

MODELLING OF THE CALCULATED SIZE FRACTION YIELD IN SEMI-AUTOGENOUS MILLS BASED ON PRODUCTION DATA

Ralitsa Boncheva

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia, e-mail: boncheva81@gmail.com

ABSTRACT. The present study investigates the yield of the calculated size fraction in two semi-autogenous mills operating under different technological conditions and processing different types of ore. The analysis is based on computer processing of production data recorded by the process control systems. Statistical methods were applied to identify relationships between the calculated size fraction yield as the objective function and the main control parameters of the grinding process. Mathematical models were developed and evaluated in terms of adequacy and statistical significance. For each mill, the most appropriate model was selected based on approximation quality criteria. A comparative analysis of the obtained results was performed, highlighting similarities and differences in system behaviour under varying input parameters. The conclusions are aimed at improving process efficiency and optimising grinding performance.

Key words: semi-autogenous mill, yield, target size fraction, mathematical modelling, statistical analysis, process parameters.

МОДЕЛИРАНЕ НА ДОБИВА НА РАЗЧЕТНА КЛАСА ПРИ ПОЛУАВТОГЕННИ МЕЛНИЦИ НА БАЗА ПРОИЗВОДСТВЕНИ ДАННИ

Ралица Бончева

Минно-геоложки университет “Св. Иван Рилски”, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В разработката е изследван добивът на разчетна класа от две полуавтогенни мелници, работещи при различни технологични условия и използвани за смилане на различни видове руди. Анализът е основан на компютърна обработка на производствени данни, регистрирани от системите за управление и контрол. Чрез статистически методи са установени зависимости между добива на разчетна класа като целева функция и основните управляващи параметри на процеса. Изградени са математични модели, оценени по показатели за адекватност и статистическа значимост. За всяка от мелниците е определен най-подходящият модел въз основа на критериите за качество на апроксимация. Извършен е сравнителен анализ на получените резултати, като са установени сходства и различия в поведението на системите при изменение на входните параметри. Формулирани са изводи, насочени към повишаване ефективността на процеса на смилане и оптимизиране на добива.

Ключови думи полуавтогенна мелница, добив, разчетна класа, математическо моделиране, статистически анализ, технологични параметри.

Въведение

Един от основните параметри на барабанните полуавтогенни мелници е добивът на разчетна класа.

Добив на разчетна класа се изразява с процентното съдържание на готовия продукт в обработвания материал. Характерно за него е това, че този изходен параметър определя процеса на смилане откъм качествената му страна. Добивът на разчетна класа се явява ефективен критерий, защото характеризира влиянието на всички управляващи фактори. В настоящия момент се прилагат сравнително точни методи за оценка на качеството на готовия продукт: ситов анализ, седиментация, измерване на относителната повърхност, микроскопичен анализ, измерване на относителната повърхност, което я прави и статистически ефективна.

Следва да се посочи, че добивът и производителността на мелницата са две взаимно свързани функции и обстойното им изследване показва, че не би могло да се даде приоритет на нито едната от тях.

Определяне на управляващите параметри, влияещи върху целевата функция „добив на разчетна класа“

Първият етап при моделирането на процеса в барабанни полуавтогенни мелници е ясно формулиране на

целта на изследването. След определянето ѝ се пристъпва към избор на управляващите фактори.

При избора на управляващи фактори (Nedyalkov P, 2020) трябва да се имат предвид някои изисквания, които определят и до голяма степен техния избор:

1. Всеки управляващ фактор трябва да има определена област на определяне.
2. Факторите трябва да бъдат управляеми. Това изискване означава факторите да се установят и поддържат на различни нива в дефиниционната им област.
3. Факторите трябва да се измерват с възможно най-висока точност.
4. Факторите трябва да бъдат независими – в цялото множество от фактори да няма функционално свързани фактори. При активен експеримент това изискване осигурява възможност за установяване на всеки фактор на определено ниво, независимо от нивата на останалите фактори.
5. Съвместимост на факторите – това изискване позволява да се реализират всички комбинации от нива на факторите и техните дефиниционни области, както когато се търси областта на съвместимост.

Броят на първоначално набелязаните управляващи фактори се редуцира съгласно посочените изисквания, след което се определят и отсяват съществениите от несъществениите управляващи фактори.

След като се оформи списъкът на съществениите фактори се преминава към изпълнението на следващите етапи на моделирането (Minin I., P. Nedyalkov, S. Savov,

2021). С това обаче изборът на съществени фактори не приключва. След провеждането на експериментите при статистическия анализ на получените резултати може да се окаже, че не са включени всички съществени фактори и моделът да се окаже неадекватен, при което се налага моделирането да се върне отново в етапа на избора на управляващите фактори.

Задачата на настоящото изследване е да се намери връзката между управляващи параметри на мелници тип SAG и една целева функция посредством обработката на данни получени от системите за контрол. Като за целта те биват обработени статистически с компютърни програми. За целева функция е избран добивът на разчетна класа на мелницата - $K_{80\%}, t/h$. Управляващите параметри, които биват измервани и записвани са:

1. Скорост на въртене на барабана. Тази скорост е относителната скорост на барабана и се дава в проценти - $\psi, \%$ или в обороти n, min^{-1} .

2. Дебит на постъпващата в мелницата руда за единица време - $Q, t/h$. Този параметър характеризира количественото натоварване на машината.

3. Дебит на постъпващата в мелницата задна вода - $Q_B, m^3/h$. Постъпващата в мелницата вода има предимно транспортни функции за извеждане на готовия смлян продукт от работната камера – барабана.

4. Маса на пълнежа в барабана на мелницата - M, t . Този параметър показва запълването на барабана на машината и се измерва от товарна клетка (везна) на задния лагер.

5. Износването на барабана на мелницата - $i, \%$. Този параметър не се получава от системите за управление, а е получен след лазерно сканиране на облицовките.

Данни за обработка

Първоначално на таблица 1 са показани данните от мелница тип - SAG 6,7 x 4,4, които са мащабираны поради изискванията за конфиденциалност. Данните в таблица 1 се отнасят за мелница SAG 6,7 x 4,4 като, добивът на разчетна класа на мелницата се измерва от системата за управление и контрол като параметър показващ колко тона за час смляна руда излиза от мелничния агрегат с 80% готов продукт.

На таблица 2 са показани данните (мащабираны поради изискванията за конфиденциалност) от системата за управление и контрол на мелница тип SAG 8,5 x 5,3. Тук системата за управление и контрол измерва добивът на разчетна класа, като процентното съдържание на готов продукт в изходящия продукт на мелничния агрегат. Освен това в таблица 2 скоростта на мелницата е показана чрез оборотите на двигателя на мелницата. Останалите параметри са показани по същия начин както и в таблица 1. Трябва да се има в предвид, че мелница SAG 8,5 x 5,3 е значително по-голяма и рудата която смила е значително по твърда и абразивна.

Таблица 1

$\psi, \%$ X_1	$Q_B, m^3/h$ X_2	$Q, t/h$ X_3	M, t X_4	$i, \%$ X_5	$K_{80\%}, t/h$ Y
67,6	108,9	111,2	134	12,40	59,7
80,7	115,1	112,4	133	24,61	75,6
80,9	91,9	114,9	133,6	38,05	82,0
77,2	108	114,1	134,5	45,38	79,0
82,7	103,7	108,5	134,5	57,58	83,7
77,9	79,1	109,8	134,6	67,47	82,9
71,7	81,8	106,7	134,2	77,63	75,6
75,4	86,1	112,9	136,9	90,24	82,9
76,8	94,4	107,5	137,5	100	83,8
76,5	88,2	107,9	137,8	0	69,5
69,5	92,2	109,1	136,4	11,76	80,1
76,8	86,1	107,8	137,6	18,76	80,1
75,9	93,6	108,3	138,5	33,36	104,0
81,3	105,6	95,1	145	40,07	115,8
73	89,7	103,2	143,6	51,34	98,7
79,3	77,9	93,4	144,7	60,33	93,1
72,6	82,7	94,9	143,4	70,94	90,7
77,7	61,2	95	143,9	77,32	124,1
74,6	82,9	93,8	143,3	0	118,2
114,9	76,8	96,8	141,2	15,36	70,1
82,2	81,1	97,2	142,3	21,73	81,2
85,8	151,2	95,7	144,6	31,22	113,1
89	122,3	88,1	149,8	42,64	94,9
88,9	102,8	90,5	149,2	50,37	90,3
76,9	99,6	98,1	150,7	58,31	120,7
76,3	33,3	75,1	142,8	0	114,7
73,9	34,9	73,4	142,8	7,21	118,6
84,8	78,5	82,6	149,6	16,84	123,8
82,6	78,3	95,6	159,7	25,12	131,0
83,7	91,7	97,7	157,7	35,93	126,7
78,6	94,3	95,4	156,7	36,80	123,8
72,8	40,1	52,4	151,9	54,36	131,0
72,4	111,9	100,5	151,4	56,26	126,7
77,9	125,3	103,7	156,6	0,00	139,7
68,5	126,7	95,7	151,5	8,80	109,5
72,2	83,8	105,3	155,9	21,58	131,9
86,5	107,8	104,8	157,5	27,79	126,7
74,5	79,5	102,3	156,6	39,28	139,7
74,2	71,9	80,2	141,3	0	109,5
77,7	80,35	82,5	142,3	12,40	107,8

На таблица 2 са показани данните (мащабираны поради изискванията за конфиденциалност) от системата за управление и контрол на мелница тип SAG 8,5 x 5,3. Тук системата за управление и контрол измерва добивът на разчетна класа, като процентното съдържание на готов продукт в изходящия продукт на мелничния агрегат. Освен това в таблица 2 скоростта на мелницата е показана чрез оборотите на двигателя на мелницата. Останалите параметри са показани по същия начин както и в таблица 1. Трябва да се има в предвид, че мелница SAG 8,5 x 5,3 е значително по-голяма и рудата която смила е значително по твърда и абразивна.

Таблица 2

$n, \text{ min}^{-1}$ X_1	$Q_B, \text{ m}^3 / \text{ h}$ X_2	$Q, \text{ t} / \text{ h}$ X_3	$M, \text{ t}$ X_4	$i, \%$ X_5	$K_{-0,08}$ Y
982	311	198	77,3	26,34	59,43
1001,9	260	153	80,8	27,38	73,82
996	297	182	75,2	37,52	67,03
998	389	309	72,4	38,19	70,47
989	236	133	74,3	53,49	39,8
991	262	145	72,8	54,20	52,72
990	268	131	74,1	65,49	72,61
990	338	208	70,6	66,47	52,07
990	296	215	74,6	83,34	74,17
989	363	264	81,7	0,00	67,32
990	390	284	77,8	21,44	70,69
988	319	214	79	22,51	73,82
991	377	316	73	40,47	60,1
990	400	321	71,3	41,43	65,43
989	302	218	74,2	61,80	73,44
1057,2	367	290	71,9	62,85	71,57
1084,9	336	249	70,3	77,94	73,74
1005,6	371	292	68,5	0,00	65,88
938	362	294	68,9	21,82	72,38
969	344	273	68,8	22,91	73,35
995	348	277	68,2	35,98	74,45
927	335	261	68,1	36,81	67,7
1007	385	300	69,7	51,51	73,65
1007,2	386	304	67,1	52,62	73,83
1005,2	320	215	64,9	72,27	72,72
921	391	318	69,3	0,00	70,56
892	378	301	67,6	21,18	72,98
953	354	281	68,2	22,23	72,99
958	339	273	64,3	30,08	65,81
888	349	286	69,7	30,50	74,27
964	359	276	69	38,69	73,82
947	339	276	68,7	39,68	60
985	312	227	66	58,37	73,51
882	322	285	66,6	0,00	62,03
914	325	242	67,9	15,75	66,56
881	343	300	67,1	16,46	65,16
880	339	247	69,8	38,48	62,3
1006	384	293	68,2	39,59	67,09
978	354	262	66,9	56,11	71,38
1005,9	406	305	72,5	0,70	68,74
928	377	276	72,2	24,91	71,46
953	383	198	69,6	26,57	68,85
901	369	153	68	43,21	71,18
946	361	182	69,7	44,24	63,76
1005,1	371	309	66,4	61,21	60,56
982	385	133	66,6	62,17	56,79
1001,9	394	145	77,3	74,27	73,95
996	311	131	80,8	74,98	74,17
998	260	208	75,2	92,84	59,43
989	297	215	72,4	26,34	73,82
991	389	264	74,3	27,38	67,03
990	236	284	72,8	37,52	70,47
990	262	214	74,1	38,19	39,8
990	268	316	70,6	53,49	52,72
989	338	321	74,6	54,20	72,61

Резултати от обработката на данните от системите за управление на мелница тип SAG

Данните от мелниците SAG са обработени статистически с програмите R STUDIO (Задорожний С. С., 2023) и STATGRAFICS като се получи множество модели. Оценката на значимостта на коефициентите на регресия е извършена по критерия на Стюдент при зададено ниво на значимост $\alpha = 0,05$ и минимум 8 степени на свобода $\nu > 8$. В използвания софтуер тази процедура се реализира чрез изчисляване на вероятността за статистическа значимост на регресионните коефициенти. Когато тази вероятност е:

$$P - \text{Value} < \alpha \quad (1)$$

тогава съответният регресионен коефициент се приема за статистически значим при избраното ниво на значимост α (доверителна вероятност).

Адекватността на регресионното уравнение е оценена чрез проверка на значимостта на критерия на Fisher..

Най-адекватен модел получен посредством използването на програмата R STUDIO се отнася за мелница SAG 6,7 x 4,4 и е показан на Таблица 4.

Таблица 3. Параметри на модела от R STUDIO

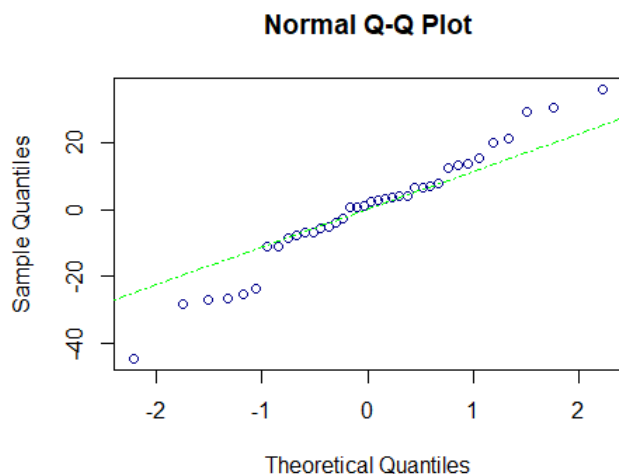
Параметри на модела				
Parameter	Estimate	Error	Statistic	P-Value
i	43.33029	19.47518	2.225	0.0330
Q	0.17888	0.08654	2.067	0.0467
n	6.98559	5.94125	-1.176	0.02481
M	0.43317	0.36245	1.195	0.02406
i / M	0.04537	0.04105	1.105	0.02770
Parameter	Df	Sum of Squares	Mean Square	P-Value
i	1	412153	412153	1226.8484
Q	1	7792	7792	23.1940
n	1	2438	2438	7.2567
M	1	940	940	2.7980
i / M	1	410	410	1.2219
Residuals	33	11086	336	
Статистика на модела				
$R^2 =$			97,45	%
R^2 (adjusted for d.f.) =			97,06	%
Standard Error of Est. =			18,33	
F-statistic =			252,2	
p-value =			< 2,2e-16	

Анализът на параметрите показва, че коефициентът на детерминация R^2 е 97,45%, а коригираният коефициент на детерминация надхвърля 97%. Моделът демонстрира най-добри статистически показатели в сравнение с останалите изследвани модели. Стойността на показателя P-Value за моделите е под критичното ниво 0,05, т.е. може да се приеме, че моделите са адекватни с доверителна вероятност над 97%.

Математическият модел може да се представи във вида:

$$k = 43,3.i - 0,18.Q + 6,98.n + 0,433.M + 0,045 \frac{i}{M}, 80\% (2)$$

Съответствието между стойностите на модела и експерименталните данни е представено на сравнителната графика показана на фигура 1.



Фиг. 1. Корелация между експериментални данни и математичен модел за SAG 6,7 x 4,4

Най-адекватен модел получен, посредством използването на програмата STATGRAFICS се отнася за мелница SAG 8,5 x 5,3 и е показан на таблица 4.

Таблица 4. Параметри на модела от STATGRAFICS

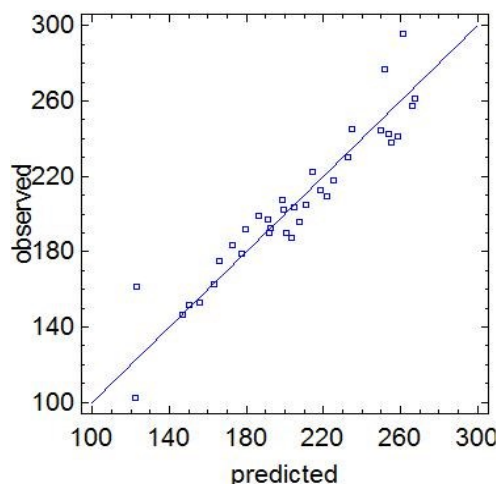
Параметри на модела				
Parameter	Estimate	Error	Statistic	P-Value
$\frac{M.n}{Q}$	0,29357	0,0058036	57,47	0
	Df	Sum of Squares	Mean Square	P-Value
Model	1	2245559	2245559	0
Residual	1	3232,96	67,353	
Total	45			
Статистика на модела				
R ² =			98,59	%
R ² (adjusted for d.f.) =			98,58	%
Standard Error of Est. =			8,206	
Mean absolute error =			6,833	
Durbin – Watson statistic=			1,7432	

Анализът на параметрите на модела показва, че коефициентът на детерминация R² е 98,59%, а коригираният коефициент на детерминация надхвърля 98%. Този модел има най-добри показатели на оценка спрямо всички останали. Стойността на показателя на доверителна вероятност (P-Value) за моделите е под критичната 0,05, т.е. може да се приеме, че моделите са адекватни с доверителна вероятност над 98%.

Математическият модел може да се представи във вида:

$$K_{-0,08} = \frac{M.n}{Q}, \% \quad (3)$$

Съответствието между стойностите на модела и експерименталните данни е представено на сравнителната графика показана на фигура 2.



Фиг. 2. Корелация между експериментални данни и математичен модел за SAG 8,5 x 5,3

Изводи

На база на настоящото изследване става ясно, че могат да бъдат направени следните изводи:

1. Добивът на разчетна класа и при двете мелници се влияе съществено от скоростта на въртене, дебита на постъпващата руда и масата на пълнежа.
2. При мелница SAG 6,7 x 4,4 е установено влияние на износването на облицовките върху добива на разчетна класа.
3. Увеличаването на скоростта на барабана води до увеличаване на добива на разчетна класа на мелницата поради подобряване на скоростния режим на мелницата.
4. Увеличаването на дебита на постъпващата руда води до намаляване на добива, вероятно поради редуциране на ефективните удари.
5. В изследвания интервал увеличаването на масата на пълнежа води до подобряване на добива, което може да се свърже с нарастване на относителния брой ефективни удари.

Литература

- Задорожный, С. С. (2023). *Статистическая обработка данных на языке R: Учебно-методическое пособие*. Москва: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова.
- Nedyalkov P. (2020). Reliability function improved fitting using goodness-of-fit procedures", ISSN: 2683-0027, *Journal of Mining and Geological Sciences*, pp. 161-166, Vol.63, Part III, publ. "St. Ivan Rilski" UMG – Sofia, 2020.
- Minin Iv., Nedyalkov, P., Savov, S. (2021). Research of charge load influence over tumbling mill characteristic through general utility function, ISSN: 1314-7471, pp. 819-826, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, Sofia, Bulgaria 2021.