj evaluaciji s ciljem da se utvrdi odnos troškova rekonstrukcije ciklusa klasiranja i dobiti koja će se ostvariti povećanjem iskorištenja i sadržaja metala u koncentratu.

Zaključak

Simulatori su postali nezamjenjivi u projektiranju i kontroli procesa. Za to će biti potreban dalji razvoj pouzdanijih matematičkih modela te mjernih uređaja, posebno za određivanje svojstava čestica i suspenzija. Posebna pažnja posvetit će se povezivanju procesnih simulatora s CAD softwarima te softwarima za ekonomsku evaluaciju procesa. Pod pretpostavkom daljeg uspješnog razvoja projektiranje, i kontrola procesa sve će se više oslanjati na moderne metodologije i tehnologije a manje na iskustvo inženjera.

Primljeno: 18. XII. 1989.

Prihvaćeno: 4. VI. 1990.

LITERATURA

- Armstrong, D.G. (1986): An alternative grindability test on improvement of the Bond procedure. *Int. J. of Min. Proc.*, 16, 195–208, Elsevier, Amsterdam
- Austin, L.G. (1971/72): A review introduction to the mathematical description of grinding as a rate process. *Pow. Tech.*, 5, 1–17, Elsevier, Amsterdam.
- Bond, F. C. (1960): Crushing and grinding calculations. *Brit. Chem. Eng.*, 6, 378–391, London.
- Broadbent, S.R., Callcott, T.G. (1956): A matrix analysis of processes involving particle assemblies, *Phil. Trans. R. Soc. Lond., A*, 249, 99–123, London.
- Broussaud, A. (1988): Advanced computer methods for mineral processing: Their function and potential impact on engineering practices. XVI Int. Min. Proc. Con., p. 17, Stockholm.
- Calanog, E. and Geiger, G. (1973): How to optimize crushing and screening through computer-aided design. *E/MJ*, 5, 82–87, New York.
- Epstein, B. (1948): Logarithmic-normal distributions in breakage of solids. *Ind. Eng. Chem.*, 40, 2289–2291.
- Furstenau, D. W. (1978): Research on comminution processes and simulation. *US Bureau of mines Report*, 51, 39–79.
- Herbst, J. A. and Fuerstenau, D. W. (1968): The zero order production of fine sizes in comminution and its implications in simulation. *AIME Trans.*, 241, 538–549.
- Hodouin, D., McMullen, J. and Everell, M.D. (1980): Mathematical simulation of the operation of a three-stages grinding circuit for a fine grained Zn/Pb/Cu ore. *Procc. of the Europ. Symp. on Part. Tech.*, p. 686, Amsterdam
- Karra, V. K. (1979): Development of a model for predicting the screening performance of a vibrating screen. *CIM BULL.*, 4, 161–171, Montreal.
- Lynch, A. J. (1977): Mineral crushing and grinding circuits: Their simulation, optimization, design and control. Elsevier, 342 pp., New York.
- Menacho, J. M. (1986): Some solutions for the kinetics of combined fracture and abrasion breakage. *Pow. Tech.*, 49, 87–89, Elsevier, Amsterdam.
- Nordberg Process Machinery (1976): Reference Manual, Rexnord, 1st edition, 14–8, 14–9.
- Salopek, B., Pfaff, S. and Garapić, M. (1986): Determination of milling matrix elements exemplified by laboratory ball mill tests. 1st IMPS, p. 24, Izmir.
- Salopek, B., Garapić, M. and Pfaff, S. (1987): Matematički model vibracijskog sita. XI. Jug. Simp. PMS, p. 95, Zagreb.
- Salopek, B., Pfaff, S. and Garapić, M. (1988): Matematički model mlina s kuglama. I. Jug. simp. primene mat. metoda i računara u rudarstvu i geologiji, II, p. 289, Beograd.
- Salopek, B., Garapić, M. and Pfaff, S. (1989): Voraussage der Arbeitsweise von Schwingsieben mittels Komputer. 2. Int. Fachtagung »Fortschritte in Theorie und Praxis der Aufbereitungstechnik, p. 255, Freiberg.

The Use of Computers in Mineral Dressing

B. Salopek, S. Pfaff, M. Garapić and S. Filipović

The successful operation of individual beneficiation devices and procedures depends on a great number of various parameters some of which at times are very difficult or even impossible to weigh or measure out, so that their influence remains unknown. But if these parameters are defined by convenient mathematical formulas and incorporated in a mathematical model designed on the base of measured parameters and particular physical laws than it is possible to study their influence with the help of computer analysis, and so the whole model define more satisfactory. The model design is sometimes a very complex task because during modelling even of relatively simple devices and procedures a great number of influential parameters show up (Fig. 1). Moreover, the choice of parameters which in a particular process have a dominant influence is of essential importance in the design of any high-quality model (Table 1). In mineral dressing mostly phenomenologic models are used, i. e. models which besides a physical basis, originated e. g. from the 1st-order kinetic law, T-curve, RTD-curve etc., contain also parameters with values which are determined inside the process proper. The quality of such models is limited by range and precision of the experiment performances.

In the last few years a real series of mathematical models for particular beneficiation processes and devices has been developed; some of them could be verified in the laboratory but confirmed in the plant, too. Table 2 gives a review of modelling procedures and model destinations with reliability estimations. As can be seen, the most reliable models have been developed for use in milling and classification operations; that can easily be understood in view of the fact that from the economy of the milling and classification circuits most often the economy of the whole plant depends upon.

The most reliable milling models / Bond, 1960; Austin 1971/72; Lynch, 1977; Armstrong 1986/ have been developed for ball mills. Besides the Bond model, still used for determination of mill size and power, the first model used in simulation operations was the so-called matrix-model (Broadbent and Callcott, 1956). For this model discrete grades and discrete time intervals are a prerequisite, and the milling process is defined by two functions: the selection function and the breakage function. The B-matrix elements are determined after eq. 4, and the elements of matrix S on the basis of the known size distribution of feed and products as well as on eq. 5, whereas the number of milling stages n is assured after the eq. 6.

At present, the most used milling process simulation model is the kinetic model. Its basis is constituted by the 1st-order rate process after which each grade is crushed with an intensity proportional to the particle mass in that grade. Here, too, the milling process is defined by the selection function S and the breakage function B; supposing that there are discrete grades, in a continuous milling time the milling equations 8 and 9 are attained. The matrix form of the milling equation is given by equations 10 and 11. The needed elements can be found by eq. 12 to 17. For prognostication of the plant-mill operation the selection function is to be made out on the basis of the feed and product size distribution and the equation 16 which, if necessary, has to be parameterized.

The classification process is shown in two models, i. e. by a vibrating screen model departing from the probability calculus, Model M1, and by a model with the Tromp oversize curve as basis Model M2 (Calanog et al., 1973; Lynch, 1977; Karra, 1979). After Model M1 the probability of a screen passage for a particle with the diameter d through an opening h with the wire diameter s is given by eq. 18, Fig. 2. The probability that the particle or the fraction does not pass the opening is given by eq. 19 to 22. The fractions of the individual over- and undersizes are calculated after eq. 23 and 24. In Model M2 the basis is represented by eq. 27 for the T-curve and the parameter d_{50} , whereas the coefficients are calculated with the help of eq. 30 to 36.

In designing new and correcting old flow-sheets now simulators are used more and more. They make it possible to compare quickly and reliable a great number of variants, what facilitates the choice of the most favourable decision. As an application example for a milling and classification circuit the plant of the mine Heath Steele is shown (Hodouin et al., 1980). In the simulation the matrix and kinetic milling model and the Lynch-Rao-Plitt hydrocyclone model were use. After a series of investigations a new classification flow-sheet was proposed; the results are presented in Fig. 6 and Table 3.

In the next few years simulators will become unavoidable tools in process design and control. By further development of the theory and by application of up-to-date measuring devices for the determination of particle and suspension properties new and more reliable models shall be developed. Particular attention will be devoted to the development of software; that shall make possible both the technological and economic evaluation of the operation.