

УДК 622.22.553.4:519.85

<https://doi.org/10.37101/ftpgp26.01.010>

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ
РІЗАННЯ ВУГІЛЛЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТИПУ ВИКОНАВЧОГО
ОРГАНУ ОЧИСНОГО КОМБАЙНУ**

А.О. Хорольський^{1*}, В.М. Почепов², Ю.О. Заболотна², В.Ю. Медяник²,
В.В. Лапко², С.В. Коробков², О.Р. Мамайкін²

¹Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки
ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро,
Україна

*Відповідальний автор: e-mail: andreykh918@gmail.com

**STUDY OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF THE CUTTING
PROCESS COAL DEPENDING ON THE TYPE OF EXECUTIVE
AUTHORITY OF THE LONGWALL SHEARERS**

A.A. Khorolskyi^{1*}, V.M. Pochepov², Yu.O. Zabolotna², V.Yu. Medianyuk²,
V.V. Lapko², S.V. Korobkov², O.R. Mamaikin²

¹Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of
Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Dnipro, Ukraine

²Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

*Corresponding author: e-mail: andreykh918@gmail.com

ABSTRACT

Purpose. To develop a new approach to the selection of rational operating parameters of cleaning equipment on coal seams of small and medium capacity.

Methods. In order to study the efficiency of coal extraction processes by cleaning combines, it is proposed to evaluate the useful work of cleaning equipment, which is necessary for the destruction of coal (cutting), transportation of rock mass, maintenance of the produced space. The main indicators of the coal cutting process are: energy costs for extracting 1 cubic m. coal, benchmark costs for extracting 1 m³ coal, relative extraction efficiency. Based on the calculation of the quantitative indicators of the coal cutting process, it is possible to obtain the limit values of the change in energy characteristics. The energy characteristics of the coal cutting process were calculated depending on the extraction capacity of the layer, the scheme of working out the cleaning pit, the type of the cleaning combine movement system. This made it possible to obtain quantitative indicators of the mechanized coal mining process. To convert a quantitative assessment into a qualitative one, it is proposed to use the method of multi-criteria optimization - the generalized criterion of Harrington's desirability.

Findings. Based on the results of the calculation of the energy characteristics of the most common cleaning combines, it was established that it is most appropriate to use the UKD-400 and CLS-450 combines on low-capacity formations. Combine harvesters KA80, KA200 are impractical to use due to the high level of energy costs. The operation of harvesters intended for work on layers of medium capacity is impractical on thin layers. The RKU-10 harvester has high reference costs for the coal cutting process, therefore, when justifying a rational configuration using the RKU10 cleaning harvester, it is worth analyzing not only the indicators of the extraction machine, but also the conveyor and mechanized fastening. The situation is similar for the KA80, KA200 combines - they can be operated only when high-quality coal (with low ash content) is needed. The obtained results made it possible to form recommendations regarding the rational area of application of cleaning harvesters in the mines of the Western Donbass.

Originality. A new approach has been created regarding the selection of rational parameters for the operation of cleaning harvesters on small and medium capacity reservoirs. The obtained results can be used in the future for the selection of means of coal transportation, support of the produced space.

Paratactical implication. Effective limits for the operation of cleaning harvesters for the conditions of Western Donbas have been established.

Keywords: energy characteristics, coal mining, Harrington desirability criterion, rational field of exploitation, private function.

2. ВСТУП

Ефективність процесу видобутку корисної копалини визначається не тільки ступенем вилучення, якістю, але й показниками процесів, які супроводжують видобуток. Серед цих показників один із головних – енергетична ефективність процесу видобутку корисної копалини. Якщо розглядати видобуток вугілля, то основним критерієм є – кількість витраченої енергії на процес різання, необхідної для видобутку 1 т вугілля (або 1 м³ вугілля).

Варто зупинитись на невирішених раніше питаннях, які формують актуальність дослідження:

1) Відсутність універсальної – узагальненої оцінки процесу різання вугілля очисним комбайном. Існують кількісні оцінки [1, 2] проте різноманіття гірничо-геологічних умов, конфігурацій виконання робочих органів очисних комбайнів не дозволяють визначити раціональну область. Для кожного набору технологічних параметрів, характеристик гірського масиву існує власна «еталонна ефективність» процесу різання. Необхідно розробити якісну оцінку.

2) Із попереднього пункту слідує багатоманіття типів очисного обладнання. Для умов Західного Донбасу існують шнекові та барабанні типи робочих органів очисного комбайну; кількість різців у першій лінії від 2 до 5; ширина захвату: 0,63 та 0,80 м; система переміщення: винесена, рейкова, безланцюгова. В залежності від потужності пласта різні діаметри D (обирається із типового ряду діаметрів) виконавчого органу ($D=h/1,82$; де h – виймальна потужність пласта). Таким чином, необхідно оцінити енергетичні характеристики очисних комбайнів різних типорозмірів: УКД400, CLS-450,

УКД200, РКУ10, КА80, КА200 в межах виймальних потужностей 0.90-1.70 м. Важливо встановити доцільність відпрацювання пластів малої потужності комбайнами призначеними для пластів середньої потужності.

На основі розв'язання означених проблем можна отримати важливий науковий результат, який полягає в розробці якісної оцінки процесу різання вугілля виконавчими органами очисних комбайнів на основі встановлення раціональної області відпрацювання вугільного пласта за виймальною потужністю.

2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основною характеристикою, яка може бути використана для оцінки обладнання, є корисна робота [3]. Корисна робота це енергія, яка витрачається обладнанням для виконання основних технологічних операцій. Вона виводиться з рівняння енергетичного балансу і включає в себе:

- 1) сукупність витрат на здійснення технологічних операцій;
- 2) зношування та деформацію;
- 3) враховує кінематику обладнання.

В роботі [4] зазначено, що в загальному балансі корисної роботи 81% припадає на різання вугілля, 18% на транспортування вугілля, 1% на підтримку покрівлі.

Як видно з наведеного аналізу найбільші витрати припадають на різання вугілля. Основними параметрами, якими можна охарактеризувати ефективність процесу виймання, є:

- енергетичні витрати на виймання 1 м^3 вугілля, W_{AP} , кВт·год/м³;
- еталонні витрати на виймання 1 м^3 вугілля, H_{we} , кВт·год/м³;
- ефективність виймання, $\zeta_{ef} = W_{AP}/H_{we}$.

Корисна робота визначається з рівняння енергетичного балансу [5]

$$A_{\pi} = A_p + A_{об} + A_{ид},$$

де A_{π} – корисна робота, МДж;

A_p – корисна робота, що витрачається на різання, МДж;

$A_{об}$ – корисна робота комбайна по забезпеченню своїх функцій, залежить від маси і кінематики комбайна, МДж;

$A_{ид}$ – робота, що витрачається на зношування і деформацію деталей, МДж.

Залежно від конструкції очисного комбайна і виконуваних ним функцій рівняння енергетичного балансу буде мати різний вигляд. Якщо електроенергія витрачається тільки на навантаження і руйнування масиву, то рівняння енергетичного балансу буде мати вигляд [6, 7]

$$A_{\pi} = A_p + A_{пг} + A_{ид},$$

де $A_{пг}$ – робота, яка витрачається на навантаження, МДж.

За аналогією з балансом робіт можна записати рівняння балансу потужностей:

$$P_{\Pi} = P_{\Pi\Gamma} + P_p + P_{\Pi p} + P_{\text{ид}},$$

де $P_{\Pi\Gamma}$ – потужність, що витрачається на навантаження, кВт;

P_p – потужність, що витрачається на руйнування масиву, кВт;

$P_{\Pi p}$ – потужність, яка витрачається на переміщення комбайна, кВт;

$P_{\text{ид}}$ – потужність, що витрачається на знос деталей, кВт.

Для визначення корисної роботи, яка витрачається на різання, ефективно-сті руйнування необхідно визначити потужність, затрачену на різання:

$$P_p = P_{\Pi} - P_{\Pi p} - P_{\text{ид}} - P_{\Pi\Gamma}.$$

Сумарна потужність визначиться з виразу:

$$P_{\Pi} = P_{\text{уст}} K_{\text{им}},$$

де $P_{\text{уст}}$ – стійка потужність електродвигуна, приймається по каталогу обладнання, кВт;

$K_{\text{им}}$ – коефіцієнт використання потужності приводу.

Потужність, що витрачається на навантаження вугілля:

$$P_{\Pi\Gamma} = \frac{1000 Q h l K_{\text{ок}} K_{\text{пог}} K_{\text{тр}}}{60 \cdot 102 \cdot h_i},$$

де Q – хвилинна продуктивність, т/хв; вона визначиться за формулою:

$$Q = H_p B_3 \gamma_{\text{пл}} v_{\Pi},$$

де H_p – виймальна потужність пласта, м;

B_3 – ширина захвату виконавчого органу, м;

$\gamma_{\text{пл}}$ – щільність вугілля, т/м³;

v_{Π} – швидкість подачі виконавчого органу, м/хв., визначиться за формулою:

$$v_{\Pi} = \frac{30 \cdot N \cdot n_1 \cdot \eta_{\text{ред}}}{A \cdot k_{\text{от}} \cdot n_3 \cdot D_{\text{ш}} \cdot K_{\text{в}} \cdot K_{\text{фз}} \cdot K_{\text{зр}} \cdot K_{\alpha}},$$

де N – потужність приводу комбайна, кВт;

n_1 – кількість різців беруть участь в одній лінії різання, в залежності від типу виконавчого органу може бути 2, 3, 4 шт.;

$\eta_{\text{ред}}$ – ККД редуктора;

A – опір вугілля різанню, Н/мм;

$k_{\text{от}}$ – коефіцієнт віджиму визначиться за формулою:

$$k_{от} = k_{от0} + \frac{\frac{B_3}{H_p} - 0,1}{\frac{B_3}{H_p} + 1},$$

де $k_{от0}$ – коефіцієнт віджиму вугілля, пропонується приймати рівним 0,45, а для вугілля марок К, Ж, ОС, Т – 0,35;

n_3 – загальна кількість різців, що беруть участь в процесі руйнування; в більшості випадків приймається рівним половині загальної кількості різців, шт.;

$D_{ш}$ – діаметр шнека, м;

K_B – коефіцієнт що враховує параметри різця, він визначається за формулою:

$$K_B = 0,35B + 0,3,$$

де B – ширина ріжучої кромки, для різця типу ЗР4-80 В приймається 1,3 см;

$K_{фз}$ – коефіцієнт форми різання забою, для стандартних різців приймати рівним 1,0;

$K_{зр}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення зусиль різання, внаслідок затуплення різального інструменту, приймається рівним 1,25;

K_{α} – коефіцієнт, що враховує збільшення сили різання в порівнянні зі стандартним ДКС, приймається у відповідності з «КД12.10.040-99. Вироби вугільного машинобудування. Комбайни очисні. Методика вибору параметрів і розрахунку сил різання і подачі на виконавчих органах (на заміну ОСТ12.44.258-84)»;

h – товщина стружки, м;

l – середня відстань навантаження вугілля, м;

$K_{ок}$ – коефіцієнт збільшення зусилля навантаження, приймається рівним 2,5;

$K_{пог}$ – коефіцієнт кількості вугілля навантаженого шнеком, приймається рівним 4,41;

$K_{ок}$ – коефіцієнт тертя на переміщення вугілля, приймається 2,8;

h_i – висота від ґрунту до центру навантажувального вікна, м;

Потужність, що витрачається на навантаження, визначиться за формулою:

$$P_{пр} = \frac{Fv_{п}}{60},$$

де F – середнє сумарне тягове зусилля, що витрачається на переміщення, кН; визначиться за формулою:

$$F = Y_{\Sigma} + F_{пр} + F_{тр},$$

де $F_{тр}$ – зусилля, що витрачається на транспортування самого комбайна;

Y_{Σ} – коефіцієнт, що враховує вплив різця на переміщення, визначиться за формулою:

$$Y_{\Sigma} = \frac{K_y}{1,55} n_z \bar{Z}_{\text{нсп}},$$

де K_y – коефіцієнт впливу кута різання;

$\bar{Z}_{\text{нсп}}$ – середнє зусилля різання, на одному різці.

Зусилля, що витрачається на навантаження, визначиться за формулою:

$$F_{\text{пг}} = \frac{P_{\text{пг}} 1000 \cdot 60}{v_{\text{п}}}$$

Потужність, що витрачається комбайном при роботі, визначиться за формулою:

$$P_{\text{ид}} = (1 - \eta_{\text{эл}})P_{\text{п}} + (1 - \eta_{\text{п}}) + (1 - \eta_{\text{рд}})P_{\text{р}},$$

де $\eta_{\text{эл}}$ – ККД електродвигуна;

$\eta_{\text{эл}}$ – ККД механізму подачі;

$\eta_{\text{рд}}$ – ККД редуктора;

$P_{\text{р}}$ – загальна потужність, що витрачається приводом з вирахуванням потужності на переміщення і навантаження, кВт.

Після визначення потужності, що витрачається комбайном на руйнування масиву можна перейти до визначення основних характеристик очисних комбайнів, необхідних для порівняння ефективності використання.

Питома корисна робота визначиться за формулою [8]:

$$W_{\text{Ар}} = \frac{0,0167 P_{\text{р}} K_{\text{от}}}{G_{\text{п}}},$$

де $G_{\text{п}}$ – об'ємна хвилинна продуктивність, визначиться за формулою:

$$G_{\text{п}} = H_{\text{р}} B_{\text{з}} v_{\text{п}}.$$

Обсяг енергії витрачається на видобуток 1 м³ вугілля визначиться за формулою:

$$W'_{\text{Ар}} = \frac{0,067 P_{\text{р}} K_{\text{от}}}{Q}$$

Еталонна енергоємність руйнування з урахуванням коефіцієнта віджиму, визначиться за формулою:

$$H_{We} = \frac{0,00272AK_{от}}{(2 + 2,8h^{0,5})}$$

Ефективність руйнування $\zeta'_{эф}$ визначиться за формулою:

$$\zeta'_{эф} = \frac{H_{We}}{W_{Ар}}$$

Після цього будуть розраховані показники процесу різання вугілля очисними комбайнами. На основі визначених показників буде встановлено межі зміни характеристик і кількісні показники можна перетворити у якісні за допомогою методів багатокритеріальної оптимізації.

Наразі існує ряд методів багатокритеріальної оптимізації:

1) Метод ідеальної точки [9]. Передбачає визначення ідеальної точки, яка відповідає найкращим значенням за всіма критеріями, і пошук альтернативи, найближчої до цієї точки.

2) Метод лексикографічного порядку [10]. Встановлюється порядок важливості критеріїв, і альтернативи порівнюються спочатку за найважливішим критерієм, потім за наступним і так далі.

3) Метод зваженої суми [11]. Всі критерії зводяться до однієї функції цільової, де кожен критерій має свою вагу.

4) Метод аналізу ієрархій [12]. Дозволяє структурувати проблему і визначити ваги критеріїв за допомогою попарних порівнянь.

5) Узагальнений критерій бажаності Харрінгтона [13]. Всі критерії приводяться до узагальненого безрозмірного виду. Ідея полягає в тому, що оцінка виражається безрозмірною функцією бажаності, яку можна побудувати перетворенням вимірних значень «у» в безрозмірну шкалу бажаності «d». Шкала влаштована так, що найбільш кращим значенням відповідає більш висока оцінка функції бажаності. Отримане значення є характеристикою об'єкта, тобто відповідністю отриманого значення до необхідного (бажаного).

6) Методи еволюційної оптимізації [14]. Засновані на імітації природної еволюції, дозволяють знаходити оптимальні рішення в складних задачах.

Порівняння проводилось за наступними критеріями:

1) Складність – відображає складність математичного апарату, необхідного для реалізації методу, а також складність його застосування.

2) Гнучкість – показує, наскільки метод пристосований до різних типів задач і даних.

3) Інтерпретація результатів – оцінює, наскільки легко зрозуміти результати, отримані за допомогою методу.

4) Облік нечіткості – показує, наскільки метод здатний враховувати неточність і невизначеність даних.

5) Облік динаміки – оцінює, наскільки метод пристосований до вирішення задач, в яких критерії змінюються з часом.

В табл. 1 показано результати порівняльного аналізу методів багатокритеріальної оптимізації.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз методів багатокритеріальної оптимізації

Критерій	Метод Харрінгтона	Метод ідеальної точки	Метод лексикографічного порядку	Метод зваженої суми	Метод аналізу ієрархій	Методи еволюційної оптимізації
складність	середня	середня	Низька	середня	висока	висока
гнучкість	висока	середня	Низька	середня	висока	висока
інтерпретація результатів	проста	середня	Проста	середня	складна	складна
облік нечіткості	можлива	обмежена	Складна	обмежена	можлива	можлива
облік динаміки	можлива	обмежена	Складна	обмежена	можлива	висока

Як видно із наведеної таблиці найбільш доцільно буде використати метод узагальненого критерію бажаності Харрінгтона.

Після розрахунку основних параметрів процесу виймання отримані значення порівнюються з еталонними та приводяться до безрозмірного вигляду.

Це реалізується наступним чином: найгіршому значенню присвоюється оцінка 0,20, а найкращому 0,80. Для переходу від виміряного значення до безрозмірного використовується наступна формула [15]:

$$d = \exp[-\exp(b_0 - b_1 y)],$$

де d – часткова функція бажаності;

y – виміряне значення;

b_0, b_1 – коефіцієнти, які можуть бути визначені із системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \exp[-\exp(-y)] &= 0,8 \text{ звідки } y = 1,51, \\ \exp[-\exp(-y)] &= 0,2 \text{ звідки } y = -0,46. \end{aligned}$$

Система рівнянь, що дозволяє визначити коефіцієнти b_0, b_1 має вигляд:

$$b_0 + b_1 y_{max} = 1,51,$$

$$b_0 + b_1 y_{min} = -0,46,$$

де y_{max} – максимальне значення;

y_{min} – мінімальне значення.

Після цього можна обчислити узагальнену функцію бажаності.

$$D_G = \sqrt[q]{\prod_{i=1}^q d_i},$$

де q – кількість частинних функцій бажаності;

d_i – значення частинних функцій бажаності.

Для кожної потужності пласта буде визначена узагальнена функція бажаності. Функція бажаності Харрінгтона має S-подібну форму. При малих значеннях x функція близька до нуля, що означає низьку бажаність. При великих значеннях x функція наближається до одиниці, що означає високу бажаність. В межах $D_G=0,37-0,62$ область експлуатації є задовільною, при $D_G=0,63-0,80$ область експлуатації є раціональною, при $D_G=0,81-1,00$ необхідно провести ретельне техніко-економічне обґрунтування, адже згідно визначення функції – збільшення якості є недоцільним через високий рівень витрат [16, 17].

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Було проведено розрахунок енергетичних характеристик для найбільш поширених очисних комбайнів.

В табл. 2 наведено приклад розрахунку енергетичних характеристик для комбайну УКД-200. На основі визначених характеристик будуть визначені еталонні характеристики, які будуть приведені до узагальненого – безрозмірного вигляду.

Таблиця 2. Енергетичні характеристики процесу різання вугілля очисним комбайном УКД-200

м,м	K_{om}	V_p м/хв	G_n т/хв	Q м ³ /хв	$P_{нз}$ кВт	$Y\Sigma$ кН	$F_{нозр}$ кН	$F_{тр}$ кН	F кН
0,9	0,70	6,42	3,64	4,92	5,8	10,6	54,2	50,8	115,6
	$P_{нр}$ кВт	$P_{ур}$ кВт	η	$P_{уд}$ кВт	P_p кВт	W_{AP} кВт·год/м ³	W'_{AP} МДж/т	H_{we} кВт·год/м ³	$\zeta'_{эф}$
	12,4	168,8	0,92	52,5	116,3	0,3735	0,9928	0,0881	0,23
1,0	K_{om}	V_p м/хв	G_n т/хв	Q м ³ /хв	$P_{нз}$ кВт	$Y\Sigma$ кН	$F_{нозр}$ кН	$F_{тр}$ кН	F кН
	0,68	6,21	3,9	5,3	6,4	10,6	62,1	50,8	123,5
	$P_{нр}$ кВт	$P_{ур}$ кВт	η	$P_{уд}$ кВт	P_p кВт	W_{AP} кВт·год/м ³	W'_{AP} МДж/т	H_{we} кВт·год/м ³	$\zeta'_{эф}$
	12,8	167,8	0,92	52,4	115,4	0,3360	0,8830	0,0881	0,26
1,1	K_{om}	V_p м/хв	G_n т/хв	Q м ³ /хв	$P_{нз}$ кВт	$Y\Sigma$ кН	$F_{нозр}$ кН	$F_{тр}$ кН	F кН
	0,65	8,6	6,0	8,1	9,9	10,6	68,8	50,8	130,2
	$P_{нр}$ кВт	$P_{ур}$ кВт	η	$P_{уд}$ кВт	P_p кВт	W_{AP} кВт·год/м ³	W'_{AP} МДж/т	H_{we} кВт·год/м ³	$\zeta'_{эф}$
	18,6	158,5	0,92	52,3	106,2	0,1921	0,5113	0,0881	0,45
1,2	K_{om}	V_p м/хв	G_n т/хв	Q м ³ /хв	$P_{нз}$ кВт	$Y\Sigma$ кН	$F_{нозр}$ кН	$F_{тр}$ кН	F кН
	0,62	6,1	4,6	6,2	7,4	15,9	73,1	50,8	139,8
	$P_{нр}$ кВт	$P_{ур}$ кВт	η	$P_{уд}$ кВт	P_p кВт	W_{AP} кВт·год/м ³	W'_{AP} МДж/т	H_{we} кВт·год/м ³	$\zeta'_{эф}$
	14,2	165,4	0,92	52,4	113,0	0,2543	0,6780	0,0881	0,34
1,3	K_{om}	V_p м/хв	G_n т/хв	Q м ³ /хв	$P_{нз}$ кВт	$Y\Sigma$ кН	$F_{нозр}$ кН	$F_{тр}$ кН	F кН
	0,66	5,7	5,9	8,0	9,8	15,9	103,2	50,8	169,9
	$P_{нр}$ кВт	$P_{ур}$ кВт	η	$P_{уд}$ кВт	P_p кВт	W_{AP} кВт·год/м ³	W'_{AP} МДж/т	H_{we} кВт·год/м ³	$\zeta'_{эф}$
	16,1	161,1	0,92	52,0	110,1	0,2057	0,5450	0,0881	0,43

Аналогічним чином були розраховані характеристики і для інших типів обладнання. Після цього було визначено показники зміни енергетичних характеристик (табл. 3).

Таблиця 3. Граничні показники зміни енергетичних характеристик

Показник	Значення	
	Максимальне	мінімальне
W_{AP} , кВт·год/м ³	0,11	0,57
H_{we} , кВт·год/м ³	0,05	0,125
$\zeta_{ef} = W_{AP}/H_{we}$	0,62	0,14

Після визначення основних параметрів, що характеризують роботу очисного комбайна, необхідно отримані значення перевести в частинні функції відгуку. Для цього може бути використана формула переходу:

$$d = \exp(-|y'|^n),$$

де d – частинна функція бажаності;

y' – значення, яке слід перетворити, обчислюється за формулою:

$$y' = \frac{2y - (y_{max} + y_{min})}{(y_{max} - y_{min})},$$

де y – виміряне значення;

y_{max} – максимальне значення;

y_{min} – мінімальне значення.

Показник ступеня можна обчислити задавши виміряному значенню відповідне значення бажаності, переважно в інтервалі, за формулою

$$n = \frac{\ln(\ln \frac{1}{d})}{\ln(y')}.$$

Знаючи граничні значення для кожного параметра (табл. 3) і обчислені значення можна перетворити їх в частинні функції бажаності. Після цього можна обчислити узагальнену функцію бажаності. Вона визначиться за формулою:

$$D_G = \sqrt[q]{\prod_{i=1}^q d_i},$$

де q – кількість частинних функцій бажаності;
 d_i – частинні функції бажаності.

Тоді узагальнений критерій бажаності очисного комбайна можна визначити за формулою:

$$D_G = \sqrt[4]{d_1 d_2 d_3 d_4},$$

де d_1 – частинна функція відгуку, отримана перерахунком корисної роботи W_{Ap} ;

d_2 – частинна функція відгуку, отримана перерахунком енерговитрат W'_{Ap} ;

d_3 – частинна функція відгуку, отримана перерахунком еталонної енергоємності H_{We} ;

d_4 – частинна функція відгуку, отримана від перерахунку ефективності процесу руйнування $\zeta_{эф}$.

В табл. 4 показано результати розрахунку узагальненої функції бажаності Харрінгтона для комбайну УКД-200.

Таблиця 4. Результати розрахунку узагальненої функції бажаності для комбайну УКД-200

m, м	W'_{Ap}	W_{Ap}	H_{We}	$\zeta_{эф}$	D_G
0,9	0,28	0,17	0,37	0,12	0,21
1,0	0,32	0,28	0,37	0,18	0,28
1,1	0,86	0,88	0,37	0,74	0,68
1,2	0,64	0,70	0,37	0,37	0,50
1,3	0,82	0,84	0,37	0,70	0,65

В табл. 5 наведені узагальнені значення критерію бажаності для комбайнів в залежності від потужності пласта.

Таблиця 5. Результати розрахунку узагальненої функції бажаності для комбайнів призначених для роботи на пластах малої потужності

Потужність пласта, м	Тип очисного комбайна			
	УКД400	CLS-450	УКД200	КА80
0,9	–	–	0,21	0,31
1,0	0,60	0,59	0,28	0,34
1,1	0,62	0,62	0,68	0,38
1,2	0,71	0,66	0,50	0,39
1,3	0,62	0,69	0,65	–
1,4	0,61	0,72	–	–

Як видно із табл. 5 на пластах малої потужності найбільш доцільно використовувати комбайни УКД-400 та CLS-450. Комбайни КА80, КА200 недоцільно використовувати через високий рівень енергетичних витрат.

Далі було проаналізовано доцільність експлуатації комбайнів призначених для роботи на пластах середньої потужності на пластах малої потужності.

В табл. 6 приведені характеристики процесу виймання для комбайнів РКУ10 та 1ГШ68 призначених для виймання пластів середньої потужності.

Таблиця 6. Результати розрахунку енергетичних характеристик комбайнів РКУ10 та 1ГШ68

Тип очисного комбайна	Параметр	Потужність пласта, м					
		1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1
РКУ10	$W_{Ар},$ кВтч/м ³	0,6096	0,3954	0,3035	0,2496	0,2966	–
	$H_{We},$ кВтч/м ³	0,08185	0,07680	0,0718	0,0712	0,06548	–
	$\zeta'_{эф}$	0,1300	0,1940	0,2370	0,2400	0,2620	–
1ГШ68	$W_{Ар},$ кВт·ч/м ³	–	–	0,2613	0,2103	0,1865	0,1863
	$H_{We},$ кВтч/м ³	–	–	0,7177	0,0692	0,0655	0,6044
	$\zeta'_{эф}$	–	–	0,27	0,33	0,35	0,36

Після розрахунку основних параметрів процесу виймання отримані значення порівнюються з еталонними та приводяться до безрозмірного вигляду у відповідності з методикою.

В табл. 7 наведені узагальнені значення критерію бажаності для комбайнів в залежності від потужності пласта.

Таблиця 7. Узагальнені значення критерію бажаності комбайнів в залежності від виймальної потужності

Потужність пласта, м	Тип очисного комбайна					
	УКД400	CLS-450	УКД200	КА80	ІГШ68	РКУ10
0,9	–	–	0,21	0,31	–	–
1,0	0,60	0,59	0,28	0,34	–	–
1,1	0,62	0,62	0,68	0,38	–	0,33
1,2	0,71	0,66	0,50	0,39	–	0,39
1,3	0,62	0,69	0,65	–	–	0,51
1,4	0,61	0,72	–	–	–	0,60
1,5	–	–	–	–	0,65	0,61
1,7	–	–	–	–	0,72	0,62
1,9	–	–	–	–	0,73	0,65
2,1	–	–	–	–	0,74	–
2,3	–	–	–	–	0,75	–

Як видно із наведеної таблиці експлуатація комбайнів призначених для роботи на пластах середньої потужності недоцільна на тонких пластах [18, 19]. Окрім цього, комбайн РКУ-10 має високі еталонні витрати на процес різання вугілля, тому при обґрунтуванні раціональної комплектації з використанням очисного комбайну РКУ10 варто аналізувати не тільки показники виймальної машини, але і конвеєру, механізованого кріплення [20, 21]. Аналогічна ситуація і для комбайнів КА80, КА200 – експлуатація може бути лише при потребі в вугіллі високої якості (із низькою зольністю).

Отримані нами результати дозволяють сформулювати рекомендації, щодо раціональної області застосування очисних комбайнів на шахтах Західного Донбасу (рис. 1).

Потужність пласта, м	Тип очисного комбайна											
	0,9	КА80, КА200		УКД200								
1,0	УКД400											
1,1												
1,2												
1,3	CLS-450			УКД400								
1,4	ПКУ10											
1,5							УКД400		CLS-450		ІГШ68	
1,7												
1,9												
2,1												
2,3												
Довжина очисного вибою	200	230	260	290	320	>320						

Рисунок 1. Раціональна область експлуатації очисних комбайнів в залежності від потужності пласта та довжини очисного вибою

Аналогічним чином, на основі критерію бажаності Харрінгтона можна розрахувати «функції бажаності» для вибійних конвеєрів, механізованих кріплень.

4. ВИСНОВКИ

В процесі виконання дослідження було розроблено новий підхід щодо обґрунтування області раціональної експлуатації очисного обладнання на основі дослідження енергетичних характеристик процесу різання вугілля різними типами виконавчих органів очисних комбайнів. Це дозволило отримати ряд результатів, які полягають в наступному:

1) Для дослідження ефективності процесу виймання вугілля очисними комбайнами запропоновано оцінювати корисну роботу обладнання. На основі попередніх досліджень встановлено, що в загальному балансі корисної роботи 81% припадає на різання вугілля, 18% на транспортування вугілля, 1% на підтримку покрівлі. Основними показниками процесу різання вугілля є: енергетичні витрати на виймання 1 м³ вугілля, еталонні витрати на виймання 1 м³ вугілля, відносна ефективність виймання.

2) Для якісної оцінки процесу виймання вугілля було застосовано узагальнений критерій бажаності Харрінгтона. Попередньо було порівняно методи багатокритеріальної оптимізації. Ідея полягає в тому, що оцінка виражається безрозмірною функцією бажаності, яку можна побудувати перетворенням вимірних значень «*u*» в безрозмірну шкалу бажаності «*d*». Шкала влаштована так, що найбільш кращим значенням відповідає більш висока оцінка функції бажаності. Отримане значення є характеристикою об'єкта, тобто відповідністю отриманого значення до необхідного (бажаного).

3) За результатами розрахунку енергетичних характеристик найбільш поширених очисних комбайнів встановлено, що на пластах малої потужності найбільш доцільно використовувати комбайни УКД-400 та CLS-450. Комбайни КА80, КА200 недоцільно використовувати через високий рівень енергетичних витрат. Експлуатація комбайнів призначених для роботи на пластах середньої потужності недоцільна на тонких пластах. Комбайн РКУ-10 має високі еталонні витрати на процес різання вугілля, тому при обґрунтуванні раціональної комплектації з використанням очисного комбайну РКУ10 варто аналізувати не тільки показники виймальної машини, але і конвеєру, механізованого кріплення. Аналогічна ситуація і для комбайнів КА80, КА200 – експлуатація може бути лише при потребі в вугіллі високої якості (із низькою зольністю). Отримані результати дозволили сформулювати рекомендації, щодо раціональної області застосування очисних комбайнів на шахтах Західного Донбасу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ma, S., Wang, Z., Yue, J., An, F., & Chen, H. (2024). Generation of cutting heat and simulation of core tube wall temperature during coring in primary structure coal seam. *Heliyon*, 10(14), e34207. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34207>
2. Chi, M., Tang, H., Liu, D., Wang, D., Dai, C., Zou, J., Gao, Q., & Feng, G. (2024). Study of hydraulic cutting as a method to prevent coal burst disasters. *Heliyon*, 10(10), e30679. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30679>
3. Wei, J., Liu, H., Xu, X., Liu, Y., Xie, P., & Gao, Y. (2024). Analysis of damage characteristics and influencing factors of coal cut by cutting tooth based on industrial CT technology. *Process Safety and Environmental Protection*, 184, 936–949. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.02.006>
4. Luo, C., Qiao, J., Zhou, J., Sun, Z., & Cao, J. (2022). Fold catastrophe analysis of constitutive model of pick cutting coal with rock. *Energy Reports*, 8, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.013>
5. Xu, J., Xu, H., Zhai, C., Cong, Y., Sang, S., Ranjith, P.G., Li, Q., Ding, X., Sun, Y., & Lai, Y. (2023). Surface relaxivity estimation of coals using the cutting grain packing method for coalbed methane reservoirs. *Powder Technology*, 427, 118768. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118768>
6. Yu, Y., Li, S., Hao, L., Xin, Q., Cheng, W., & Liu, D. (2024). Dynamic diffusion characteristics of airflow and coal dust during the mining process based on MRF: A numerical simulation study. *Powder Technology*, 448, 120313. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120313>
7. Geng, D., Fan, L., Du, Y., Zhu, Q., Li, T., & Zhao, J. (2024). Research on the mechanism and control of roof deformation in gob-side entry retaining of close-distance coal seams. *Engineering Failure Analysis*, 164, 108682. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108682>
8. Liu, Q., Li, Z., Wang, E., Wang, D., & Feng, X. (2024). Pressure-dependent characteristics of the diffusion coefficient during the gas desorption process in coal cuttings: Numerical modelling and analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 220, 125029. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125029>
9. Li, Y. (2024). Ideal quadratic nodal point in half-Heusler semimetal LaPtBi. *Materials Today Communications*, 41, 110445. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110445>

10. Wang, Q., Hu, G., Wang, S., Su, W., & Ye, W. (2024). Evaluating densification effect of ideal compaction grouting in unsaturated soils by volumetric water content. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, S1674775524003561. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.08.006>
11. Xiao, Y., Peng, W., & Wang, Y. (2024). In-situ NDT CT image restoration method for concrete based on deep learning by modeling non-ideal focal spot. *NDT & E International*, 142, 103018. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.103018>
12. Bouimouass, H., Fournou, A., Hamon, Y., & Chalikakis, K. (2024). A global analysis of nearshore and submarine springs: Spatial distribution, controlling factors, and probability of presence. *Science of The Total Environment*, 955, 177004. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177004>
13. Carlucci, L., & Lauria, M. (2021). Upper bounds on positional Paris–Harrington games. *Discrete Mathematics*, 344(3), 112257. <https://doi.org/10.1016/j.disc.2020.112257>
14. Lin, J., Zhang, S.X., Xu, Y.J., & Zheng, S.Y. (2024). A hypervolume fraction-based adaptive evolutionary algorithm for many-objective optimization and the application to electromagnetic device design. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 137, 109060. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109060>
15. Beck, J. (2002). Ramsey games. *Discrete Mathematics*, 249(1–3), 3–30. [https://doi.org/10.1016/S0012-365X\(01\)00224-2](https://doi.org/10.1016/S0012-365X(01)00224-2)
16. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Fomychova, L. (2020). Research into optimization model for balancing the technological flows at mining enterprises. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 201, p. 01030). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101030>
17. Salli, S., Pochepov, V., & Mamaykin, O. (2014). Theoretical aspects of the potential technological schemes evaluation and their susceptibility to innovations. In *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining* (pp. 491–496)
18. Khorolskyi, A.O. (2021). Naukovi osnovy obgruntuvannya mezh oblasti ratsionalnoho proiektuvannya pry vidpratsiuvanni rodovyshch korysnykh kopalyn. *Fyzyko-tekhnycheskye problemy hornoho proyzvodstva*, (23), 149–173. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.37101/ftpgp23.01.011>
19. Khorolskyi, A.O. (2022). Rezul'taty doslidzhen' iz rozrobky systemy pidtrymky pryunyattya rishen' dlya proyektuvannya protsesiv osvoyennya rodovyshch korysnykh kopalyn. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 2(51), 122–135. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-2-122-135> (in Ukrainian)
20. Грінюв В.Г., Хорольський А.О. (2022). Визначення доцільності відпрацювання родовищ на стадії передпроектних досліджень раціональної стратегії їх освоєння. *Мінеральні ресурси України*, №2, С. 12–17. <https://doi.org/10.31996/mru.2022.2.12-17>
21. Хорольський А.О. (2023). Проектування процесів освоєння родовищ корисних копалин на основі дослідження зміни стану запасів. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна»*, 1(29), 83–97. [https://doi.org/10.31474/2073-9575-2023-1\(29\)-83-97](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2023-1(29)-83-97)

REFERENCES

1. Ma, S., Wang, Z., Yue, J., An, F., & Chen, H. (2024). Generation of cutting heat and simulation of core tube wall temperature during coring in primary structure coal seam. *Heliyon*, 10(14), e34207. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34207>

2. Chi, M., Tang, H., Liu, D., Wang, D., Dai, C., Zou, J., Gao, Q., & Feng, G. (2024). Study of hydraulic cutting as a method to prevent coal burst disasters. *Heliyon*, 10(10), e30679. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30679>
3. Wei, J., Liu, H., Xu, X., Liu, Y., Xie, P., & Gao, Y. (2024). Analysis of damage characteristics and influencing factors of coal cut by cutting tooth based on industrial CT technology. *Process Safety and Environmental Protection*, 184, 936–949. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.02.006>
4. Luo, C., Qiao, J., Zhou, J., Sun, Z., & Cao, J. (2022). Fold catastrophe analysis of constitutive model of pick cutting coal with rock. *Energy Reports*, 8, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.013>
5. Xu, J., Xu, H., Zhai, C., Cong, Y., Sang, S., Ranjith, P.G., Li, Q., Ding, X., Sun, Y., & Lai, Y. (2023). Surface relaxivity estimation of coals using the cutting grain packing method for coalbed methane reservoirs. *Powder Technology*, 427, 118768. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118768>
6. Yu, Y., Li, S., Hao, L., Xin, Q., Cheng, W., & Liu, D. (2024). Dynamic diffusion characteristics of airflow and coal dust during the mining process based on MRF: A numerical simulation study. *Powder Technology*, 448, 120313. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120313>
7. Geng, D., Fan, L., Du, Y., Zhu, Q., Li, T., & Zhao, J. (2024). Research on the mechanism and control of roof deformation in gob-side entry retaining of close-distance coal seams. *Engineering Failure Analysis*, 164, 108682. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108682>
8. Liu, Q., Li, Z., Wang, E., Wang, D., & Feng, X. (2024). Pressure-dependent characteristics of the diffusion coefficient during the gas desorption process in coal cuttings: Numerical modelling and analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 220, 125029. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125029>
9. Li, Y. (2024). Ideal quadratic nodal point in half-Heusler semimetal LaPtBi. *Materials Today Communications*, 41, 110445. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110445>
10. Wang, Q., Hu, G., Wang, S., Su, W., & Ye, W. (2024). Evaluating densification effect of ideal compaction grouting in unsaturated soils by volumetric water content. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, S1674775524003561. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.08.006>
11. Xiao, Y., Peng, W., & Wang, Y. (2024). In-situ NDT CT image restoration method for concrete based on deep learning by modeling non-ideal focal spot. *NDT & E International*, 142, 103018. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.103018>
12. Bouimouass, H., Fournou, A., Hamon, Y., & Chalikakis, K. (2024). A global analysis of nearshore and submarine springs: Spatial distribution, controlling factors, and probability of presence. *Science of The Total Environment*, 955, 177004. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177004>
13. Carlucci, L., & Lauria, M. (2021). Upper bounds on positional Paris–Harrington games. *Discrete Mathematics*, 344(3), 112257. <https://doi.org/10.1016/j.disc.2020.112257>
14. Lin, J., Zhang, S.X., Xu, Y.J., & Zheng, S.Y. (2024). A hypervolume fraction-based adaptive evolutionary algorithm for many-objective optimization and the application to electromagnetic device design. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 137, 109060. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109060>
15. Beck, J. (2002). Ramsey games. *Discrete Mathematics*, 249(1–3), 3–30. [https://doi.org/10.1016/S0012-365X\(01\)00224-2](https://doi.org/10.1016/S0012-365X(01)00224-2)
16. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Fomychova, L. (2020). Research into optimization model for balancing the technological flows at mining enterprises. In

E3S Web of Conferences (Vol. 201, p. 01030). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101030>

17. Salli, S., Pochepov, V., & Mamaykin, O. (2014). Theoretical aspects of the potential technological schemes evaluation and their susceptibility to innovations. In *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining* (pp. 491-496)

18. Khorolskyi, A.O. (2021). Naukovi osnovy obgruntuvannia mezh oblasti ratsionalnoho proiektuvannia pry vidpratsiuvanni rodovyshch korysnykh kopalyn. *Fyzyko-tekhnycheskye problemy hornoho proyzvodstva*, (23), 149-173. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.37101/ftppg23.01.011>

19. Khorolskyi, A.O. (2022). Rezul'taty doslidzhen' iz rozrobky systemy pidtrymky pryunyattya rishen' dlya proiektuvannya protsesiv osvoyennya rodovyshch korysnykh kopalyn. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 2(51), 122-135. <https://doi.org/10.31474/1999 - 981X - 2022 - 2 - 122 - 135> (in Ukrainian)

20. Hrinov V.H., Khorolskyi A.O. (2022). Vyznachennya dotsil'nosti vidpratsiuvannya rodovyshch na stadiyi peredproiektnykh doslidzhen' ratsional'noyi stratehiyi yikh osvoyennya. *Mineralni resursy Ukrayiny*, №2, pp. 12-17. <https://doi.org/10.31996/mru.2022.2.12-17>

21. Khorolskyi A.O. (2023). Proiektuvannya protsesiv osvoyennya rodovyshch korysnykh kopalyn na osnovi doslidzhennya zminy stanu zapasiv. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya «Hirnycho-heolohichna»*, 1(29), 83-97. [https://doi.org/10.31474/2073-9575-2023-1\(29\)-83-97](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2023-1(29)-83-97)

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Розробити новий підхід щодо вибору раціональних параметрів експлуатації очисного обладнання на вугільних пластах малої та середньої потужності.

Методи дослідження. Для дослідження ефективності процесів виймання вугілля очисними комбайнами запропоновано оцінювати корисну роботу очисного обладнання, яка необхідна для руйнування вугілля (різання), транспортування гірської маси, підтримку виробленого простору. Основними показниками процесу різання вугілля є: енергетичні витрати на виймання 1 м куб. вугілля, еталонні витрати на виймання 1 м куб. вугілля, відносна ефективність виймання. На основі розрахунку кількісних показників процесу різання вугілля можна отримати граничні значення зміни енергетичних характеристик. Було розраховано енергетичні характеристики процесу різання вугілля в залежності від виймальної потужності пласта, схеми відпрацювання очисного вибою, типу системи переміщення очисного комбайну. Це дозволило отримати кількісні показники процесу видобутку вугілля механізованим способом. Для переводу кількісної оцінки в якісну запропоновано застосовувати метод багатокритеріальної оптимізації – узагальнений критерій бажаності Харрінгтона.

Результати. За результатами розрахунку енергетичних характеристик найбільш поширених очисних комбайнів встановлено, що на пластах малої потужності найбільш доцільно використовувати комбайни УКД-400 та CLS-450. Комбайни КА80, КА200 недоцільно використовувати через високий рівень енергетичних витрат. Експлуатація комбайнів призначених для роботи на пластах середньої потужності недоцільна на тонких пластах. Комбайн

РКУ-10 має високі еталонні витрати на процес різання вугілля, тому при обґрунтуванні раціональної комплектації з використанням очисного комбайну РКУ10 варто аналізувати не тільки показники виймальної машини, але і конвеєру, механізованого кріплення. Аналогічна ситуація і для комбайнів КА80, КА200 – експлуатація може бути лише при потребі в вугіллі високої якості (із низькою зольністю). Отримані результати дозволили сформулювати рекомендації, щодо раціональної області застосування очисних комбайнів на шахтах Західного Донбасу.

Наукова новизна. Створено новий підхід, щодо вибору раціональних параметрів експлуатації очисних комбайнів на пластах малої та середньої потужності. Отримані результати в подальшому можуть бути використані для вибору засобів транспортування вугілля, підтримки виробленого простору.

Практичне значення. Встановлено ефективні межі експлуатації очисних комбайнів для умов Західного Донбасу.

Ключові слова: енергетичні характеристики, видобуток вугілля, критерій бажаності Харрінгтона, раціональна область експлуатації, частинна функція.

ABOUT AUTHORS

Khorolskyi Andrii, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of the Department of Field Development Problems, Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics the National Academy of Sciences of Ukraine (BPMP IGTM, NAS of Ukraine), 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: andreykh918@gmail.com.

Pochepov Viktor, Candidate of Technical Science, Dnipro University of Technology, Professor of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: pochepov.v.m@nmu.one.

Zabolotna Yuliia, Candidate of Technical Science, Dnipro University of Technology, Associate Professor of Department of Geodesy, 19 Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: department1geodesy@gmail.com.

Mediannyk Volodymyr, Candidate of Technical Science, Dnipro University of Technology, Associate Professor of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: Mediannyk.v.yu@nmu.one.

Lapko Viktor, Dnipro University of Technology, Senior Lecturer of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: lapko.v.v@nmu.one

Korobkov Serhii, Dnipro University of Technology, Researcher, 19 Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: mamaykin@yahoo.com.

Mamaikin Oleksandr, Candidate of Technical Science, Dnipro University of Technology, Associate Professor of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: mamaykin@yahoo.com.