

YU ISSN 0350—2627  
UDC: 55:621.7:622:669 (062.2) (497.1)

# RUDARSTVO GEOLOGIJA METALURGIJA

organ saveza inženjera i tehničara rudarske, geološke i metalurške struke jugoslavije

GODINA XL — 1989.  
BR. 3-4

TEHNIKA





# Primena računara za određivanje kinetike flotacije minerala galenita olovno-cinkove rude rudnika Sasa

Dr **BORIS KRSTEV**, docent Rudarsko-geološkog fakulteta u Štipu, **BLAGOJ GOLOMEOV**, saradnik Rudarsko-geološkog fakulteta, Štip

Originalni naučni rad

YU ISSN 0350-2627  
UDC: 622.344:622.765.098:549.328.1:681.142.2.497.17)=861

## 1.0 UVOD

S ciljem razjašnjenja teorije procesa kinetike flotacije, te razrade pojedinih metoda upravljanja, kao i rešenja sijaset tehnoloških pitanja, neophodno je ustanoviti karakter uticaja pojedinih osnovnih faktora flotacije na brzinu i efektivnost procesa. S obzirom na raznolikost i međuzavisnost većine faktora koji utiču na proces flotacije i njenu kinetiku, izostaje metod koji bi tačno i potpuno rešio zadatak definisanja i utanačavanja veze između brzine flotacije i njenih parametara. Zbog svega toga, pri svakom istraživanju se ograničavamo ispitivanjima najvažnijih uticajnih faktora, kao što su: krupnoća čestica mineralnih zrna, sadržaj čvrste faze u pulpi, reagent-ski režim, karakteristike aparata i drugo. Pri svemu tome, od stepena istraženosti ovih faktora zavisi i rešavanje osnovnih tehnoloških pitanja: intenzifikacije flotacije čestica graničnih klasa krupnoće, uzajamnog uticaja čestica različite krupnoće, optimizacija konstrukcije flotacionih mašina i slično [1, 2, 3].

U ovom radu će biti prikazani rezultati laboratorijskih ispitivanja kinetike flotacije minerala galenita olovno-cinkove rude rudnika Sasa, SR Makedonija, posebno ispitivanje faktora reagenskog režima (pH — vrednosti pulpe), preko BASIC — kompjuterskog programa na računaru Apple II od 143 Kb, sa opisom procedure u izvođenju programa i konačnom formom izlaznih rezultata.

## 2.0 TEORIJSKI OSNOVI PRORAČUNA KINETIČKIH KARAKTERISTIKA PROCESA FLOTACIJE MINERALNIH SIROVINA

Kinetiku procesa flotacije mineralne sirovine moguće je ispitivati u dva stadijuma.

a) Na osnovu eksperimentalno dobijenih podataka određuje se karakter promene iskorišćenja korisne komponente u zavisnosti od vremena pri čemu istovremeno određujemo grafičku zavisnost u koordinantima  $I-t$ , odnosno  $\Delta I-t$  (sl. 1a), pri tome koristeći standardne jednačine za tehnološke pokazatelje u procesu koncentracije: iskorišćenje korisnog metala u koncentratu » $I$ «; iskorišćenje jalovine u koncentratu » $i$ « i efikasnosti koncentracije » $E$ «.

b) Na osnovu dobijenih eksperimentalnih zavisnosti, predlaže se kinetička jednačina čije rešenje odgovara eksperimentalno dobijenoj krivoj. U praktičnoj primeni u svojstvu jednačine kinetike procesa flotacije koriste se jednačine prvog reda oblika K. F. Beloglatov [19].

$$\frac{dI}{dt} = K(I - I_0) \quad (1)$$

$$\ln \left( \frac{I - I_0}{I_0 - I_0} \right) = K \cdot t \quad (2)$$

$$I = I_0 - e^{-K \cdot t} \quad (3)$$

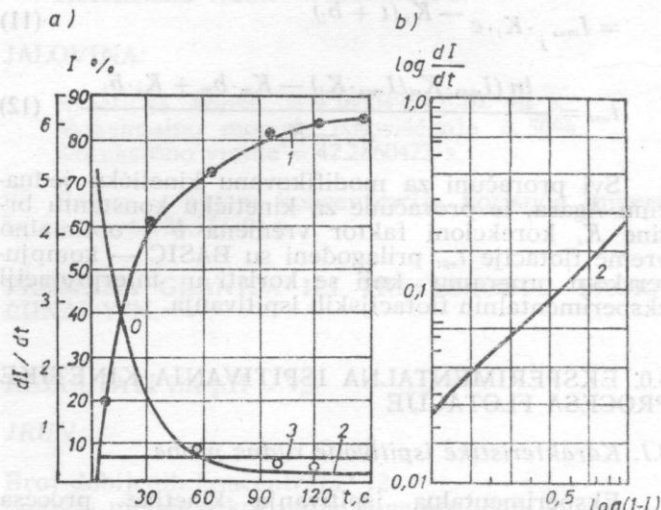
$$\lg \frac{dI}{dt} = \lg K + \lg(I - I_0) \quad (4)$$

gde su:

- $K$  — kinetička konstanta brzine;  $s^{-1}$
- $I$  — iskorišćenje metala u koncentratu; %
- $t$  — vreme flotacije; s.

Grafik u koordinantima  $(\lg \frac{dI}{dt}, \lg(I - I_0))$  mora da predstavlja pravu liniju (sl. 1b), postavljenu po osi ordinate sa presekom od  $\lg K$  i nagibu od ose apscise za  $45^\circ$ .

Realne kinetičke krive, zbog nejednorodnosti materijala često odstupaju od propisanih. Međutim, iskorišćenje korisne komponente pomoću jednačine (3) potrebno je pomnožiti sa  $I_{max}$  pri čemu se dobija sledeća jednačina:



Sl. 1 — Grafički prikaz zavisnosti  $(I-t)$ , (a), i zavisnosti  $\lg dI/dt - \lg(I - I_0)$

Adresa autora: dr Boris Krstev, Rudarsko-geološki fakultet, Štip  
Rad primljen 12. XI 1988. god.

$$I = I_{max} (1 - e^{-K \cdot t}) \quad (5)$$

Međutim Agar je pokazao da ovo mora da se modifikuje tako što će se uključiti korekcionni faktor vremena »b«, i tako dobiti jednačina:

$$I = I_{max} (1 - e^{-K(t+b)}) \quad (6)$$

Pri tome, prikazani grafik  $\ln(I_{max} - I)/I_{max} - (t + b)$  bi dao pravolinijsku zavisnost sa tangensom ugla »K«. Kako su vrednosti za K i b nepoznate, koristeći eksperimentalne podatke za I i t, pri dozvoljenoj grešci  $r_i$  dobijamo [4]:

$$\ln(I_{max} - I_i)/I_{max} + K(t + b) = r_i \quad (7)$$

te koristeći uslov za  $\sum_{i=1}^n r_i^2$  bude minimalno kada su:

$$d \sum_{i=1}^n r_i^2 / dk = 0 \quad \text{i} \quad d \sum_{i=1}^n r_i^2 / db = 0 \quad (8)$$

U tom slučaju vrednosti za kinetičku konstantu brzine K i korekcionni faktor vremena b mogu biti rešeni pomoću jednačina:

$$K = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n t \cdot \ln(I_{max} - I)/I_{max} - \sum_{i=1}^n \ln(I_{max} - I)/I_{max} \cdot \sum_{i=1}^n t}{n \sum_{i=1}^n t^2 - \left( \sum_{i=1}^n t \right)^2} \quad (9)$$

$$b = \frac{K \sum_{i=1}^n t + \sum_{i=1}^n \ln(I_{max} - I)/I_{max}}{n \cdot K} \quad (10)$$

pri čemu se početno  $I_{max}$  može uzeti 100% da bi se vrednost za K i b proračunale jednačinama (9) i (10).

Pomoću prethodne jednačine diferencirane preko vrednosti kinetičke konstante brzine K ( $dI/dK$ ), pri čemu se proračuni izvode i za koristan mineral i jalove minerale, može da se odredi optimalno vreme flotacije:

$$I_{max, m} \cdot K_m \cdot e^{-K_m(t+b_m)} = I_{max, j} \cdot K_j \cdot e^{-K_j(t+b_j)} \quad (11)$$

$$t_{opt} = \frac{\ln(I_{max, m} \cdot K_m / I_{max, j} \cdot K_j) - K_m \cdot b_m + K_j \cdot b_j}{K_m - K_j} \quad (12)$$

Svi proračuni za modifikovanu kinetičku jednačinu Agara, te proračune za kinetičku konstantu brzine K, korekcionni faktor vremena b i optimalno vreme flotacije  $t_{opt}$  prilagođeni su BASIC — kompjuterskom programu koji se koristi u interpretaciji eksperimentalnih flotacijskih ispitivanja.

### 3.0. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA KINETIKE PROCESA FLOTACIJE

#### 3.1. Karakteristike ispitivane rudne probe

Eksperimentalna ispitivanja kinetike procesa flotacije minerala galenita PbS olovo-cinkove rude rudnika Sasa — SR Makedonija, izvršeni su na rudnim probama sledećeg delimičnog hemijskog sasta-

va: 3,38 — 3,64% Pb; 2,14 — 2,16% Zn; 11,13% Fe; 0,21% Cu; 0,017% Cd i 29 gr/t Ag.

Radni parametri eksperimentalnih ispitivanja su sledeći:

- finoća mlevenja 67,7% — 0,074 m;
- odnos Č:T u procesu mlevenja 1:0,45;
- vreme mlevenja 20 min;
- vreme kondicioniranja 5 min;
- reagentski režim:

$$pH_1 = 8,5 \quad \text{i} \quad pH_2 = 9,5$$

NaCN	30 gr/t
KAX	160 gr/t
D-250	40 gr/t
CuSO <sub>4</sub> · 5 H <sub>2</sub> O	170 gr/t

Eksperimentalna ispitivanja su izvršena na laboratorijskoj flotacijskoj mašini tipa Denver u vremenu flotiranja od 30 min, pra čemu u prvih 12 minuta vremenski priraštaj iznosi 2 minuta, a u poslednjih 18 minuta 3 minuta.

#### 3.2. Opis procedure izvođenja programa i konačni izlazni rezultati programa

Korišćeni program za seriju flotacijskih opita je u BASIC-u, obrađen na računaru Apple II sa 143 Kb. Program je u suštini, napravljen iz dva dela. U prvom delu se omogućava proračunavanje pojedinih tehnoloških pokazatelja flotacije: iskorišćenje I, iskorišćenje jalovine u koncentratu  $i_j$ , te efikasnost koncentracije E, na osnovu zadatih masenih udela i sadržaja metala u proizvodima flotacije pri različitim vrednostima pH. U drugom delu, na osnovu dobijenih rezultata i tabela vrši se proračun kinetičkih karakteristika flotacije koristeći jednačinu Agara, dobijajući vrednosti za K i b, te optimalno vreme flotiranja. Konačni izlazni rezultati su u obliku tabela ili izdvojenih štampanim tekstom.

#### REZULTATI ZA pH = 8,5

##### JRUN

Broj dobijenih koncentrata? 12

Sadržaj metala u korisnom mineralu? 86,6

Ubaciti podatke o dobijenim koncentratima

Vreme 120

Masa koncentrata (g) 40

Kvalitet koncentrata (metal %) 32,37

Vreme 240

Masa koncentrata (g) 28,8

Kvalitet koncentrata (metal %) 27,54

Vreme 360

Masa koncentrata (g) 25,3

Kvalitet koncentrata (metal %) 18,02

Vreme 480

Masa koncentrata (g) 16,7

Kvalitet koncentrata (metal %) 11,25

Vreme 600

Masa koncentrata (g) 36

Kvalitet koncentrata (metal %) 4,53



## Vreme 720

Masa koncentrata (g) 27,5  
Kvalitet koncentrata (metal %) 2,74

## Vreme 900

Masa koncentrata (g) 15,2  
Kvalitet koncentrata (metal %) 2,03

## Vreme 1080

Masa koncentrata (g) 38,3  
Kvalitet koncentrata (metal %) 0,84

## Vreme 1260

Masa koncentrata (g) 17,3  
Kvalitet koncentrata (metal %) 1,30

## Vreme 1440

Masa koncentrata (g) 10,5  
Kvalitet koncentrata (metal %) 1,47

## Vreme 1620

Masa koncentrata (g) 12,8  
Kvalitet koncentrata (metal %) 1,47

## Vreme 1800

Masa koncentrata (g) 5,7  
Kvalitet koncentrata (metal %) 2,03

Masa jalovine (g) 725,9  
Kvalitet jalovine (metal %) 0,38

Kumulativna ocena dobijenih podataka.

E predstavlja efikasnost koncentracije.

T (s)	I—M (%)	Sod. M %	I—J (%)	E (%)
120	38,35	32,37	2,61	35,74
240	61,84	30,35	4,65	57,19
360	75,34	27,03	6,74	68,6
480	80,9	24,65	8,25	72,65
600	85,73	19,72	11,8	73,93
720	87,96	17,04	14,57	73,39
900	88,88	15,84	16,11	72,76
1080	89,83	13,32	20,06	69,77
1260	90,5	12,47	21,83	68,66
1440	90,93	12,01	22,91	68,02
1620	91,49	11,51	24,22	67,27
1800	91,83	11,31	24,8	67,03

Pretisni RETURN za dobijanje podataka kinetike procesa flotiranja.

Zahtevana teorijska preciznost proračuna (A/B/C/D/E).

- A. 1,0%
- B. 0,5%
- C. 0,2%
- D. 0,1%
- E. 0,05%
- ?B

Realno moguće iskorišćenje korisnog minerala 100.

Najmanje očekivano iskorišćenje? (ovo mora da bude veće od iskorišćenja u drugom opitu) 80.

Najviša granica za jalovinu u pogledu iskorišćenja korisnog minerala u njoj 50.

I najniža granica? (mora biti veća od iskorišćenja dobijeno u drugom opitu) 15.

Podaci za kinetiku flotacije

MINERAL:

Kinetička konst. = 0150240511 za s.  
Maksimalno moguće iskorišćenje = 85,5%.  
Korekciono vreme — 34,341412 sec.

JALOVINA:

Kinetička konst. = 9,36604954E-04 za s.  
Maksimalno moguće iskorišćenje = 50%.  
Korekciono vreme = 42,2860423 s.

Vreme u kojem koncentracija korisnog minerala završava 580,819112 s.

PROMENA GRANICA ILI PRECIZNOSTI PRORAČUNA? Y/N

Zahtevana teorijska preciznost proračuna (A/B/C/D/E).

- A. 1,0%
- B. 0,5%
- C. 0,2%
- D. 0,1%
- E. 0,05%
- ?D

Realno moguće iskorišćenje korisnog minerala 100.

Najmanje očekivano iskorišćenje? (ovo mora da bude veće od iskorišćenja u drugom opitu) 80.

Najviša granica za jalovinu u pogledu iskorišćenja korisnog minerala u njoj 50. I najniža granica (mora biti veća od iskorišćenja dobijeno u drugom opitu) 15.

Podaci za kinetiku flotacije

MINERAL:

Kinetička konst. = .0147820444 za s.  
Maksimalno moguće iskorišćenje = 85,7%.  
Korekciono vreme — 32.5381278 s.

JALOVINA:

Kinetička konst. = 9.36604954 E-04 za s.  
Maksimalno moguće iskorišćenje = 50%.  
Korekciono vreme = 42.2860423 s.

Vreme u kojem koncentracija korisnog minerala završava 586,133301 s.

PROMENA GRANICA ILI PRECIZNOSTI PRORAČUNA? Y/N.

REZULTATI ZA pH = 9,5

JRUN

Broj dobijenih koncentrata? 12  
Sadržaj metala u korisnom mineralu? 86,6

Ubaci podatke o dobijenim koncentratima.

Vreme 120

Masa koncentrata (g) 31  
Kvalitet koncentrata (metal %) 33,75

Vreme 240

Masa koncentrata (g) 25  
Kvalitet koncentrata (metal %) 18,47

Vreme 360

Masa koncentrata (g) 28,3  
Kvalitet koncentrata (metal %) 19,10

Vreme 480

Masa koncentrata (g) 22,1  
Kvalitet koncentrata (metal %) 14,59

Vreme 600

Masa koncentrata (g) 26,7  
Kvalitet koncentrata (metal %) 8,17

Vreme 720

Masa koncentrata (g) 29,2  
Kvalitet koncentrata (metal %) 3,23

Vreme 900

Masa koncentrata (g) 11,2  
Kvalitet koncentrata (metal %) 3,23

Vreme 1080

Masa koncentrata (g) 34,3  
Kvalitet koncentrata (metal %) 2,06

Vreme 1260

Masa koncentrata (g) 21,3  
Kvalitet koncentrata (metal %) 1,89

Vreme 1440

Masa koncentrata (g) 13,7  
Kvalitet koncentrata (metal %) 3,13

Vreme 1620

Masa koncentrata (g) 10  
Kvalitet koncentrata (metal %) 1,82

Vreme 1800

Masa koncentrata (g) 5,5  
Kvalitet koncentrata (metal %) 2,75

Masa jalovine (g) 741,7  
Kvalitet jalovine (metal %) .38

Kumulativna ocena dobijenih podataka.

E predstavlja efikasnost koncentracije.

T (s)	I—M (%)	Sod. M %	I—J (%)	E (%)
120	32,81	33,75	1,96	30,85
240	47,29	26,93	4,01	43,29
360	64,25	24,3	6,3	57,95
480	74,36	22,28	8,2	66,15
600	81,2	19,45	10,71	70,48
720	84,16	16,53	13,63	70,52
900	85,29	15,67	14,75	70,54
1080	87,51	13,43	18,23	69,28
1260	88,77	12,35	20,39	68,38
1440	90,12	11,83	21,76	68,35
1620	90,69	11,44	22,78	67,91
1800	91,16	11,25	23,33	67,83

Pritisni RETURN za dobijanje podataka kinetike procesa flotiranja.

Zahtevana teorijska preciznost proračuna (A/B/C/D/E).

- A. 1,0%
- B. 0,5%
- C. 0,2%
- D. 0,1%
- E. 0,05%
- ?B

Realno moguće iskorišćenje korisnog minerala 100. Najmanje očekivano iskorišćenje? (ovo mora da bude veće od iskorišćenja u drugom opitu) 80.

Najviša granica za jalovinu u pogledu iskorišćenja korisnog minerala u njoj 50. I najniža granica? (mora biti veća od iskorišćenja dobijeno u drugom opitu) 15.

Podaci za kinetiku flotacije

MINERAL:

Kinetička konst. = .0127515301 za s.  
Maksimalno moguće iskorišćenje = 81%.  
Korekciono vreme — 52,8841183 s.

JALOVINA:

Kinetička konst. = 8,63756847E-04 za s.  
Maksimalno moguće iskorišćenje = 50%.  
Korekciono vreme = 33,1039661 s.

Vreme u kojem koncentracija korisnog minerala 674,130963 s.

PROMENA GRANICA ILI PRECIZNOSTI PRORACUNA? Y/NY

Zahtevana teorijska preciznost proračuna (A/B/C/D/E).

- A. 1,0%
- B. 0,5%
- C. 0,2%
- D. 0,1%
- E. 0,05%
- ?D

Realno moguće iskorišćenje korisnog minerala 100. Najmanje očekivano iskorišćenje? (ovo mora da bude veće od iskorišćenja u drugom opitu) 80.

Najviša granica za jalovinu u pogledu iskorišćenja korisnog minerala u njoj 50. I najniža granica? (mora biti veća od iskorišćenja dobijeno u drugom opitu) 15.

Podaci za kinetiku flotacije

MINERAL:

Kinetička konst. = .0126716865 za s.  
Maksimalno moguće iskorišćenje = 81,1%.  
Korekciono vreme — 52,2810284 s.

JALOVINA:

Kinetička konst. = 8,63756847E-04 za s.  
Maksimalno moguće iskorišćenje = 50%.  
Korekciono vreme = 33,1039661 s.

Vreme u kojem koncentracija korisnog minerala završava 676.700116 s.

PROMENA GRANICA ILI PRECIZNOSTI PRORACUNA? Y/N

### 3.3. Diskusija dobijenih konačnih rezultata korišćenog programa

Na osnovu izlaznih rezultata BASIC — kompjuterskog programa za kinetiku procesa flotacije galenita olovo-cinkove rude rudnika Sasa pri različitim pH vrednostima (pH = 8,5 i pH = 9,5) može se sagledati sledeće:

— maksimalno iskorišćenje metala u koncentraciji iznosi oko 85,7% dobijeno pri optimalnim vremenom flotacije od oko 586,1 s. pri pH = 8,5 kod preciznosti proračuna od  $r = 0,1\%$ ;

— kinetička jednačina koja odgovara dobijenim rezultatima ima sledeći oblik:

$$I = I_{max} (E - e^{-0,01478 (t+32,5)})$$

— maksimalno iskorišćenje metala u koncentraciji iznosi oko 81,1% dobijeno pri optimalnim vremenom flotacije od oko 676,7 s. pri pH = 9,5 kod preciznosti proračuna od  $r = 0,1\%$ ;

— potvrđuje se ranije stečeno saznanje da galenit uspešnije flotira pri nižim vrednostima pH.

### ZAKLJUČAK

Prikaz konačnih izlaznih rezultata BASIC — kompjuterskog programa kinetike flotacije galenita u ovom radu omogućava da se na jedan brži i kvalitetniji način obrađuju podaci kako iz naučnoistraživačkog rada za interpretaciju pojedinih procesa, tako i iz kontrole pojedinih postrojenja u oblasti pripreme mineralnih sirovina.

Dobijeni rezultati kinetike flotacije potvrđuju tu mogućnost u budućnosti da se mora očekivati još jači prodor računara, a istovremeno i njihovo povezivanje sa različitim novim te savremenim mernim instrumentima koji povećavaju tačnost merenja, odnosno optimiranje rada postrojenja i dobijanju boljih tehnoloških rezultata bilo kog procesa koncentracije mineralnih sirovina.

### LITERATURA

- [1] Rubinštajn J. B., Filipov V., Kinetika flotacije, Nedra, 1980.
- [2] Deušić S., Salatić D., Primena matematičkih metoda i računara u rudarstvu i geologiji; I jug. simpozijum, Beograd, 1988.
- [3] Očepek D., Stražičar J., Primena matematičkih modela i računara u rudarstvu i geologiji; I jug. simpozijum, Beograd, 1988.
- [4] Wills B. A., Mineral Processing Technology, Toronto, 1988.