

## ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МОЩНОСТТА НА БАРАБАННА ПОЛУАВТОГЕННА МЕЛНИЦА ТИП SAG 8,5 X 5,3 ЧРЕЗ МЕТОДИТЕ НА МАТЕМАТИЧЕСКАТА СТАТИСТИКА

**Иван Минин**

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: [minin@dir.bg](mailto:minin@dir.bg)

**РЕЗЮМЕ.** Изследвани са параметрите влияещи на мощността, изразходвана от полуавтогенна мелница, работеща в условията на „Челопеч Майнинг“ – АД. Направен е пасивен факторен експеримент, като резултатите от него са обработени с методите на математическата статистика. Получен е адекватен математичен модел чрез който може да бъде определена мощността на двигателя на мелницата.

### DETERMINATION OF THE POWER OF TUMBLING SAG MILL TYPE SAG 8,5 X 5,3 BY METHODS OF MATHEMATICAL STATISTICS

**Ivan Minin**

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, e-mail: [minin@dir.bg](mailto:minin@dir.bg)

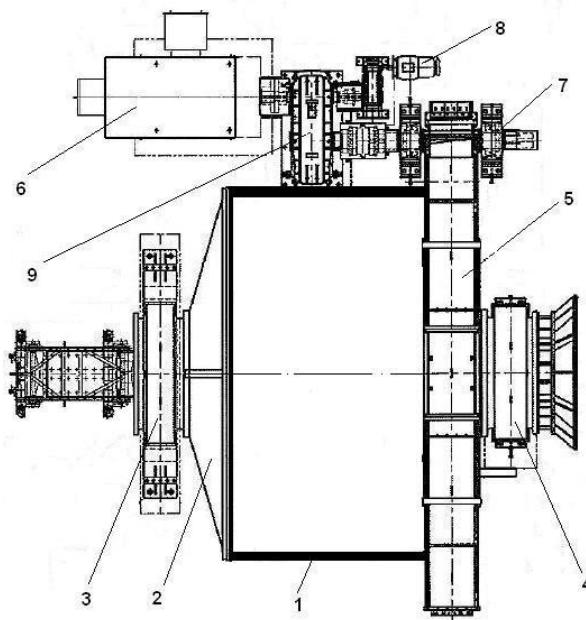
**ABSTRACT.** The parameters affecting the consumed power of SAG mill operating in "Chelopech Mining" were examined. There was made a passive factorial experiment, the results of which are processed through the methods of mathematical statistics. An adequate mathematical model is received by which the engine power of the mill can be determined.

### Състояние на проблема

Методиките за определяне на мощността на барабанните мелници дават сравнително точни резултати при изчисляването на мощността на двигателите на топковите и прътови барабанни мелници. Обаче, при изчисляване на мощността на двигателите на автогенните и полуавтогенните барабанни мелници, те дават резултати различаващи се съществено от действителните. Това се дължи вероятно на факта, че много съществени параметри влияещи на изразходваната мощност, остават неопределени и не могат да бъдат предвидени. Такива са едрината на рудните късове в барабана на мелницата, количеството на топките, средната плътност на пълнежа и др.

При определяне на мощността на двигателя на полуавтогенна барабанна мелница, работеща в условията на „Челопеч Майнинг“-АД, е използвана една от най-разпространените методики за определяне на мощността на двигателите на барабанните мелници.

Мелница тип METSO - SAG 8,5 X 5,3 (Фиг. 1) се състои от барабан 1, със страничните дъна (капази) 2, на които са монтирани шийките лагерувани на плъзгащите лагери 3 - заден и 4 - преден. Двигателят 6 задвижва чрез съединител редуктора 9, който е куплиран на вал-зъбното колело 7, зацепено със зъбният венец 5. Задвижването е оборудвано и с помощен двигател 8 и спирачка използвани при техническо обслужване и ремонт на мелницата.



Фиг. 1 Общ изглед на мелница SAG 8,5 X 5,3

Методиката за определяне на мощността (Цветков, 1976; Минин, 2012) на двигателя на мелницата води до получаването на следните резултати:

1. Светъл диаметър на барабана

$$D_1 = D_8 - 2\delta = 8m; \quad (1)$$

където:

$D_{\delta} = 8,5m$  е диаметърът на барабана;  
 $\delta = 0,25m$  - дебелината на облицовката.

2. Критична ъглова скорост на барабана

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{2g}{D_1}} = 1,566rad / s \quad (2)$$

където:

$g$  - земното ускорение;  
 $D_1 = 8m$  - светлият диаметър на барабана.

3. Действителна ъглова скорост на барабана:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = 1,088rad / s, \quad (3)$$

където  $n = 10,4 min^{-1}$  е честотата на въртене на барабана.

4. Относителна ъглова скорост на барабана

$$\psi = \frac{\omega}{\omega_{кр}} = 0,7 = 70\%. \quad (4)$$

Получената стойност на критичната ъглова скорост на барабана показва, че мелницата работи в каскаден скоростен режим.

5. Работен обем на мелницата

$$V_1 = \pi \cdot R_1^2 \cdot L = 273m^3 \quad (5)$$

където:

$R_1 = \frac{D_{\delta} - 2\delta}{2}$  е радиусът на барабана без облицовката;  
 $L$  - дължината на барабана.

6. Маса на пълнежа на мелницата

$$M_{CM} = M_T + M_P = M_T + \rho_P \cdot V_1 \cdot \varphi = 232000kg \quad (6)$$

където:  $M_P, kg$  е масата на рудата в мелницата;

$M_T = 30000kg$  е масата на топките в барабана на мелницата;

$\rho_P = 2700kg / m^3$  - плътността на рудата;

$\varphi = 0,35$  - коефициентът на запълване на барабана на мелницата.

7. Тегло на смилащата и смилана среда

$$G_{CM} = g \cdot M_{CM} = 2280 \cdot 10^3 N. \quad (7)$$

8. Тегло на барабана

$$G_{\delta} = g \cdot M_{\delta} = 5830 \cdot 10^3 N, \quad (8)$$

където  $M_{\delta} = 583000kg$  е масата на барабана на мелницата с включени в него всички въртящи се маси.

9. Мощност на празен ход

$$N_{пр.х.} = 0,5 \cdot \mu \cdot G_{\delta} \cdot \omega \cdot d \approx 64kW, \quad (9)$$

където:

$\mu = 0,01$  е коефициентът на триене в лагерите;

$G_{\delta}$  - теглото на барабана;

$\omega$  - действителната ъглова скорост;

$d = 2m$  - диаметърът на шийката на лагерите на мелницата.

10. Допълнителна мощност

$$N_{дон.} = 0,5 \cdot \mu \cdot G_{CM} \cdot \omega \cdot d \approx 25kW, \quad (10)$$

където  $G_{CM}$  е теглото на смилащата среда.

11. Мощност на издигане на топките и смилащата среда

$$N_G = \rho_{CM} \cdot g \cdot L \cdot \omega_{кр} \cdot \Psi^3 \cdot R_1^3 \left[ \left(1 - k_2^4\right) - \frac{2}{3} \Psi^4 \left(1 - k_2^6\right) \right] = 2331kW \quad (11)$$

където:

$\rho_{CM} \approx 3725kg / m^3$  е плътността на смилащата среда. Тя се определя като усреднена стойност от плътността на топките и плътността на рудата.

$\Psi$  - относителната ъглова скорост на барабана;

$k_2 = 0,551$  - относителният радиус за най-вътрешния слой от топките и едри късове руда.

Стойности на относителният радиус  $K_2 = R_2 : R_1$  в зависимост от параметрите  $\psi$  и  $\varphi$  са показани на таблица 1.

Таблица 1

Коефициент на запълване на $\varphi$ , %	Стойности на $K_2$ при относителна скорост $\psi$ , %			
	65	70	75	80
30	0,527	0,635	0,700	0,746
35	-	0,511	0,618	0,683
40	-	0,237	0,508	0,606
45	-	-	0,288	0,506
50	-	-	-	0,332

12. Мощност на двигателя за задвижване на мелницата

$$N_{дв.} = \frac{N_{пр.х.} + N_{дон.} + N_G}{1000 \cdot \eta_{\mu}} \approx 3100kW, \quad (13)$$

където:

$N_{пр.х.}$  е мощността на празен ход;

$N_{дон.}$  - допълнителната мощност;

$N_G$  - мощността на издигане на топките и едрите късове руда;

$\eta_{\mu} = 0,78$  - механичен К.П.Д. на задвижването.

Полученият резултат значително се различава от инсталираната мощност на мелницата, която е  $5400kW$ .

Получената значителна разлика между изчислената и реално инсталираната мощност на двигателя на полуавтогенната барабанна мелница показва, че методиките за определяне на мощността не могат да бъдат използвани за автогенните и полуавтогенни барабанните мелници. Единствения начин да бъде определена мощността на подобен тип машини, е създаването на точен адекватен математичен модел на базата на многофакторен

експеримент, който чрез методите на подобие да бъде използван за определяне на мощността на всякакви по типоразмер полуавтогенни мелници.

## Провеждане на пасивен факторен експеримент

Целта на проведеното изследване е да се опише с математически средства мощността на двигателя чрез провеждане на пасивен факторен експеримент. За целта са направени измервания върху мелница тип SAG 8,5 x 5.3 работеща в условията на "Челопеч Майнинг" - АД.

Като управляващи фактори в изследването са определени следните параметри:

1. Маса на пълнежа на мелницата  $M_{CM,t}$ . Този параметър се измерва от товарна клетка посредством тензометрични датчици, монтирани в задния лагер на мелницата.

2. Обороти на двигателя на мелницата  $min^{-1}$ . Измерванията са направени посредством скоростен датчик за измерване на оборотите на двигателя на .

3. Вътрешен диаметър на барабана на мелницата  $D,m$ . Този параметър зависи от износването на облицовките и се определя посредством измервания с лазерна рулетка в 6 места от цилиндъра на барабана като се изчислява средно аритметична стойност.

След направените измервания са получени следните резултати, показани в таблица 2.

Таблица 2

№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1$
	D, m	$M_{CM, t}$	$n_{min^{-1}}$	P, kW
1.	8,308	106,17	1069,5	5930
2.	8,308	105,7	1047,7	5774,4
3.	8,308	105,4	1052,3	5781
4.	8,394	103,1	1069	5775,8
5.	8,394	103	1069	5756,8
6.	8,394	104	1090	6189
7.	8,405	103,8	1090,4	6176
8.	8,405	103	1090,6	6166
9.	8,1	110,6	1069,5	5019,1
10.	8,1	110,4	1062,5	5014,7
11.	8,1	110,2	1038,3	5010,6
12.	8,15	113,1	1004,3	5152,1
13.	8,15	113,1	1004,3	5077,6
14.	8,15	113,1	1004,4	5100,6
15.	8,176	109,7	1014,4	5470
16.	8,176	109,8	1014,5	5545,8
17.	8,176	109,9	1014,7	5567,1
18.	8,21	104,3	1012	5108
19.	8,21	104,3	1012,9	5147,7
20.	8,21	104,3	1013,6	5140,4

21.	8,22	107,5	1015,1	5234,3
22.	8,22	107,6	1015,3	5212,6
23.	8,22	107,64	1015,6	5228,6
24.	8,22	106,8	1010,2	5261,7
25.	8,22	106,8	1069,5	5276
26.	8,22	107	1011	5228
27.	8,28	107,2	1011	5606,4
28.	8,33	100,1	1017,8	5386,7
29.	8,33	100,1	1043,7	5426,7
30.	8,33	100,1	1044	5423,3
31.	8,33	107,5	1044,2	5647,7
32.	8,33	107,4	1017,8	5576,5
33.	8,39	96,3	1017,8	5534,4
34.	8,39	96,3	1062,6	5574
35.	8,39	96,3	1062,6	5534,2
36.	8,1	113,3	1062,6	4853
37.	8,1	113,3	1005,3	4856
38.	8,1	113,3	1005,3	4859
39.	8,12	115,6	1005,4	4857,5
40.	8,12	115,6	951,6	5415,1
41.	8,12	115,6	977,4	5396,7
42.	8,16	113,6	991,8	4891
43.	8,16	114	963,4	4935,6
44.	8,16	114,5	963,3	4700
45.	8,21	109,5	933,7	4872
46.	8,21	109,6	971,6	4916
47.	8,21	109,7	974	4740
48.	8,22	107,4	964,4	3984
49.	8,22	107,9	878,6	3977
50.	8,22	108,4	876	3974
51.	8,22	105	877	5364
52.	8,22	105	1034,5	5362
53.	8,1	117,8	1033,1	3453
54.	8,1	117,8	880,6	3438
55.	8,1	117,8	880,6	3442
56.	8,15	115,2	879,8	4826,8
57.	8,15	115,2	1004,3	4858,3
58.	8,15	115,2	1004,2	4796
59.	8,2	111,7	1004,2	4215,7
60.	8,2	111,7	939,6	4003,5

## Статистическа обработка на резултатите от измерването

Резултатите от експеримента са обработени статистически, като се използва програма STATGRAFICS.

Оценката на значимостта на коефициентите на регресия се извършва по критерия на Студент при ниво на значимост  $\alpha = 0,05$  и 8 бр. на степени на свобода  $\nu \geq 8$

(Божанов и др., 1973). В програмата тази процедура е известна като се оценява вероятността за значимост на коефициентите на регресия. Ако тази вероятност е  $P - Value < \alpha$ , то коефициентът на регресия е значим.

Аналогично се оценява и адекватността на уравнението посредством значимостта на критерия на Fisher. Ако стойността на критерия е  $< \alpha$  то уравнението е адекватно.

За целите на практическото изследване на работния процес са търсени модели и коефициенти на регресия, които могат да бъдат приети с нива на доверителна вероятност над 95 %, като се очаква, че допустими нива на инженерната грешка от 5% са приемливи за технически изделия, каквито са барабанните полуавтогенни мелници и конкретно – SAG 8,5x5,3.

В резултат от статистическия анализ на мощността на барабанната полуавтогенна мелница са получени няколко модела, които не могат да бъдат определени като адекватни поради това, че не отговарят на описаните по горе оценки. Освен тях се получи и модел с много висок коефициент на регресия (над 99%) и много висока оценка по критерия на Фишер, което дава основание да се счита че този модел е адекватен и с много голяма точност дава връзка между управляващите фактори и целевата функция – мощност. Параметрите на този модел са показани в таблица 3.

Таблица 3

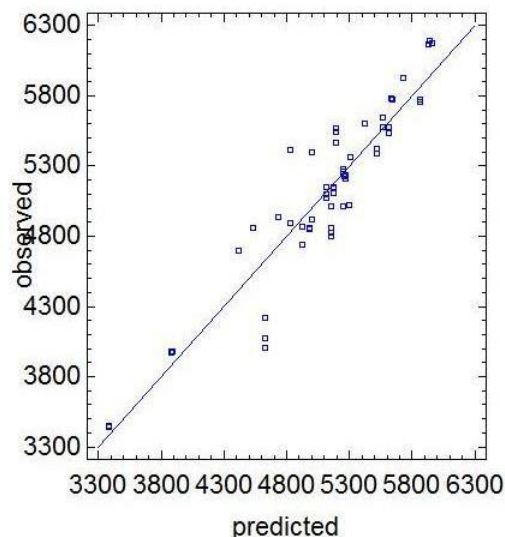
Parameter	Estimate	Error	Statistic		P-Value
X <sub>1</sub>	2757,53	536,06	5,14411		0
X <sub>2</sub>	260,063	48,23	5,39218		0
X <sub>3</sub>	-19,32	4,97	-3,88883		0,0003
X <sub>2</sub> / X <sub>3</sub>	-265,891	45,74	-5,81267		0
	<b>Sum of Squares</b>	<b>Df</b>	<b>Mean Square</b>	<b>F-Ratio</b>	<b>P-Value</b>
<b>Model</b>	1,60E+09	4,00	4E+08	77168	0
<b>Residual</b>	2,95E+06	57,00	51778,4		
<b>Total</b>	1,60E+09	61,00			
<b>R squared</b>				99,8157%	
<b>R squared (adjusted for d.f.)</b>				99,806%	
<b>Standard Error of Est.</b>				227,549	
<b>Mean absolute error</b>				163,481	
<b>Durbin – Watson statistic</b>				0,623789	
<b>Lag 1 residual autocorrelation</b>				0,627814	

На фигура 2 е показано графично корелационната връзка между експерименталните данни и полученият модел.

Разглеждайки параметрите на този модел се вижда, че коефициентът на множествена корелация  $R^2$  е 99,82%, а коригираният коефициент на множествена корелация е над 99%. Стойността на показателя на доверителна вероятност ( $P-Value < 0,005$ ) за модела е под критичната, т.е. може да се приеме, че моделът е адекватен.

Математически този моделът може да бъде представен във вида:

$$Y = 2757,5 \cdot X_1 + 260 \cdot X_2 - 19,32 \cdot X_3 - 0,29 \frac{X_2}{X_3} \quad (14)$$



Фиг. 2

С натурални параметри моделът може да бъде представен по следния начин:

$$P = 2757,5 \cdot D + 260 \cdot M_{CM} - 19,32 \cdot n - 0,29 \frac{M_{CM}}{n}, kW \quad (15)$$

#### 4. Изводи

1. Полученият математичен модел с голяма точност определя мощността на мелницата в зависимост от диаметъра на барабана, масата на пълнежа и ъгловата скорост на барабана на мелницата.
2. С нарастването на диаметъра на барабана на мелницата нараства мощността на двигателят и. Това се дължи на факта, че се увеличава мощността за издигане на топките и едрите късове руда.
3. Увеличаването на пълнежа на мелницата също увеличава изразходваната мощност поради увеличаването на мощността на празен ход, допълнителната мощност и мощността за издигане на едрите късове руда.
4. Ъгловата скорост на барабана на мелницата се променя в малки граници при пасивен експеримент и влияе незначително на мощността на мелницата, като за получения модел с увеличаването си намалява изразходваната мощност. Това най-вероятно се дължи на факта, че с намаляване на скоростта на барабана на мелницата, се увеличава големината на мъртвата зона и това повишава мощността за преодоляване на триенето между движещите се слоеве и тази зона при каскаден скоростен режим.

#### Литература

- Цветков, Х., 1976. Обогабителни машини, С., Техника.  
 Минин, И., 2012. Техника и технологии за обогатяване на полезни изкопаеми, С. Авангард Прима.  
 Божанов Е. С., И. Вучков, 1973. Статистически методи за моделиране и оптимизиране на многофакторни обекти, С., Техника.