

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_3_15

XFTAP 55.57.43

СЕРІППЕЛІ-РОТОРЛЫ ДИІРМЕННІҢ ЖЕТЕГІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ ӘДІСТЕРІ ЖӘНЕ ҚУАТЫН БАСҚАРУ

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ ПРИВОДА ПРУЖИННО-РОТОРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

OPTIMIZATION METHODS AND CONTROL OF THE DRIVE POWER OF A SPRING-ROTOR MILL

Б.А. Молдаханов ^{1,2*}, М.В. Дудкин ^{1,3}, В.С. Яковлев ⁴, А.Ж. Байгунусов ⁵,
В.В. Роговский ⁶

¹«Европлюс Восток» ЖШС, Өскемен, Қазақстан

^{2,3,4,5,6}Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Молдаханов Бекболат Аскерханович, e-mail: bek_m78@mail.ru

Түйінді сөздер:

роторлы-серіппелі
диірмен, ұнтақтау
жіңішкелігі, жетек қуаты,
көпфакторлы
эксперимент, әсер ету
факторлары.

ТҮЙІНДЕМЕ

Ұнтақтау процестері өте алуан түрлі, бірақ бір мақсатты көздейді, яғни аз энергия жұмсап, қажетті мөлшердегі ұнтақталған өнім алу. Бұл жарияланымда серіппелі-роторлы диірмендердің жаңа конструкцияларын әзірлеу және ең аз шығынмен жоғары өнім алу процесінің мүмкіндігін эмпирикалық түрде дәлелдеу болып табылады. Серіппелі-роторлы диірменнің жұмыс процесі әлі жеткілікті зерттелмеген, бұл оны пайдаланудың ұтымды параметрлерін іс жүзінде іріктеуді қиындатады. Осы мақалада ұсақтау процесінің бес түйінді шығу параметрлері: ұнтақтау (R_{71}), өнімділік (P), N қуаты, меншікті энергия сыйымдылығы E_{ud} , меншікті металл сыйымдылығы үшін көп факторлы экспериментті жоспарлау кезінде алынған жетек қуаты (N) үшін екінші реттегі полиномиалды модельді алу қаралған M_{ud} . Мақалада екінші реттегі полиномиалды модельдер негізінде серіппелі-роторлы диірмен жұмысының оңтайлы режимдерін айқындаудың талдамалық әдісін әзірлеу және экспериментті жоспарлау, регрессиялық талдау және көп критериялы оңтайландыру әдістерін бірыңғай әдістемеге ықпалдастыру нәтижелері ұсынылған. Модельдердің сәйкестігіне статистикалық талдау жасалды және шығыс параметрлерінің әрқайсысына әсер ететін маңызды факторлар анықталды. Теңдеулер жүйесінің аналитикалық шешімі негізінде минималды энергия шығыны мен өнімнің қажетті сапасымен максималды өнімділікті қамтамасыз ететін технологиялық параметрлердің оңтайлы мәндері табылды.

Ключевые слова:

роторно-пружинная
мельница, тонкость
помола, мощность

АННОТАЦИЯ

Процессы измельчения очень разнообразны, но преследуют одну цель – получить измельченный продукт с минимальными затратами энергии. Данная публикация представляет собой разработку новых



© 2026 Б.А. Молдаханов, М.В. Дудкин, В.С. Яковлев, А.Ж. Байгунусов, В.В. Роговский
Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы
(CC BY 4.0) бойынша таратылады.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



привода,
многофакторный
эксперимент, факторы
воздействия.

конструкций пружинно-роторных мельниц и эмпирическое доказательство возможности процесса получения высоких урожаев с минимальными затратами. Рабочий процесс пружинно-роторной мельницы еще недостаточно изучен, что затрудняет подбор рациональных параметров ее эксплуатации на практике. В данной статье рассмотрено получение полиномиальной модели второго порядка для мощности привода (N), полученной при планировании многофакторного эксперимента для пяти ключевых выходных параметров процесса измельчения: тонкости помола (R_{71}), производительности (P), мощности N , удельной энергоемкости E_{ud} , удельной металлоемкости M_{ud} . В статье представлены результаты разработки аналитического метода определения оптимальных режимов работы пружинно-роторной мельницы на основе полиномиальных моделей второго порядка и интеграции методов планирования эксперимента, регрессионного анализа и многокритериальной оптимизации в единую методику. Проведен статистический анализ адекватности моделей и определены наиболее значимые факторы, влияющие на каждый из выходных параметров. На основе аналитического решения систем уравнений найдены оптимальные значения технологических параметров, обеспечивающие максимальную производительность при минимальных энергозатратах и требуемом качестве продукта.

keywords:

rotary spring mill, fineness
of grinding, drive power,
multifactorial experiment,
influencing factors.

ABSTRACT

The grinding processes are very diverse, but they have one goal – to obtain a crushed product with minimal energy consumption. This publication presents the development of new designs for spring-rotor mills and empirical evidence of the possibility of obtaining high yields at minimal cost. The working process of a spring-rotor mill has not yet been sufficiently studied, which makes it difficult to practically select rational parameters for its operation. In this article, we consider obtaining a second-order polynomial model for drive power (N), obtained when planning a multifactorial experiment for five key output parameters of the grinding process: fineness (R_{71}), productivity (P), power N , specific energy intensity E_{ud} , specific metal intensity M_{ud} . The article presents the results of the development of an analytical method for determining the optimal operating modes of a spring-rotor mill based on second-order polynomial models and the integration of experimental planning methods, regression analysis and multi-criteria optimization into a single methodology. A statistical analysis of the adequacy of the models was carried out and the most significant factors influencing each of the output parameters were determined. Based on the analytical solution of systems of equations, optimal values of technological parameters are found that ensure maximum productivity with minimal energy consumption and the required product quality.

КІРІСПЕ

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 экспериментті жоспарлау әдістерін қолданатын жұмыстар ерекше қызығушылық тудырады. Ұсақтау процестерін оңтайландыру саласындағы зерттеулердің өзектілігі өндірістердің энергия тиімділігіне және шығарылатын өнімнің сапасына қойылатын тұрақты өсіп келе жатқан

талаптарға негізделген. Әрбір фактордың әсерін және олардың өзара іс-қимылын сандық бағалауға мүмкіндік беретін полиномиалды модельдер құру үшін экспериментті жоспарлау әдістерін пайдаланатын жұмыстар перспективалы болып табылады. Көптеген қазіргі зерттеулердің кемшілігі әртүрлі шығу параметрлеріне қарама-қайшы талаптарды бір мезгілде ескеру қажет болған кезде көп материалды оңтайландыруға жүйелі көзқарастың болмауы болып табылады (Lee J., 2007), (Mu, X.; Li, H.; Wang, Z.; Wang, Q.; Geng, D.; Zhu, J., 2023).

Серіппелі жұмыс органдары бар диірмендер жоғары меншікті өнімділігімен, салыстырмалы түрде төмен энергия сыйымдылығымен, ықшамдылығымен және қарапайым конструкциясымен сипатталады (1-сурет).

Бұрандалы цилиндрлік серіппенің доғасы бойынша иілген түрдегі жұмыс органдары бар және олар өздерінің шет жақтарымен жетек білігімен біріктіріліп жалғанған. Серіппе өзінің осіне қатысты айналған кезде оның орамдарының бүйір беттері арасында қиылысатын сыналы кеңістік түрінде ұсақтау аймақтары құрылады. Өңделетін материалдың бөлшектері үлкен бұрыштық жиілікпен айналатын серіппенің орамдарымен ұсталады және аралас орамдардың бүйір беттері арасындағы сыналы қиылысатын кеңістіктерде тағы бірнеше мәрте ұсақталады (Yu A.M., Hao Y., 2013).

Доғалы серіппелі жұмыс органдары бар диірмендердің белгілі конструкцияларының кемшіліктеріне абразивтік ортамен бір мезгілде жанасатын ауыспалы режимде жұмыс істейтін серіппелердің ұсату барысында тозуына байланысты, жұмыс органдарының қызмет ету мерзімінің салыстырмалы түрде төмен болуын жатқызған жөн. Нәтижесінде серіппелердің беріктігі күрт төмендеп, қызмет көрсету мерзімі азаяды.

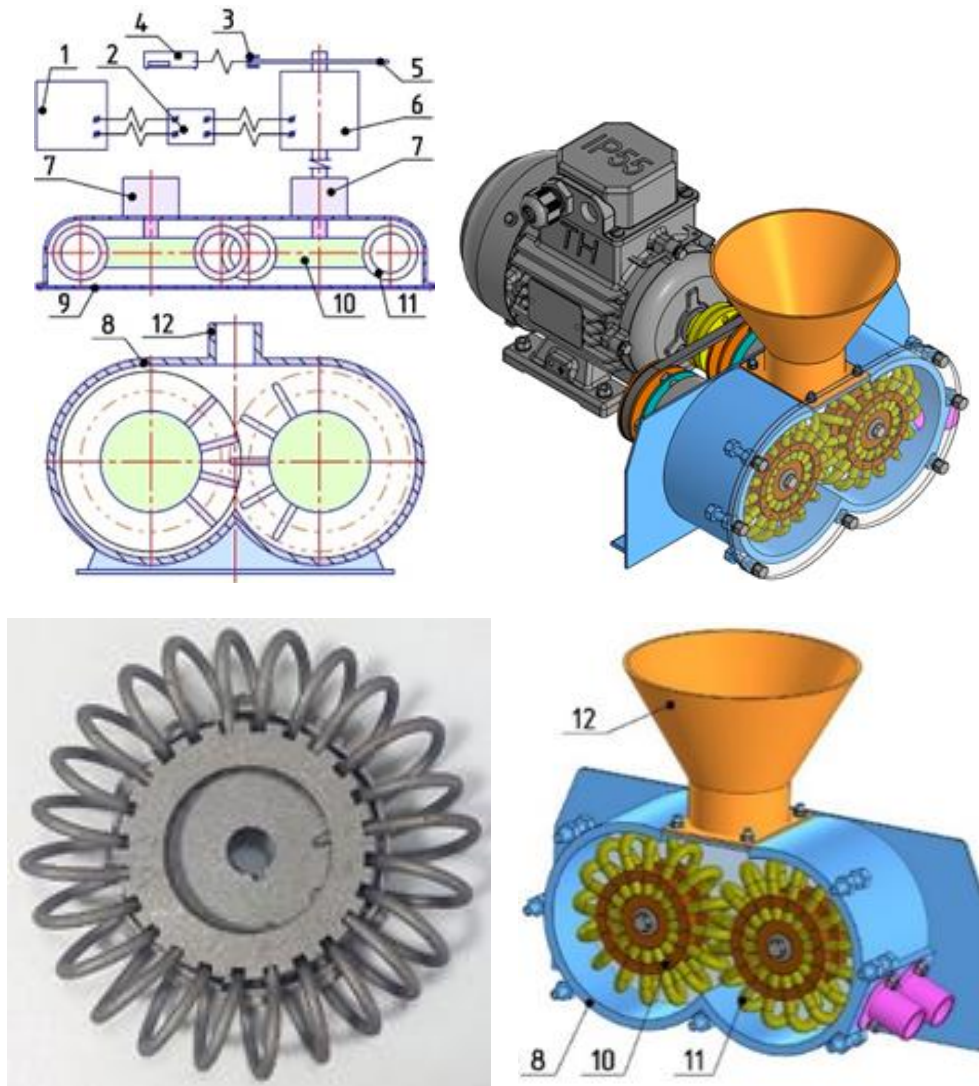
ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Соғу-сүргілеу режимінде жұмыс істейтін серіппелі-роторлы диірмендер неғұрлым перспективалы болып табылады. Олардың неғұрлым жұқа ұсақтауына қол жеткізу үшін, роторлардың бірнеше серіппелі орамдарын жабудан құралатын белсенді аймақты пайдалану ұсынылады (1-сурет). Серіппелі жұмыс органы бар зертханалық диірменде корпус ішінде бұрандалы серіппелері бар жұмыс роторлары айналады. Мысалы, төменде ұнтақтау камерасының көлемі: 5 л, жұмыс органдарының материалы 65 Г болат, электр қозғалтқышының қуаты, 15 кВт болатын эксперименттік стендті қарастырамыз.

Ұсақталатын материал тиеу люгі арқылы тарту камерасына беріледі, онда серіппелі роторлардың әсеріне түседі. Материалдың бұзылуы ротордың жұмыс элементтерінің соққысының әсерінен және материалдың бөлшектерінің бір-біріне соғылуынан болады. Материал ілінісу аймағынан өту кезінде роторлардың жұмыс элементтері арасында сүргіленіп және қысылып, орталықтан тепкіш күштердің әсеріне ұшырайды. Сондай-ақ материал ұнтақтау камерасының қабырғасына сығылады және сүргіленеді. Дайын өнімнің сапасы (ұнтақталу деңгейі) бақылау електерімен анықталады.

Зерттеу процесінде жұмыс органдарының айналу жиілігі n , ұнтақтау камерасының материалмен толтырылу дәрежесі, роторлардың жабылу K_M шамасы A , ұнтақтау камерасының бөліктері арасындағы саңылау X , ұнтақтау ұзақтығы t өзгерді.

Ұсақталатын материал ретінде мынадай физикалық-механикалық қасиеттері бар 5-7 мм фракцияның әкті және мәрмәр үгіндісі пайдаланылды (қысымға беріктік шегі $\sigma_{sz} = 110$ Мпа; материалының серпімділік модулі $E = 55 \cdot 10^3$; материалдың көлемдік салмағы, $\rho = 2,6 \text{ т/м}^3$ сондай-ақ физикалық-механикалық қасиеттері бар әктас: $\sigma_{sz} = 80$ Мпа; $E = 35 \cdot 10^3$ Мпа; $\rho = 2,4 \text{ т/м}^3$).



1-сурет. Эксперименттік стендтің схемасы:

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

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Ұсақтау процесінің түпкілікті нәтижелерін бағалау критерийі ретінде мыналар қабылданды: ұнтақтаудың дайын өнімі сапасының көрсеткіші – ұнтақтау R_{71} , ұяшықтарының мөлшері 71 мкм құрайтын және 30 %-дан аспайтын бақылау елеушіндегі қалдықтың бағаланатын диірменнің өнімділігі – P кг/сағ, тұтынылатын қуаты – N , кВт, процестің үлестік көрсеткіштері – энергия сыйымдылығы $E_{ud} = N/P$, кВт жетек қуатының өнімділікке қатынасы, металл сыйымдылығы M_{ud} , диірмен өнімділігінің металл конструкциясының салмағына қатынасы $M_{ud} = G/P$.

Экспериментті жоспарлау әдісімен зерттеулер жүргізу. Көп факторлы экспериментті таңдау тәжірибелердің ең аз саны кезінде ақпараттың ең көп санын алу қажеттілігіне негізделген. Бес факторлық модель үшін Хартли (25; 50) жоспарлары неғұрлым тиімді болып табылады.

Процестің өту сипатын айқындайтын факторлардың әсеріне жауап ретінде мыналар таңдалған: ұнтақтау жіңішкелігі, өнімділігі (R_{71}), жетек қуаты N , меншікті энергия сыйымдылығы E_{ud} , меншікті металл сыйымдылығы M_{ud} . Біздің зерттеуімізде мақаланың шектелуіне байланысты тек N қуатын зерттеуді қарастырамыз.

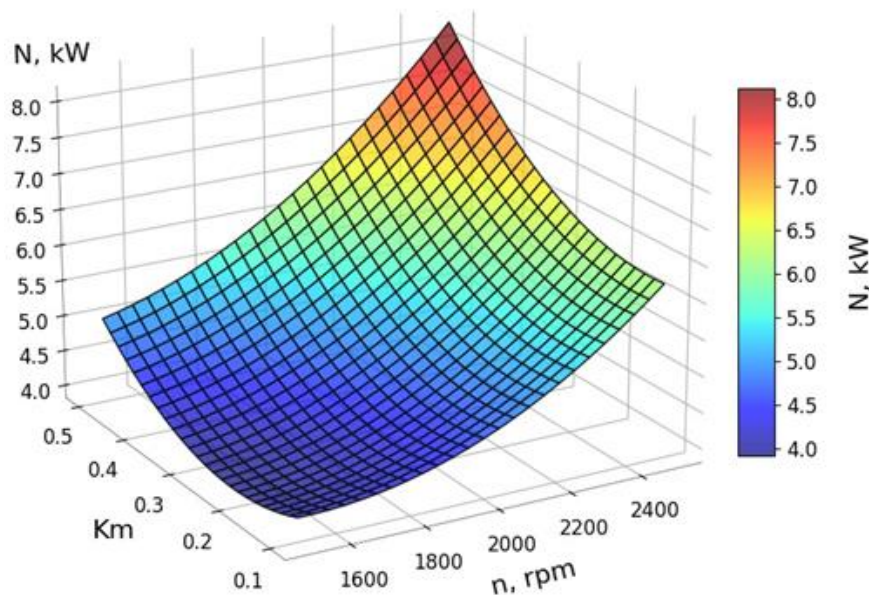
Эксперимент жоспарын құру үшін бес факторлы модель үшін матрица таңдалды. Ұсақтау процесінің математикалық моделі мәндерінің коэффициенттерін анықтау оның параметрлерінің дисперсиялық матрицасын пайдалана отырып, белгілі әдістеме бойынша орындалды. Алынған математикалық модель коэффициенттерінің маңыздылығын статистикалық бағалау Стюдент критерийінің көмегімен жүргізілді, ал математикалық моделдің барабарлығын тексеру Фишер критерийінің көмегімен жүргізілді.

Ұсынылған әдіснама экспериментті жоспарлаудан бастап жабдықты баптау бойынша практикалық ұсынымдарды әзірлеуге дейін ұсақтау процесін оңтайландыру міндетін шешуге кешенді түрде қарауға мүмкіндік берді (Kraugerud, O.F., 2011).

Эксперименттік деректерді өңдеу әдістері. Полиномиалды үлгілердің регрессия коэффициенттері ең аз квадраттар әдісімен айқындалды. Модельдер коэффициенттерін маңыздылығына тексергеннен кейін және барабарлығын одан әрі тексергеннен кейін процесс қуаты шығындарының математикалық моделі мынадай түрді қабылдайды (қалған модельдерді жеке қараймыз):

$$N = 4,8 + 1,35X_1 + 0,74X_2 + 0,4X_3 - 0,72X_5 + 0,54X_1^2 + 0,59X_2^2 + 0,64X_3^2 + 0,64X_4^2 + 0,31X_1X_2 - 0,5X_1X_5 - 0,31X_2X_5 \quad (1)$$

N қуатының n жиілігінен графикалық тәуелділігі 2-суретте берілген.



2-сурет. N қуатының n айналу жиілігіне тәуелділігі

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Мәрмәрды ұсақтау жөніндегі эксперименттердің сынақ сериясының нәтижелері вариация коэффициенті шекте екенін көрсетті $k_{var} = 5 - 6\%$. Алынған вариация коэффициентіне қатысты қабылданады $k_{доп} = 12 - 13\%$.

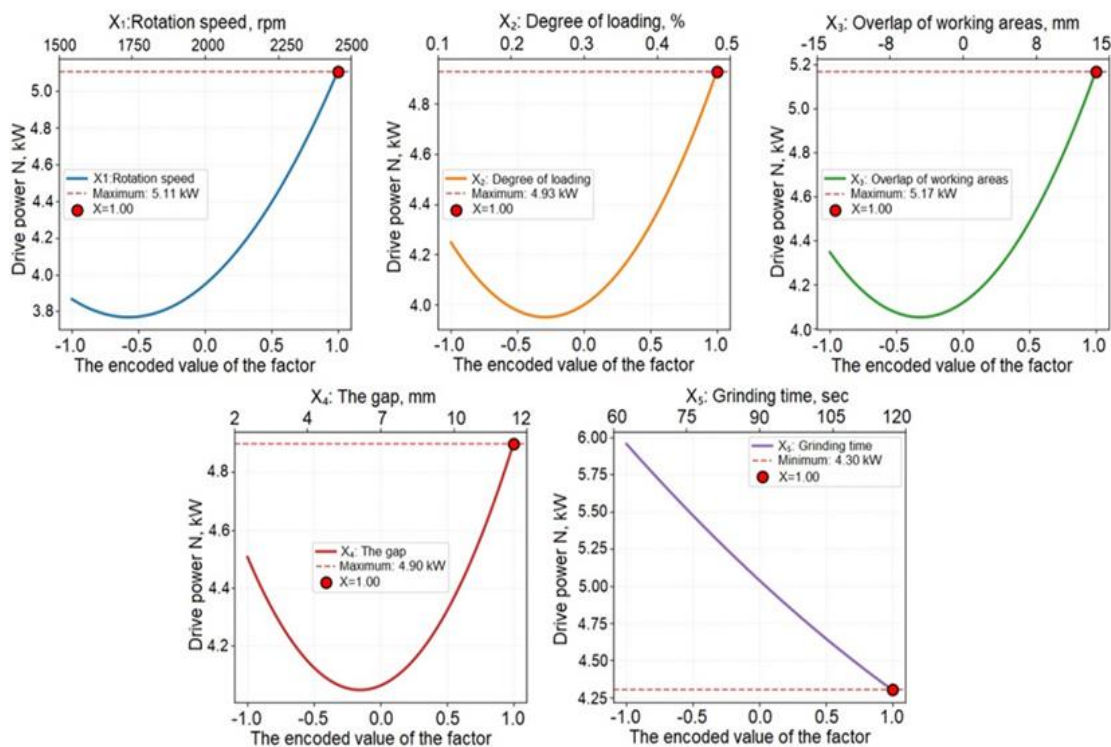
Көп факторлы эксперимент үшін зерттелетін факторлар, деңгейлер мен түрлендіру аралықтары 1-кестеде келтірілген.

1-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 камерасындағы саңылау, k_{zaz} , мм	X_4	2	7	12	5,0
5	Ұсақтау ұзақтығы, T , сек	X_5	60	90	120	30

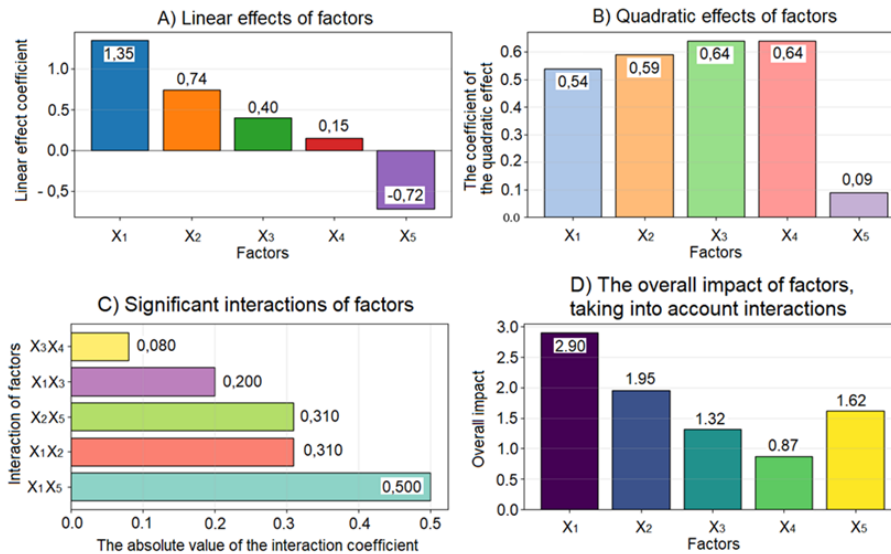
Ескерту – авторлармен құрастырылған

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 (P), 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.



3-сурет. N жетегінің қуатына технологиялық факторлардың әсері

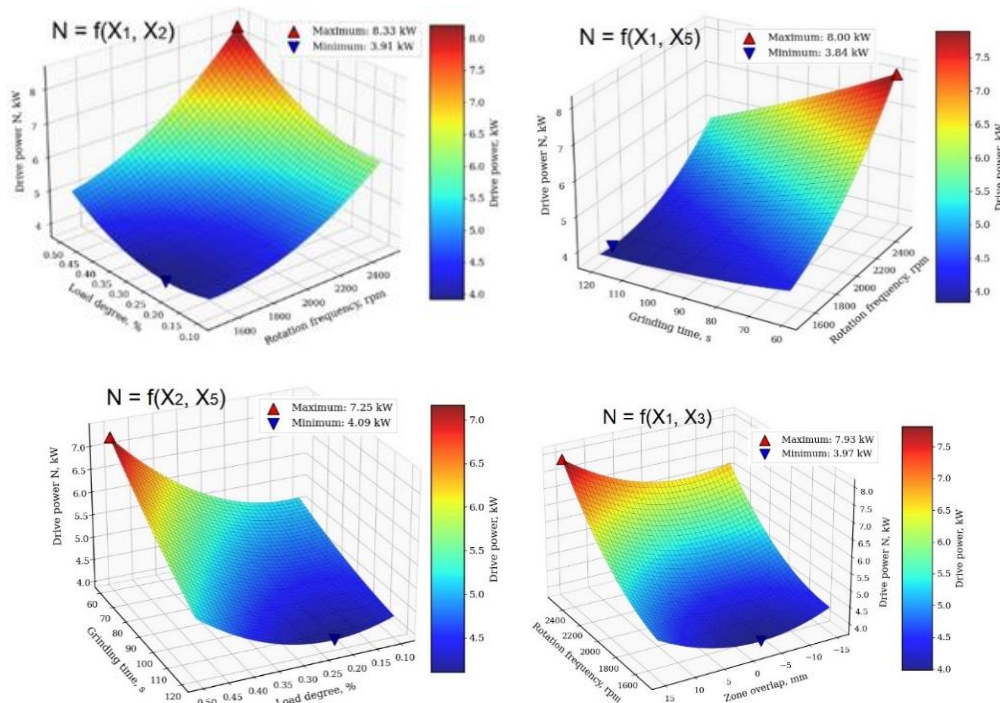
Ескерту – авторлармен құрастырылған



4-сурет. Факторлардың жетек қуатына әсерін талдау

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Факторлардың жетек қуатына әсерін талдау. Графиктер технологиялық параметрлердің неғұрлым маңызды жұптарының ұсақтау қондырғысы жетегінің қуатына бірлескен әсерін талдау үшін құрылған. Зерттеудің мақсаты талап етілетін өнімділікті сақтай отырып, ең аз энергия тұтынуды қамтамасыз ететін оңтайлы жұмыс режимдерін айқындау болды. Талдау Бокс-Бенкен экспериментін жоспарлау әдісімен алынған екінші реттегі математикалық модельге негізделген.



5-сурет. Негізгі факторлардың жұптары үшін жетек қуатының 3D форматтағы жауап беру беттері: 1) $N = (X_1, X_2)$; $N = f(X_1, X_5)$; $N = (X_2, X_5)$; $N = f(X_1, X_3)$

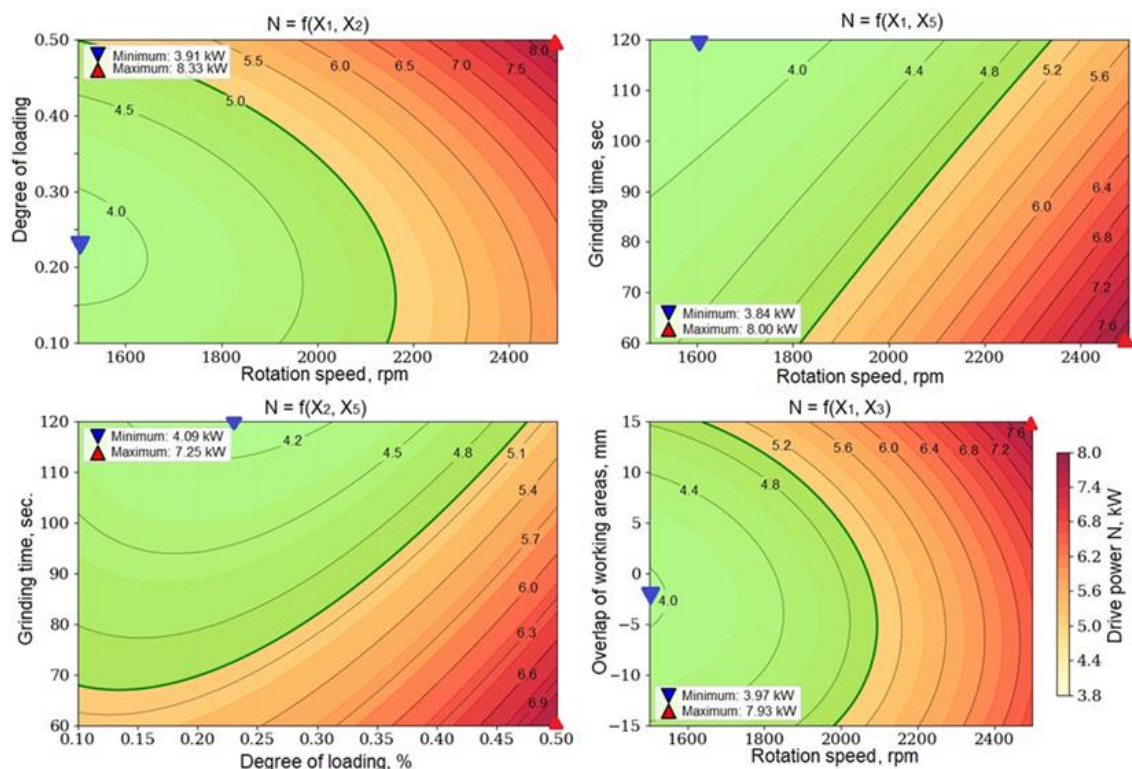
Ескерту – авторлармен құрастырылған

Ең көп әсер ететін төрт факторлардың әрбір жұбы үшін жауаптың үш өлшемді беті құрылған: айналу жиілігі - жүктеме дәрежесі (X_1 - X_2), айналу жиілігі - ұсақтау уақыты (X_1 - X_5), жүктеме дәрежесі - ұсақтау уақыты (X_2 - X_5) және айналу жиілігі - жұмыс аймағының жабылуы (X_1 - X_3). X және Y осьтері бойынша факторлардың нақты мәндері, Z осі бойынша - жетектің тиісті қуаты (кВт) көрсетілген. Барлық графиктер эксперимент жоспарының ортасында қалған факторлардың тіркелген орташа мәндерінен құрылған.

Әрбір бетте екі түйінді нүкте бөлінген: олардың сандық мәндерін көрсете отырып, максималды қуат (қызыл үшбұрыш жоғары) және минималды қуат (көк үшбұрыш төмен). JET түсті шкаласы қуат өзгерісінің градиенттерін көзбен шолып бағалауға мүмкіндік береді. X_1 - X_5 (жиілік-уақыт) жұбына ерекше назар аударылады, онда неғұрлым айқын теріс өзара іс-қимыл байқалады: айнарудың жоғары жиілігі кезінде ұсақтау уақытының ұлғаюы энергия тұтынудың елеулі өсуіне әкеледі.

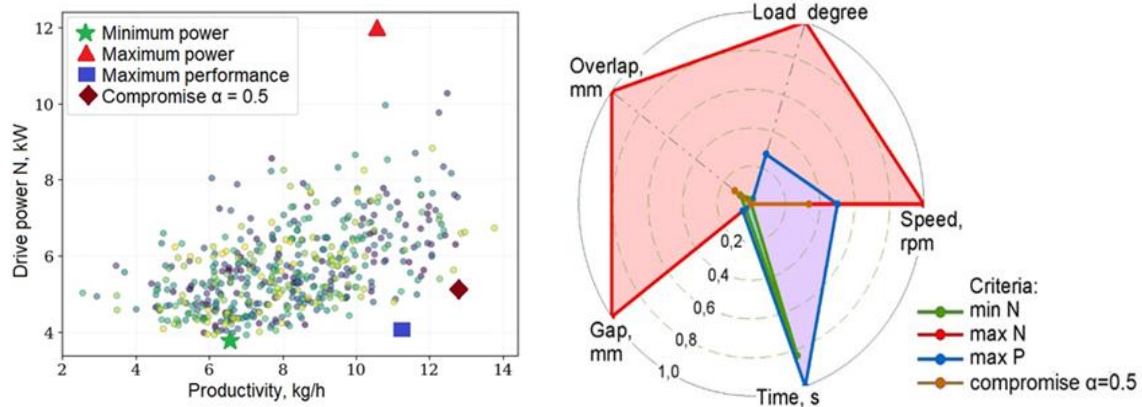
Салыстырмалы талдау. Жетек қуаты үшін (5-сурет) негізгі параметр айналу жиілігі (X_1) болады, бұл ретте қарама-қарсы үрдіс байқалады: ең аз энергия тұтынуға орташа жиіліктер (1900-2100 айн/мин) және ұсақтау уақытының қысқаруы (90-100 секунд) кезінде қол жеткізіледі. Әсіресе X_1 - X_5 теріс өзара іс-қимылы маңызды, мұнда екі параметрдің бір мезгілде ұлғаюы энергия шығындарының экспоненциялық өсуіне әкеледі.

Ұсақтау уақытына қатысты маңызды қайшылық анықталды. Ол өнімділік үшін - оны ұлғайту, ал энергия үнемдеу үшін - қысқарту талап етіледі. Бұл мақсаттар қақтығысы: ымыралы шешімдерді іздеуді талап етеді. Бұл ретте жүктеу дәрежесі (X_2) екі көрсеткішке де ұқсас оң әсерін тигізеді, бұл осы параметрді оңтайландыруды жеңілдетеді (Salem Ali Karrab and Mohamed Ali Ballem, 2020).



6-сурет. Оңтайлылық аумағы бар жетек қуатының контурлық графиктері

Ескерту – авторлармен құрастырылған



7-сурет. Жетек қуаты мен өнімділік арасындағы оңтайлылық

Ескерту – авторлармен құрастырылған

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Алынған нәтижелер жетек қуатын барынша азайту үшін айналу жиілігін 1900-2100 айн/мин диапазонында ұстап тұру және ұсақтау уақытын 90-100 секундқа дейін қысқарту қажет екенін көрсетеді. Бұл ретте жүктеу дәрежесі зерттелген диапазонда аз деңгейде ғана әсер етеді. Беттерді көзбен шолып талдау, энергия шығындарын оңтайландыру үшін айналу жиілігі мен цикл уақытын автоматты реттеу жүйелерін енгізудің экономикалық орындылығын растайды.

Факторлардың жетек қуатына әсерін талдау нәтижелері (N). Жетек қуатының моделіндегі өзара іс-қимыл коэффициенттерін талдау технологиялық параметрлер ықпалының күрделі сипатын анықтады. Бұл олардың бірлескен түрленуі кезіндегі синергетикалық және антагонистикалық әсерлері туралы куәландырады.

Түйінді өзара іс-қимыл және оларды түсіндіру:

1. $X_1 X_5$ (жиілік × уақыт): - 0,50 – неғұрлым күшті теріс өзара іс-қимыл. Жоғары айналу жиілігінде ұнтақтау уақытының ұлғаюы, әсерлердің қарапайым қосындысынан күткеннен гөрі қуаттың айтарлықтай төмендеуіне әкеледі.
2. $X_1 X_2$ (жиілік × жүктеу): + 0,31 және $X_2 X_5$ (жүктеу × уақыт): - 0,31 – қарама-қарсы белгінің өзара әрекеттесу шамасы бойынша салыстырмалы.
3. $X_1 X_3$ (жиілік × жабу): + 0,20 – жабу ұлғайған кезде жиіліктің әсерін күшейтетін оң өзара іс-қимыл.
4. $X_3 X_4$ (жабу × саңылау): - 0,08 – әлсіз теріс өзара іс-қимыл.

Шығатын технологиялық салдарлар:

- $X_1 X_5$ өзара іс-қимылы бір мезгілде уақытты ұлғайту және жиілікті төмендету кезінде энергия тұтынуды елеулі төмендету мүмкіндігін көрсетеді.
- $X_1 X_2$ 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.

Қуатты азайту бойынша факторлардың оңтайлы мәндері. Жүргізілген талдау технологиялық параметрлердің ұсақтағыш жетегінің қуатына ықпалының кешенді сипатын анықтады. Талап етілетін технологиялық көрсеткіштерді сақтай отырып, ең аз энергия тұтынуды қамтамасыз ететін жұмыстың ғылыми негізделген оңтайлы режимдерін айқындауға мүмкіндік берді. Ең маңызды факторлар ретінде айналу жиілігі мен ұсату уақытына ерекше назар аударған жөн.

$$\begin{cases} \frac{dN}{dX_1} = 1,35 + 1,08X_1 + 0,31X_2 + 0,20X_3 + 0,06X_4 - 0,50X_5 = 0 \\ \frac{dN}{dX_2} = 0,74 + 1,18X_2 + 0,31X_1 + 0,03X_3 - 0,01X_4 - 0,31X_5 = 0 \\ \frac{dN}{dX_3} = 0,40 + 1,28X_3 + 0,20X_1 + 0,03X_2 - 0,08X_4 - 0,02X_5 = 0 \\ \frac{dN}{dX_4} = 0,15 + 1,28X_4 + 0,06X_1 - 0,01X_2 - 0,08X_3 + 0,01X_5 = 0 \\ \frac{dN}{dX_5} = -0,72 + 0,18X_5 - 0,50X_1 - 0,31X_2 - 0,02X_3 + 0,01X_4 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Жүйенің сандық шешімінің оңтайлы мәндері:

$X_1 = -0,280 \rightarrow 1860$ айн/мин

$X_2 = -0,120 \rightarrow 0,276$

$X_3 = -0,420 \rightarrow -6,3$ мм

$X_4 = -0,340 \rightarrow 5,3$ мм

$X_5 = +1,000 \rightarrow 120$ сек

Қуаттың болжамды ең төменгі мәні:

$$\begin{aligned} N_{\min} &= 4,8 + 1,35 \cdot (-0,280) + 0,74 \cdot (-0,120) + 0,40 \cdot (-0,420) + 0,15 \cdot (-0,340) \\ &\quad - 0,72 \cdot (1,000) + 0,54 \cdot (-0,280)^2 + 0,59 \cdot (-0,120)^2 + 0,64 \cdot (-0,420)^2 + 0,64 \cdot \\ &\quad \cdot (-0,340)^2 + 0,09 \cdot (1,000)^2 + 0,31 \cdot (-0,280) \cdot (-0,120) + 0,20 \cdot (-0,280) \cdot \\ &\quad \cdot (-0,420) + 0,06 \cdot (-0,280) \cdot (-0,340) - 0,50 \cdot (-0,280) \cdot (1,000) + 0,03 \cdot (-0,120) \cdot \\ &\quad \cdot (-0,420) - 0,01 \cdot (-0,120) \cdot (-0,340) - 0,31 \cdot (-0,120) \cdot (1,000) - 0,08 \cdot (-0,420) \cdot \\ &\quad \cdot (-0,340) - 0,02 \cdot (-0,420) \cdot (1,000) + 0,01 \cdot (-0,340) \cdot (1,000) = 3,95 \text{ кВт} \end{aligned} \quad (3)$$

Алынған нәтижелер елеулі экономикалық әсері бар ұсақтаудың энергия тиімді технологияларын әзірлеу үшін негіз бола алады.

Жүргізілген зерттеулер, екінші реттегі математикалық модельдеу негізінде ұсақтау процесінің технологиялық параметрлерін оңтайландырудың кешенді әдістемесін әзірлеуге және сынақтан өткізуге мүмкіндік берді. Жұмыс нәтижелерінің теориялық та, практикалық та маңызы бар.

ҚОРЫТЫНДЫ

1. Серіппелі-роторлы диірменде ұсақтау процесінің бес негізгі шығу параметрлері: ұнтақтау (R_{71}), өнімділік (P), жетек қуаты (N), меншікті энергия сыйымдылығы (E_{ud}) және меншікті металл сыйымдылығы үшін, екінші реттегі баламалы полиномиальды модельдер әзірленді (M_{ud}).

Алынған үлгілердің детерминация коэффициенттері 0,93-тен асады, бұл олардың жоғары болжамдық қабілеттілігін куәландырады.

2. Оңтайландырудың әр түрлі критерийлері үшін технологиялық параметрлердің оңтайлы мәндері айқындалды:

– ұнтақтау жұқа жерлерін барынша азайту үшін: уақыты 80,4 с, жиілігі 1957 айн/мин, жабыны - 4,5 мм;

– өнімділікті арттыру үшін: уақыт 132 с, жиілік 2074 айн/мин;

– қуатты барынша азайту үшін: уақыт 120 с, жиілік 1860 айн/мин.

Жұмыстың ғылыми жаңашылдығы: екінші реттегі полиномиалды модельдер негізінде серіппелі-роторлы диірмен жұмысының оңтайлы режимдерін айқындаудың талдамалық әдісін әзірлеу және экспериментті жоспарлау, регрессиялық талдау және көп материалды оңтайландыру әдістерін бірыңғай әдістемеге біріктіру болып табылады.

Жүргізілген зерттеу технологиялық процестерді оңтайландыру әдіснамасын дамытуға елеулі үлес қосады және ұсақтау процестері мен ұқсас технологиялық операцияларды жетілдіру саласындағы одан әрі зерттеулер үшін негіз бола алады.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Жарияланымға байланысты зерттеулерді Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады. Грант AP26102017, тақырыбы: «Өсімдік шаруашылығы қалдықтарын қайта өңдеудің инновациялық технологиясына арналған жоғары өнімділікті параметрлерді негіздеу және жабдықтарды әзірлеу».

ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ ЭТИКА КОМИТЕТІНІҢ ҚОРЫТЫНДЫСЫ: Зерттеу таза техникалық сипатта болып, адам қатысушылары мен жануарларды қамтымағандықтан, бұл бөлім «қолданылмайды» деп белгіленді.

ЕРІКТІ КЕЛІСІМ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Барлық қатысушылардан зерттеуге дейін жазбаша ерікті келісім алынды. Адам қатысушылары тартылмағандықтан, бұл бөлім «қолданылмайды» деп белгіленді.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Осы техникалық зерттеудің нәтижелерін растайтын деректерді тиісті сұраныс бойынша жауапты автордан алуға болады. Балама түрде, жұмыс сандық модельдеу мен теориялық талдауға негізделгендіктен, жаңа эксперименттік деректер жиналмаған.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар әдістемелік қолдау мен пайдалы пікірлері үшін әріптестеріне, сондай-ақ мақаланың сапасын арттыруға септігін тигізген «Өскемен-Тазалық» жауапкершілігі шектеулі серіктестігі мен «Иннотех» ғылыми-өндірістік бірлестігіне алғысын білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Жасанды интеллект (ЖИ) құралдары пайдаланылмады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Bond, F. C. (1952). The third theory of comminution. *Mining Engineering*, 4, 33.
- Bond, F. C. (1964). Lab equipment and tests help predict metal consumption in crushing and grinding units. *Engineering and Mining Journal*, 165(6), 169–176.
- Bulatov, S. Yu. (2015). Modeling of work process of grain crusher ejector. *Tractors and Agricultural Machinery*, 82(5), 25–27. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-65437>
- Chuikov, V. E., Konovalov, V. V., Dontsova, M. V., & Petrova, S. S. (2024). Justification of a promising functional scheme of a grain crusher. *Bulletin Samara State Agricultural Academy*, 2, 34–43. <https://doi.org/10.55170/1997-3225-2024-9-2-34-43>
- Frolov, V. Y., Kotelevskaya, E. A., & Tumanova, M. I. (2020). Theoretical aspects of the working process of a press extruder with a variable step auger for preparation of concentrated feed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 52003.
- Karrab, S. A., & Ballem, M. A. (2020). Failure analysis and repair of a broken extruder shaft: A case study. *European Journal of Engineering Research and Science*, 5(1), 107–111. <https://doi.org/10.24018/ejers.2020.5.1.1738>
- Kraugerud, O. F., & Svihus, B. (2011). Effects of online pretreatment of plant ingredients on processing responses and physical properties in extruded fish feed. *Animal Feed Science and Technology*, 168(3–4), 250–256.
- Lee, J. (2007). Free vibration analysis of cylindrical helical springs by the pseudospectral method. *Journal of Sound and Vibration*, 302(1–2), 185–196.
- Li, H., Xiong, Z., & Li, X. (2019). Optimization of the extrusion process for the development of extruded snacks using peanut, buckwheat, and rice blend. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(12), 14264.
- Li, S., & Lu, J. (2014). Finite element analysis of worm auger in meat grinder. *Advanced Materials Research*, 945–949, 162–165. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.162>

- Lyashuk, O., Pyndus, Y., Lutsiv, I., Vovk, Y., Poberezhna, L., Tretiakov, O., & Zoloty, R. (2019). Fracture cause analysis of the extruder's shaft and geometry optimization of the spline. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 13(1), 4449–4460. <https://doi.org/10.15282/jmes.13.1.2019.08.0378>
- Mu, X., Li, H., Wang, Z., Wang, Q., Geng, D., & Zhu, J. (2023). Comparison of crushing effect of differently shaped crushing rollers on whole-plant silage maize. *Agriculture*, 13(7), Article 1276. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071276>
- Yildirim, V. (2012). On the linearized disturbance dynamic equations for buckling and free vibration of cylindrical helical coil springs under combined compression and torsion. *Meccanica*, 47(4), 1015–1033.
- Yu, A. M., & Hao, Y. (2012). Improved Riccati transfer matrix method for free vibration of non-cylindrical helical springs including warping. *Shock and Vibration*, 19(6), 1167–1180.
- Yu, A. M., & Hao, Y. (2013). Effect of warping on natural frequencies of symmetrical cross-ply laminated composite non-cylindrical helical springs. *International Journal of Mechanical Sciences*, 74, 65–72.

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Молдаханов Бекболат Аскерханович – PhD, аға ғылыми қызметкер, «Европлюс Восток» ЖШС, Өскемен қ., Қазақстан
Молдаханов Бекболат Аскерханович – PhD, старший научный сотрудник, ТОО «Европлюс Восток», г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Moldakhanov Bekbolat Askerkhanovich – PhD, senior researcher, «EUROPLUS VOSTOK» LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: bek_m78@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2977-693X>



Дудкин Михаил Васильевич – техника ғылымдарының докторы, профессор, «Европлюс Восток» ЖШС, Өскемен қ., Қазақстан
Дудкин Михаил Васильевич – доктор технических наук, профессор, ТОО «Европлюс Восток», г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Dudkin Mikhail Vasilyevich – doctor of technical sciences, professor, «EUROPLUS VOSTOK» LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: doudkin@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5732-0724>



Яковлев Владимир Сергеевич – техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Яковлев Владимир Сергеевич – магистр технических наук, старший преподаватель, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Yakovlev Vladimir Sergeevich – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, East Kazakhstan Technical University named after D.Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: vel1051@yandex.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7315-4719>



Байгунусов Айдос Жомартханович – техника ғылымдарының магистрі, докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Байгунусов Айдос Жомартханович – магистр технических наук, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Baigunussov Aidos Zhomarthanovich – Master of Technical Sciences, doctoral student, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: baygunusov.aydos@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8607-4986>



Роговский Валерий Владимирович – аға оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Роговский Валерий Владимирович – старший преподаватель, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Valery Rogowski – senior lecturer, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: gerat1302@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0109-6342>