DOI 10.52209/1609-1825_2026_2_248 ӘОЖ 621.9

Екінші реттегі математикалық модельдеу негізінде материалдарды ұсақтау процесінің технологиялық параметрлерін оңтайландыру

[1]*МОЛДАХАНОВ Бекболат Аскерханович, PhD, аға ғылыми қызметкер, bek_m78@mail.ru,
[1]ДУДКИН Михаил Васильевич, т.ғ.д., профессор, doudkin@mail.ru,
[2]ЛЕШНЕВСКИЙ Тадеуш, т.ғ.д., профессор, tadeusz.lesniewski@pwr.edu.pl,
[3]ЯКОВЛЕВ Владимир Сергеевич, аға оқытушы, vel1051@yandex.kz,
[3]БАЙГУНУСОВ Айдос Жомартханович, докторант, baygunusov.aydos@mail.ru,
[1]«Европлюс Восток» ЖШС, Өскемен, Қазақстан,
[2]Вроцлав ғылым және технологиялар университеті, Вроцлав, Польша,
[3]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан,
*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақалада екінші ретті математикалық модельдеу қолданылған. Серіппелі-роторлы диірмендегі материалдарды ұнтақтау процесінің технологиялық параметрлерін оңтайландыру бойынша зерттеу нәтижелері келтірілген. Бес түрлі факторлармен эксперименттi жоспарлау негізінде бес негізгі шығыс параметрлері үшін екінші ретті полиномдық модельдер алынды: ұнтақтау, өнімділік, жетек қуаты, меншікті энергия сыйымдылығы және меншікті металл сыйымдылығы. Теңдеулер жүйесінің аналитикалық шешімі негізінде минималды энергия шығыны мен өнімнің қажетті сапасымен максималды өнімділікті қамтамасыз ететін технологиялық параметрлердің оңтайлы мәндері табылды. Жұмыстың ғылыми жаңашылдығы: бір мезгілде бес технологиялық параметрлерді және бес шығыс параметрлерін ескере отырып, ұсақтау процесін кешенді модельдеуге, сондай-ақ, көп өлшемді тапсырма үшін оңтайлы жұмыс режимдерін анықтаудың талдамалық әдісін әзірлеу болып табылды. Зерттеу нәтижелері эмпирикалық түрде орнатылған жұмыс режимдерімен салыстырғанда қуат тұтынуды 8-12% төмендете отырып, өнімділікті 15-20% арттыру мүмкіндігін көрсетеді.

Кілт сөздер: серіппелі-роторлы диірмен, материалдарды ұсақтау, регрессиялық талдау, математикалық модельдеу, технологиялық параметрлерді оңтайландыру.

Кіріспе. Ұнтақтау процестері өте алуан түрлі, бірақ бір мақсатты көздейді – ең аз энергия тұтынумен ең жұқа өнімді алу. Серіппелі-роторлы диірмендердің конструкцияларын әзірлеу және олардың жұмыс процесі ең аз шығынмен жұқа дисперсті материалды алудың жоғары өнімді процесінің мүмкіндігін эмпирикалық түрде дәлелдеді.

Алайда, серіппелі-роторлы диірмендердегі ұсақ ұнтақтаудың жұмыс процесі көптеген параметрлер арасындағы күрделі қатынастармен сипатталады. Өнеркәсіптің қазіргі даму тенденциялары, эмпирикалық тәсілден математикалық модельдеу негізінде технологиялық процестерді басқарудың ғылыми негізделген әдістеріне көшуді талап етеді. Әр фактордың әсерін және олардың өзара әрекеттесуін сандық бағалауға мүмкіндік беретін көпмүшелік модельдерді құру үшін эксперименттi жоспарлау әдістерін қолданатын жұмыстар ерекше қызығушылық туды-рады. Осы зерттеудің мақсаты міндеттің көп критерийлігін ескере отырып, екінші реттегі математикалық модельдеу негізінде ұсақтау процесінің технологиялық параметрлерін оңтайландыру әдістемесін әзірлеу болып табылады [1, 2, 4, 5].

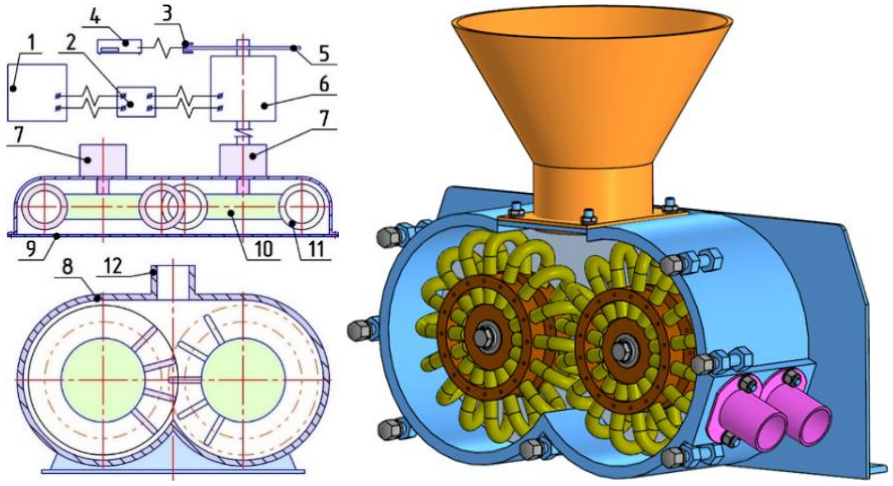
Әдістер мен материалдар. Серіппелі жұмыс органы бар эксперименттік диірмен (1-сурет) тиеу және түсіру люктері бар корпусты қамтиды, корпус ішінде ротор түрінде олардың сыртқы диаметріне бекітілген бұрандалы серіппелері немесе серіппелі сегменттері бар жұмыс дискілері айналады: ұнтақтау камерасының көлемі: 5 л; жұмыс органдарының материалы: 65Г маркалы болат; электр қозғалтқышының қуаты: 15 кВт; басқару жүйесі: жиілікпен реттелетін жетек;

өлшеу жүйесі: қуат бергіштер, тахометр, салмақ мөлшерлегіш. Диірмен корпусы мен айналмалы серіппелі роторлар түзетін ұнтақтау камераларын оларды тұтас немесе торлы қабырға-диафрагмамен бөліп, жетек білігіне көбейтуге және монтаждауға болады. Айналу жиілігін тіркеу 3 тахометр 4 датчигінің көмегімен жүзеге асырылды. Қуатты тіркеу қозғалтқыштың қоректендіру желісіне қосылған 2 ваттметр бойынша жүргізілді.

Бастапқы өнім тиеу люгі арқылы тарту камерасына түседі, онда серіппелі роторлардың әсеріне түседі. Материалдың бұзылуы үш аймақта болады. Бірінші аймақта материал ротордың жұмыс элементтерінің соққысынан және материал бөлшектерінің бір-біріне соғылуынан бұзылады. Екінші аймақта материал ұнтақтау камерасының қабырғасына қысылады және сүргіленеді. Үшінші аймақта материал ілінісу аймағынан өту кезінде роторлардың жұмыс элементтері арасында тағы бір мірте ұнтақталып қысылады және орталықтан тепкіш күштердің әсеріне ұшырайды. Роторлардың әсерінен материал ұсақтаудың барлық аймағынан өтеді.

Сусымалы материалдарды серіппелі-роторлы ұсақтағышта ұсақтаудың технологиялық процесі зерттеу объектісі болып табылады. Зерттеу экспериментті математикалық жоспарлау әдістерін пайдалана отырып жүргізілді. Технологиялық параметрлердің серіппелі-роторлы диірменде ұсақтау процесіне әсерін зерттеу үшін екінші реттегі бес факторлы жоспар таңдалды. Белгіленген жоспар бойынша 27 эксперимент жүргізу нәтижесінде технологиялық факторлардың әртүрлі комбинациялары үшін бес шығу параметрлерінің мәндері алынды (1-кесте).

Эксперименттік деректерді өңдеу, модельдер құру және оңтайландыру NumPy және SciPy кітапханалары бар Python 3.8 пайдалану арқылы жүргізілді. Деректерді талдау жұмыс режимдеріне байланысты шығыс параметрлерінің елеулі вариабельділігін көрсетеді, бұл ұсақтау процесіне технологиялық факторлардың елеулі әсерін растайды.



1) қоректендіру көзі; 2) ваттметр; 3) тахометр датчигі; 4) тахометр; 5) диск; 6) жетектің электр қозғалтқышы; 7) мойынтірек тіректері; 8) корпус; 9) алдыңғы қабырға; 10) ротор; 11) жұмыс органы; 12) жүктеу дискісі

1-сурет – Эксперименттік стендтің схемасы

1-кесте – Эксперименттің жиынтық статистикалық сипаттамалары

Шығыс параметрі	Өлш. бірлігі	Миним. мәні	Максим. мәні	Орташа мәні	Стандарт. ауытқу	Вариац. коэфф. (%)
Ұсақ ұнтақтау (R_{71})	%	10,4	38,0	23,7	7,2	30,4
Өнімділігі (P)	кг/сағ	2,1	23,3	8,3	5,1	61,4
Жетек қуаты (N)	кВт	0,8	14,2	4,2	3,1	73,8
Меншікті (E_{ud}) энергия сыйымдылығы	кВт· сағ/т	1,1	9,3	5,0	2,2	44,0
Меншікті (M_{ud}) металл сыйымдылығы	т· сағ/т	0,2	2,4	0,8	0,5	62,5

Мәрмәрды ұсақтау жөніндегі эксперименттердің сынақ сериясының нәтижелері вариация коэффициенті шекте екенін көрсетті k_{var}=5-6%. Алынған вариация коэффициентінің рұқсат етілгенге қатынасы бойынша 96% сенімділікпен тәжірибелердің қажетті саны анықталады. Мәрмәрды ұсақтау кезіндегі қайталама тәжірибелердің қажетті саны кемінде үшті құрайды. Эксперименттік стендте ұсақтау процесін зерттеу кезінде диірмен жұмысының кезеңдік режимінде n=5 тәуелсіз айнымалылар саны және n=27 жоспар нүктелерінің жалпы саны бар Хартли жоспары пайдаланылды.

Көп факторлы эксперимент үшін зерттелетін факторлар, деңгейлер мен түрлендіру аралықтары 2-кестеде келтірілген.

Ұнтақтау процесінің тиімділігін кешенді бағалау үшін бес шығыс параметрлері таңдалды: Y_1 – ұнтақтау жұқа болуы (R_{71}), % – ірілігі 71 мкм-ден кем фракцияның құрамы; Y_2 – өнімділік (П), кг/сағ – уақыт бірлігі үшін ұсақталған материалдың массасы; Y_3 – жетек қуаты (N), кВт – тұтынылатын электр қуаты; Y_4 – меншікті энергия сыйымдылығы (E_{ud}), кВт·сағ/т – өнім бірлігіне энергия шығындары; Y_5 – меншікті металл сыйымдылығы (M_{ud}), т·сағ/т – жабдықтың тозуының жанама көрсеткіші.

Эксперименттік зерттеулер жүргізілген бес факторлық модельді жоспарлау матрицасы 3-кестеде берілген. Эксперимент жүргізу барысында жұмыс органдарының сыртқы диаметрі және материалдың физикалық-механикалық сипаттамалары өзгеріссіз қалды.

Дисперсиялық матрицаны пайдалана отырып, математикалық үлгілердің коэффициенттерін есептегеннен кейін үдерістің анықтаушы параметрлеріне реакцияның барлық функцияларының регрессиялық тәуелділіктері жасалды:

- ұнтақтау жұқа үлгісі (R_{71}):

$$R_{-71} = 30,1 - 0,7 \cdot X_1 + 0,9 \cdot X_2 - 2,1 \cdot X_3 - 0,52 \cdot X_4 - 2,58 \cdot X_5 - 4,05 \cdot X_1^2 - 3,6 \cdot X_2^2 - 3,55 \cdot X_3^2 - 3,4X_4^2 - 3,95 \cdot X_5^2 - 0,018 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,006 \cdot X_1X_3 + 0,006 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,012 \cdot X_1 \cdot X_5 + 0,01 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,01 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,05 \cdot X_2 \cdot X_5 - 0,04 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,03 \cdot X_3 \cdot X_5 + 0,03 \cdot X_4 \cdot X_5. \quad (1)$$

- өнімділік моделі (P):

$$P = 9,84 + 1,69X_1 + 0,75 \cdot X_2 + 0,3 \cdot X_3 - 0,25 \cdot X_4 - 2,55 \cdot X_5 - 1,7 \cdot X_1^2 - 1,5 \cdot X_2^2 - 1,46X_3^2 - 1,45 \cdot X_4^2 + 0,93 \cdot X_5^2 + 0,47 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,84 \cdot X_1 \cdot X_5 + 0,25 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,08 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,01X_2 \cdot X_3 + 0,43 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,38 \cdot X_2 \cdot X_5 + 0,35 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,02 \cdot X_3 \cdot X_5 + 0,47 \cdot X_4 \cdot X_5. \quad (2)$$

- жетек қуатының моделі (N):

$$N = 4,8 + 1,35 \cdot X_1 + 0,74 \cdot X_2 + 0,4 \cdot X_3 + 0,15 \cdot X_4 - 0,72 \cdot X_5 + 0,57 \cdot X_1^2 + 0,59 \cdot X_2^2 + 0,64 \cdot X_3^2 + 0,64 \cdot X_4^2 + 0,09 \cdot X_5^2 + 0,3 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,2 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,06 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,5 \cdot X_1 \cdot X_5 + 0,03 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,01 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,31 \cdot X_2 \cdot X_5 - 0,08 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,02 \cdot X_3 \cdot X_5 + 0,01 \cdot X_4 \cdot X_5. \quad (3)$$

2-кесте – Құбылу факторлары мен деңгейлері

№	Зерттелетін факторлар	Белгілер	Түрлендіру деңгейлері			Түрлендіру аралығы
			-1	0	+1	
1	Жұмыс органдарының айналу жиілігі, n	X_1	1500	2000	2500	500
2	Материалды жүктеу дәрежесі, k_m	X_2	0,1	0,3	0,5	0,2
3	Жетекші және жетекші ротордың жұмыс аймағын жабу шамасы, k_r, мм	X_3	-15	0	+15	15
4	Ұнтақтау камерасының жылжымалы және жылжымайтын бөліктері арасындағы саңылау, k_{zaz}, мм	X_4	2	7	12	5,0
5	Ұсақтау ұзақтығы, Т, сек	X_5	60	90	120	30

3-кесте – Жауап беру функцияларының эксперименттік мәндері

№	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Эксперимент нәтижелері				
							R_{+71}, %	$N \cdot 10^{-1}$, кВт	E_{ud}, (кВт·ч)/т	Т, кг/сағ	M_{ud} т·ч/т
1	1	1	1	1	1	1	12,0	7,3	9,3	7,9	0,63
2	1	-1	-1	1	1	1	14,2	1,7	5,3	3,2	1,56
3	1	-1	1	-1	-1	-1	38,0	2,1	2,1	10,0	0,5
4	1	1	-1	-1	-1	-1	28,0	4,5	2,9	15,0	0,3
5	1	-1	1	-1	1	1	26,3	2,0	5,3	3,8	1,32
6	1	1	-1	-1	1	1	16,8	3,3	6,1	5,4	0,9
7	1	1	1	1	-1	-1	24,2	14,2	6,2	23,3	0,2
8	1	-1	-1	1	-1	-1	26,2	1,7	2,1	8,2	0,6
9	1	-1	1	1	1	-1	28,1	5,1	4,3	11,9	0,42
10	1	1	-1	1	1	-1	18,0	9,1	5,1	6,8	0,27
11	1	1	1	-1	-1	1	22,0	4,8	7,1	2,1	0,7
12	1	-1	-1	-1	-1	1	24,3	1,0	3,1	2,1	2,4
13	1	-1	1	1	-1	1	20,0	2,2	6,3	3,4	1,41
14	1	1	-1	1	-1	1	10,4	4,1	7,3	5,5	0,9
15	1	1	1	-1	1	-1	30,1	11,1	5,1	21,8	0,23
16	1	-1	-1	-1	-1	-1	32,0	0,8	1,1	7,8	0,64
17	1	0	0	0	0	0	29,0	3,7	5,0	7,4	0,67
18	1	0	0	0	0	0	20,1	5,9	5,2	9,8	0,51
19	1	1	0	0	0	0	26,0	1,7	3,7	4,8	1,04
20	1	-1	0	0	0	0	25,1	4,9	5,8	8,5	0,58
21	1	0	1	0	0	0	21,9	2,6	4,2	6,3	0,79
22	1	0	-1	0	0	0	19,8	4,5	5,8	7,0	0,63
23	1	0	0	1	0	0	27,3	2,9	4,3	7,0	0.71
24	1	0	0	-1	1	0	22,5	4,0	5,3	7,6	0,65
25	1	0	0	0	-1	0	24,9	3,4	3,7	7,4	0,67
26	1	0	0	0	0	1	18.0	3,1	6,3	4,9	1,01
27	1	0	0	0	0	-1	28,3	5,4	3,7	14,8	0,33

- энергия сыйымдылығы үшін:

$$E_{ud} = 6,29 + 0,6 \cdot X_1 + 0,4 \cdot X_2 + \\ + 0,43 \cdot X_3 + 0,1 \cdot X_4 + 0,68 \cdot X_5 - \\ - 1,2 \cdot X_1^2 - 0,6 \cdot X_2^2 - 0,6 \cdot X_3^2 - \\ - 0,6 \cdot X_4^2 + 0,5 \cdot X_5^2 - 0,01 \cdot X_1 \cdot X_2 + \\ + 0,01 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,06 \cdot X_1 \cdot X_4 + \\ + 0,01 \cdot X_1 \cdot X_5 - 0,01 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\ + 0,07 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,006 \cdot X_2 \cdot X_5 + \\ + 0,06 \cdot X_3 \cdot X_2 + 0,01 \cdot X_3 \cdot X_5 + \\ + 0,06 \cdot X_4 \cdot X_5. \quad (4)$$

- металл сыйымдылығы үшін:

$$M_{ud} = 0,9 - 0,15 \cdot X_1 - 0,06 \cdot X_2 - \\ - 0,03 \cdot X_3 - 0,07 \cdot X_4 + 0,22 \cdot X_5 - \\ - 0,01 \cdot X_1^2 - 0,01 \cdot X_2^2 - 0,11 \cdot X_3^2 - \\ - 0,12 \cdot X_4^2 - 0,15 \cdot X_5^2 + 0,03 \cdot X_1 \cdot X_2 + \\ + 0,02 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,07 \cdot X_1 \cdot X_4 - \\ - 0,07 \cdot X_1 \cdot X_5 + 0,03 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\ + 0,05 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,03 \cdot X_2 \cdot X_5 + \\ + 0,05 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,02 \cdot X_3 \cdot X_5 + \\ + 0,01 \cdot X_4 \cdot X_5. \quad (5)$$

Модельдер коэффициенттерін талдау факторлары олардың негізгі шығу параметр-

леріне әсер ету дәрежесі бойынша ранжирлеуге мүмкіндік берді. Ұнтақтаудың жұқа болуы үшін (R_{-71}) ең көп үлесті ұнтақтау уақыты (X_5, сызықтық әсері -2.58) және роторлардың жабылу шамасы (X_3, -2.10) қосады, және екі фактор да оптимумның бар екендігін көрсететін маңызды квадраттық әсерлерге ие. Өнімділік үшін басым фактор ұсақтау уақыты (X_5, -2.55), одан кейін айналу жиілігі (X_1, +1.69) болып табылады. Жетек қуаты (N) айналу жиілігіне (X_1, +1.35) және жүктеу дәрежесіне (X_2, +0.74) қатты тәуелді. Өзара іс-қимылдың маңызды коэффициенттерінің болуы (мысалы, өнімділік пен қуат үшін X_1X_5) процестің күрделі, аддитивті емес сипатын растайды.

Ұнтақтаудың жұқа болуы үшін регрессия теңдеуінен ұсақтау уақыты (T), айналу жиілігімен (n) тең – іс жүзінде неғұрлым басқарылатын түйінді технологиялық параметрлер екені көрінеді. 2-суретте ұнтақтау ұсақтығының (R_{-71}) жұмыс аймағының жабылуына (X_3) және ұнтақтау уақытына (X_5) тәуелділігінің жауап қайтару беті көрсетілген.

Желілік әсерлерді талдау ең маңызды фактор -2.58 коэффициентімен ұсақтау уақыты (X_5) болып табылатынын көрсетті. Бұл жұмыс органдарының материал бөлшектерімен байланыстар санының ұлғаюымен түсіндіріледі. Маңыздылығы бойынша екінші фактор (X_3) жұмыс аймақтарының жабылуы болып табылады, бұл ұсақтаудың белсенді аймағының тиімділігін растайды. Барлық факторлардың квадраттық әсерлері теріс, бұл зерттелетін саланың ішінде ең жоғары жауап беру функциясының бар екенін көрсетеді. Бұл ауытқуы тиімділіктің төмендеуіне алып келетін оңтайлы режимдердің бар екенін куәландырады. Диірменнің өнімділігі айналу жиілігіне (X_1) және жүктеу дәрежесіне (X_2) айтарлықтай тәуелді. Алайда, жүктеменің шамадан тыс артуы қуаттың және меншікті энергия сыйымдылығының өсуіне алып келеді. Өнімділік үшін регрессия теңдеуі маңызды технологиялық ымыраға ие – жиіліктің артуы өнімділікті арттырады, бірақ уақыттың артуы оны төмендетеді (2-сурет, в).

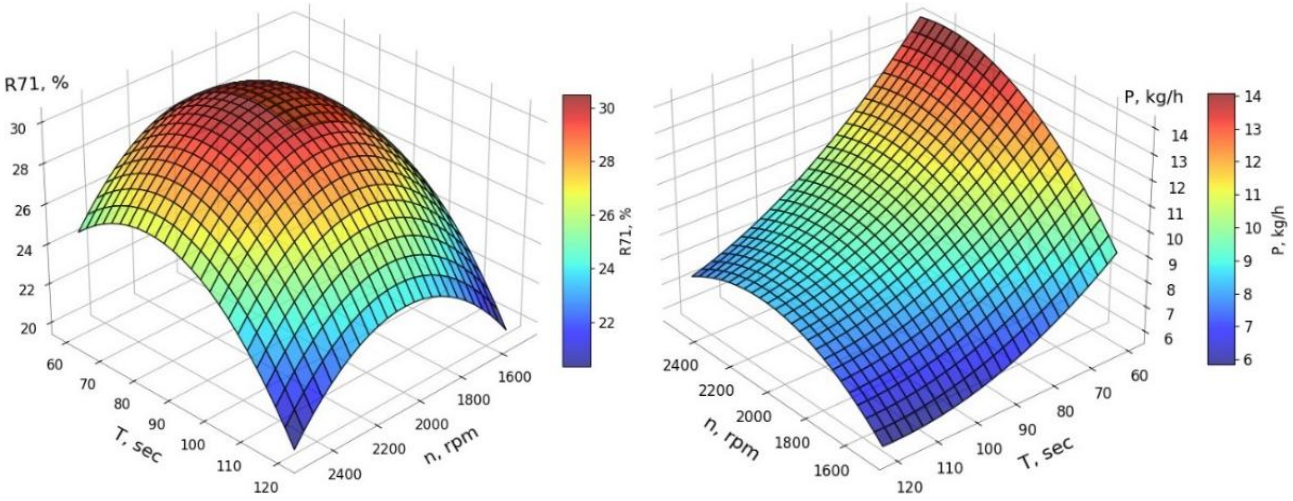
Қуат негізінен айналу және жүктеу жиілігіне байланысты – бұл ұсақтау жабдығы үшін классикалық тәуелділік (3-сурет).

Меншікті энергия сыйымдылығы үшін регрессия теңдеуі энергия шығындарын барынша азайту үшін оңтайлы айналу жиілігінің болуын көрсетеді (4-сурет, а). Меншікті металл сыйымдылығы үшін регрессия теңдеуі 4-суретте көрінетін өңдеу уақытының ұлғаюы жабдықтың тозуын қалай арттыратынын көрсетеді.

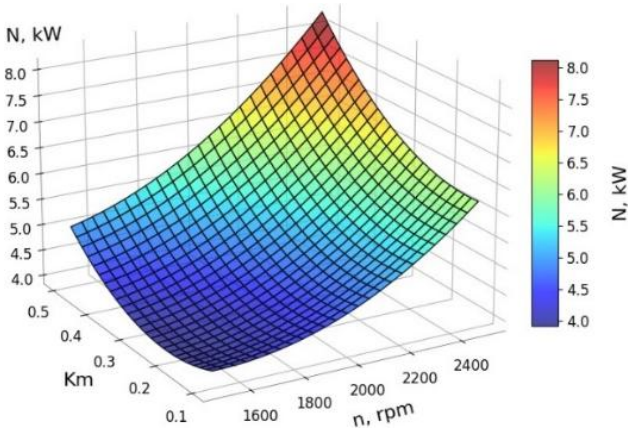
Үлгілердің барабарлығы Фишер критерийімен және детерминация коэффициентінің жоғары мәндерімен расталған (R^2>0.93). Меншікті энергия сыйымдылығы (E_{ud}) және металл сыйымдылығы (M_{ud}) технологияның экономикалық тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді. Графикалық тәуелділіктер оптимумды және жауап беру функциясының мінез-құлқын көрсетеді.

Қорытынды. Жетек қуатының моделіндегі өзара іс-қимыл коэффициенттерін талдау технологиялық параметрлер ықпалының күрделі сипатын анықтады, бұл олардың бірлескен түрленуі кезіндегі синергетикалық және антагонистикалық әсерлер туралы куәландырады.

Технологиялық салдарлар:



2-сурет – Ұнтақтау жіңішкелігінің және өнімділіктің (в) n айналу жиілігі мен T ұзақтығына тәуелділігі



3-сурет – Қуаттың м шаманың айналу жиілігіне тәуелділігі

- X_1X_5 өзара іс-қимылы бір мезгілде уақытты ұлғайту және жиілікті төмендету кезінде энергия тұтынуды елеулі төмендету мүмкіндігін көрсетеді.

- X_1X_2 оң өзара іс-қимылы жоғары жиілік кезінде жүктеменің ұлғаюы қуаттың пропорционалды емес үлкен өсуіне әкелетінін білдіреді.

- Ең маңызды фактор ретінде айналу жиілігі (X_1) қатысуымен өзара іс-қимылға неғұрлым көп көңіл бөлу керек.

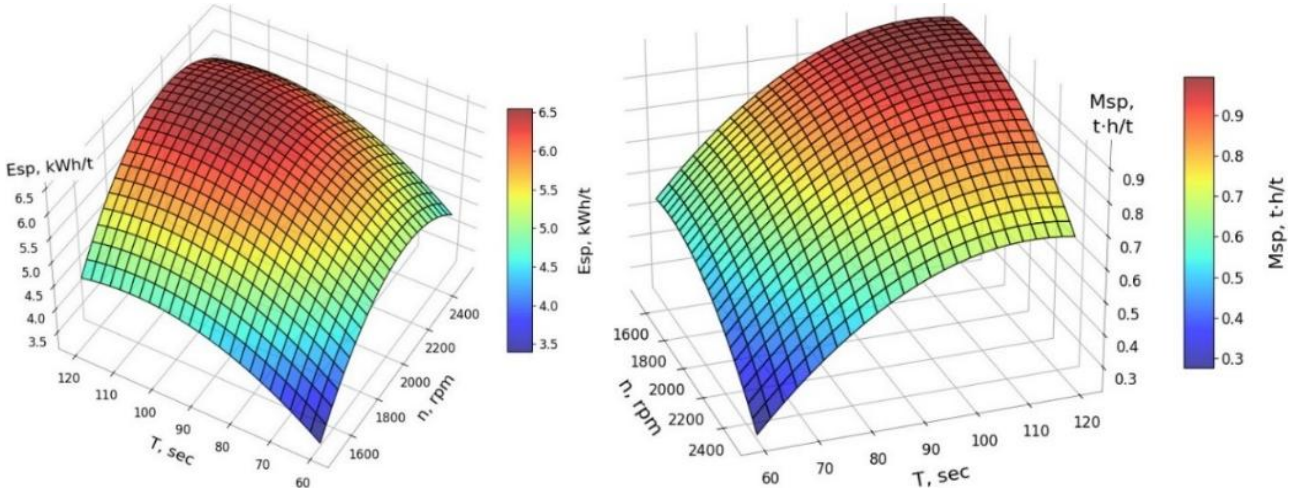
Төрт критерий үшін оңтайлы параметрлердің қалыпқа келтірілген мәндерін пайдалана отырып, радарлық диаграммалар әдісімен әртүрлі критерийлер бойынша оңтайлы параметрлерді салыстыру кестесін жасайық: қуатты барынша азайту (N), қуатты барынша арттыру, өнімділікті барынша арттыру (П) және ымыралы шешім (α=0.5). Параметрлер іріктемедегі ең төменгі және ең жоғарғы мәндерге қатысты [0,1] диапазонында нормаланған.

Негізгі ғылыми нәтижелері:

1. Ұсақтау процесінің бес негізгі шығу параметрлері: ұнтақтау (R_{71}), өнімділік (P), жетек қуаты (N), меншікті энергия сыйымдылығы (E_{ud}) және меншікті металл сыйымдылығы (M_{ud}) үшін екінші реттегі баламалы көп көлемді модельдер әзірленді. Алынған үлгілердің детерминация коэффициенттері 0,93-тен асады, бұл олардың жоғары болжамдық қабілеттілігін куәландырады.

2. Технологиялық параметрлер мен шығу сипаттамалары арасындағы сандық тәуелділіктер анықталды. Ұсақтау уақытының (X_5) және жұмыс органдарының айналу жиілігінің (X_1) процеске ең көп әсер ететіні, ал ұнтақтау камерасындағы саңылаудың (X_4) ең аз әсер ететіні анықталды.

3. Алынған нәтижелер эмпирикалық тәсілден технологиялық процесті ғылыми негізделген басқаруға көшуге мүмкіндік береді, бұл өнімділікті арттыруды, өнім сапасын жақсартуды және энергия шығындарын төмендетуді қамтамасыз етеді. Жарияланымға байланысты зерттеулерді ҚР Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады: грант AP26102017 «Өсімдік шаруашылығы қалдықтарын қайта өңдеудің инновациялық технологиясына арналған жоғары өнімділікті параметрлерді негіздеу және жабдықтарды әзірлеу».



4-сурет – Энергия сыйымдылығының (а) және металл сыйымдылығының (в) жиілігі мен айналу уақытына тәуелділігі

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Сиваченко Л.А., Добровольский Ю.К. История развития и современный уровень техники измельчения // Вестник Белорусско-Российского университета. 2012. № 4 (37). – С. 69-76. https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-razvitiya-i-sovremennyy-uroven-tehniki-izmelcheniya
2. Сорокин Ф.Д., Чжоу Су. Конечный элемент в виде витка для расчета частот и форм собственных колебаний пружин с учетом сдвига и инерции вращения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. № 1 [694] 2018. – С. 3-11. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-1-3-11 https://izvuzmash.bmstu.ru/articles/1502/1502.pdf
3. Lee J. Free vibration analysis of cylindrical helical springs by the pseudospectral method. Journal of Sound and Vibration, 2007, vol. 302, is. 1-2, pp. 185-196.
4. Yildirim V. On the linearized disturbance dynamic equations for buckling and free vibration of cylindrical helical coil springs under combined compression and torsion. Meccanica, 2012, vol. 47, is. 4, pp. 1015-1033.
5. Ганбат Д., Гаврюшин С.С. Исследование статических и динамических характеристик винтовых пружинных мельниц // Известия вузов. Машиностроение. № 8, 2007. – С. 10-16. https://izvuzmash.bmstu.ru/articles/685/685.pdf
6. Севостьянов В.С., Сиваченко Т.Л., Севостьянов М.В., Горягин П.Ю., Бабуков В.А. Научно-практические основы создания иглофрезерных измельчителей многоцелевого назначения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018, № 3. – С. 107-116. DOI: 10.12737/article_5abfc9cfb02a37.92961359.

Оптимизация технологических параметров процесса измельчения материалов на основе математического моделирования второго порядка

[1]*МОЛДАХАНОВ Бекболат Аскерханович, *PhD, старший научный сотрудник, bek_m78@mail.ru,*
[1]ДУДКИН Михаил Васильевич, *д.т.н., профессор, doudkin@mail.ru,*
[2]ЛЕШНЕВСКИЙ Тадеуш, *д.т.н., профессор, tadeusz.lesniewski@pwr.edu.pl,*
[3]ЯКОВЛЕВ Владимир Сергеевич, *старший преподаватель, vel1051@yandex.kz,*
[3]БАЙГУНУСОВ Айдос Жомартханович, *докторант, baygunusov.aydos@mail.ru,*
[1]ТОО «Европлюс Восток», Усть-Каменогорск, Казахстан,
[2]Вроцлавский политехнический университет, Вроцлав, Польша,
[3]Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан,
**автор-корреспондент.*

Аннотация. *В статье использовалось математическое моделирование второго порядка. Приведены результаты исследований по оптимизации технологических параметров процесса измельчения материалов на пружинно-роторной мельнице. На основе планирования эксперимента с пятью различными факторами были получены полиномиальные модели второго порядка для пяти основных выходных параметров: помола, производительности, мощности привода, удельной энергоемкости и удельной металлоемкости. На основе аналитического решения системы уравнений были найдены оптимальные значения технологических параметров, обеспечивающие минимальные энергозатраты и максимальную производительность при требуемом качестве продукции. Научной новизной работы являлись: разработка аналитического метода комплексного моделирования процесса дробления с учетом пяти технологических параметров и пяти выходных параметров одновременно, а также определение оптимальных режимов работы для многомерной задачи. Результаты исследования показывают возможность увеличения производительности на 15-20% при снижении энергопотребления на 8-12% по сравнению с эмпирически установленными режимами работы.*

Ключевые слова: *пружинно-роторная мельница, тонкое измельчение материалов, регрессионный анализ, математическое моделирование, оптимизация технологических параметров.*

Optimization of Technological Parameters the Process of Grinding Materials Based on Mathematical Modeling of the Second the Order

[1]***MOLDAKHANOV Bekbolat,** PhD, Senior Researcher, bek_m78@mail.ru,*
[1]***DOUDKIN Mikhail,** Dr. of Tech. Sc., Professor, doudkin@mail.ru,*
[2]***LEŚNIEWSKI Tadeusz,** Dr. of Tech. Sc., Professor, tadeusz.lesniewski@pwr.edu.pl,*
[3]***YAKOVLEV Vladimir,** Senior Lecturer, vel1051@yandex.kz,*
[3]***BAIGUNUSSOV Aidos,** Doctoral Student, baygunusov.aydos@mail.ru,*
[1]LLP «Europlyus Vostok», Oskemen, Kazakhstan,
[2]Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland,
[3]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Oskemen, Kazakhstan,
**corresponding author.*

***Abstract.** The article used second-order mathematical modeling. The results of a study on optimizing the technological parameters of the process of grinding materials in a spring-rotor mill are presented. Based on the planning of the experiment with five different factors, secondary polynomial models were obtained for the five main output parameters: grinding, performance, drive power, specific energy intensity and specific metal capacity. Based on the analytical solution of the system of equations, optimal values of technological parameters were found that provide maximum productivity with minimal energy consumption and the required quality of products. The scientific novelty of the work was the development of a comprehensive simulation of the crushing process, taking into account five technological parameters and five output parameters at the same time, as well as an analytical method for determining the optimal operating modes for a multidimensional task. The results of the study show the possibility of increasing productivity by 15-20%, reducing power consumption by 8-12% compared to empirically established operating modes.*

***Keywords:** spring-rotor mill, fine grinding of materials, regression analysis, mathematical modeling, optimization of technological parameters.*

REFERENCES

1. Sivachenko L.A., Dobrovol`skij Yu.K. Istoriya razvitiya i sovremenny`j uroven` texniki izmel`cheniya // Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta. 2012. № 4 (37). – Pp. 69-76. https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-razvitiya-i-sovremennyy-uroven-tehniki-izmelcheniya
2. Sorokin F.D., Chzhou Su. Konechny`j e`lement v vide vitka dlya rascheta chastot i form sobstvenny`x kolebanij pruzhin s uchetom sdviga i inercii vrashheniya // Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Mashinostroenie. № 1 [694] 2018. – Pp. 3-11. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-1-3-11 https://izvuzmash.bmstu.ru/articles/1502/1502.pdf
3. Lee J. Free vibration analysis of cylindrical helical springs by the pseudospectral method. Journal of Sound and Vibration, 2007, vol. 302, is. 1-2, pp. 185-196.
4. Yildirim V. On the linearized disturbance dynamic equations for buckling and free vibration of cylindrical helical coil springs under combined compression and torsion. Meccanica, 2012, vol. 47, is. 4, pp. 1015-1033.
5. Ganbat D., Gavryushin S.S. Issledovanie staticheskix i dinamicheskix xarakteristik vintovy`x pruzhinny`x mel`nicz // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. № 8, 2007. – Pp. 10-16. https://izvuzmash.bmstu.ru/articles/685/685.pdf
6. Sevost`yanov V.S., Sivachenko T.L., Sevost`yanov M.V., Goryagin P.Yu., Babukov V.A. Nauchno-prakticheskie osnovy` sozdaniya iglofrezerny`x izmel`chitelej mnogocelevogo naznacheniya // Vestnik BGTU im. V.G. Shuxova, 2018, № 3. – Pp. 107-116. DOI: 10.12737/article_5abfc9cfb02a37.92961359