

классической задачи Эйлера о скольжении гибкого тела по неподвижному блоку и накопленным данным практики.

Список литературы

1. Біліченко М.Я. Основи теорії та розрахунки засобів транспортування вантажів шахт: Навч. посібник / Біліченко М.Я. – Дніпропетровськ: Національна гірнична академія України, 2002. – 103 с.
2. РТМ 24.093.04-80. Проектирование стационарных ленточных конвейеров общего назначения. - 1980.
3. З Андреев А.В. Передача трением / Андреев А.В. – М.: Машгиз, 1978. – 176 с.
4. Лубенец Н.А. Альтернативный формуле Эйлера закон реализации тягового усилия трением / Лубенец Н.А. // Науковий вісник НГУ. – Днепропетровск, 2008. – № 11.- С. 67 – 70.
5. Лубенец Н.А. Влияние центробежных сил гибкого тела на реализацию тягового усилия трением. / Лубенец Н.А., Лубенец Т.Н. // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ, 2012. - № 5. – С. 28 – 33.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Ширінім Л.Н.  
Надійшло до редакції 21.10.2014*

УДК 622.232.72:004.942

© А.В. Бубликов, П.Ю. Огєєнко

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ ГІРНИЧИХ МАШИН ОЧИСНОГО МЕХАНІЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИДОБУТКУ ВУГІЛЛЯ**

У статті пропонується класифікація технологічних взаємозв'язків гірничих машин та їх зв'язків зі зовнішнім середовищем. Розкриваються особливості врахування цих зв'язків за умови створення комплексної моделі очисного механізованого комплексу. Проведені дослідження технологічних зв'язків видобувного комбайну зі зовнішнім середовищем.

В статье предлагается классификация технологических взаимосвязей горных машин и их связей с внешней средой. Раскрываются особенности учета этих связей при создании комплексной модели добычного механизированного комплекса. Проведены исследования технологических связей добычного комбайна с внешней средой.

The classification of technological connections between the coal machines and their connections with environment is proposed in the article. The features of accounting of these connections during creation of model of mining mechanized complex are discovered. The technological connections between shearer and environment are investigated.

**Вступ.** Шахтні підприємства є одними з найбільших споживачів електроенергії в Україні. За рік шахтне підприємство може споживати від 200000 до 300000 тис. кВт·год. В контексті цієї інформації той факт, що Україна витрачає на тонну видобутого вугілля в декілька разів більше електроенергії, ніж розвинуті країни, є дуже гострим питанням.

Очисні механізовані комплекси (ОМК) – одні з найбільш енергоємних шахтних об'єктів, на які приходиться біля 15% від загальної кількості споживаної електроенергії шахтним підприємством. Машини ОМК нового покоління, що застосовуються для підземного видобутку вугілля на шахтах, відрізняються наявністю дуже тісних технологічних взаємозв'язків, які, щонайменш, на 50 % визначають ефективність процесу видобутку вугілля. Тобто, існує значний резерв щодо підвищення ефективності процесу видобутку вугілля у вибої за рахунок дослідження й вдосконалення саме технологічних взаємозв'язків гірничих машин ОМК.

**Останні досягнення.** Дослідження щодо використання саме взаємозв'язків гірничих машин для підвищення ефективності роботи ОМК почалися ще з 2005 року спеціалістами науково-дослідного інституту «Дондівуглемаш» та Донецького національного технічного університету [2,3]. Була запропонована концепція проектування гірничих машин з урахуванням особливостей технологічних взаємозв'язків гірничих машин та конструктивні рішення на основі цієї концепції [2,3]. Але рішення в основному були направлені на поліпшення конструктивних вузлів гірничих машин, в той час, як інформативна компонента ОМК створювалась практично без врахування взаємозв'язків гірничих машин. Тому у даній статті обґрунтовуються та досліджуються деякі технологічні зв'язки машин ОМК (зв'язок видобувного комбайна зі зовнішнім середовищем) з метою вдосконалення інформативної компоненти видобувного комбайна для підвищення ефективності процесу видобутку вугілля в забої за допомогою ОМК.

**Викладання основного матеріалу досліджень.** Можна виділити два узагальнені види технологічних взаємозв'язків гірничих машин ОМК – функціональні взаємозв'язки та конструктивні. Функціональні взаємозв'язки виражаються у залежності режимів роботи гірничої машини від режимів роботи інших гірничих машин ОМК. Наприклад, пересунення секції механізованого кріплення повинно відбуватися за умови відсутності поблизу струга або видобувного комбайна. Ще один приклад – обмеження швидкості переміщення видобувного комбайна за умови недостатньої транспортної продуктивності забійного конвеєра. Як бачимо з прикладів, функціональні взаємозв'язки гірничих машин ОМК можуть бути зумовлені технікою безпеки або технологією видобутку вугілля у вибої. На рис. 1 функціональні взаємозв'язки показані стрілками без заливки.

Конструктивні взаємозв'язки гірничих машин ОМК виражаються у присутності спеціальних конструктивних рішень для забезпечення необхідних кінематичних зв'язків між машинами ОМК. Прикладом конструктивного взаємозв'язку видобувного комбайну та забійного конвеєра є рушій підсистеми подачі видобувного комбайна разом з жорстким тяговим органом на базі цівкових рейок. Ще одним прикладом є опорні та захватні механізми видобувних комбайнів та стругів разом з направляючими рейками на навісному обладнанні забійного конвеєра. Як бачимо з прикладів, конструктивні взаємозв'язки гірничих машин ОМК зумовлені виключно конструктивними рішеннями при створенні гірничих машин. Причому, ці конструктивні рішення направлені для створення нових або вдосконалення іс-

нуючих кінематичних зв'язків між гірничими машинами ОМК з метою поліпшення його технічних характеристик. На рис.1 конструктивні взаємозв'язки гірничих машин ОМК показані стрілками з заливкою.

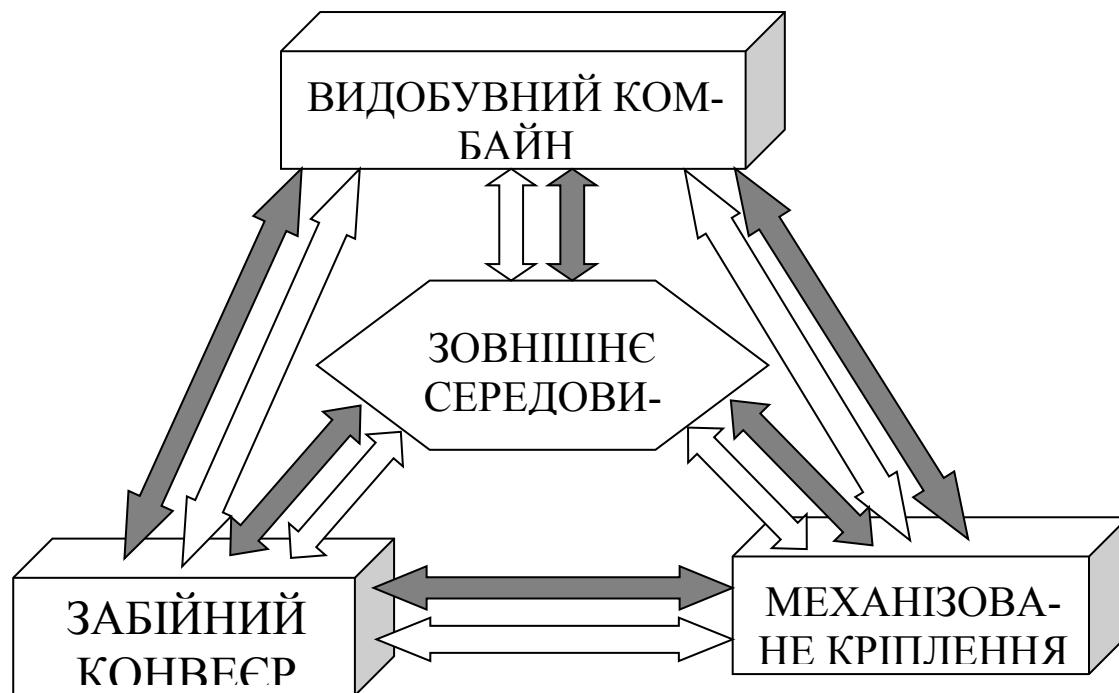


Рис.1. Структурна схема технологічних взаємозв'язків машин очисного механізованого комплексу

Відмітимо, що іноді вдосконалення конструктивних взаємозв'язків гірничих машин неможливе без введення нового функціонального зв'язку між ними. Наприклад, введення жорстких тягових органів у складі підсистем подачі видобувних комбайнів призвело до появи вимоги щодо синхронізації обертання приводних зірочок рушіїв підсистем подачі комбайна, невиконання якої викликало зменшення ККД підсистеми подачі майже у два рази.

Конструктивні та функціональні зв'язки, що суттєво впливають на ефективність процесу видобутку вугілля у вибої, присутні не тільки між машинами ОМК, а й між ними та зовнішнім середовищем. Вони також показані на рис.1 у вигляді стрілок з заливкою (конструктивні зв'язки) та без заливки (функціональні зв'язки). Як і у випадку зі взаємозв'язками між гірничими машинами, функціональний зв'язок між гірничою машиною та зовнішнім середовищем виражається через вплив зовнішнього середовища на режим роботи гірничої машини. Наприклад, підвищення кріпості вугілля викликає зменшення швидкості подачі комбайна або струга. Відмітимо, що такий вплив може бути зворотний, тобто гірничі машини можуть впливати на зовнішнє середовище на функціональному рівні. Цей вплив може виражатися через зміну гірничо-геологічних характеристик вугільного пласту через певний режим роботи гірничої машини, що, у свою чергу, призведе до зміни режимів роботи інших гірничих машин ОМК у наступні моменти часу. Явним прикладом виступає вплив режиму роботи ме-

ханізованого кріплення на таке явище, як віджимання вугілля у призабійній частині груді забою. Якщо явище віджимання вугілля явно виражене, з часом це призведе до послаблення кріпості вугілля, появи тріщин у вугільному масиві (позитивний ефект) та порушення цілісності безпосередньої покрівлі (негативний ефект). Це, у свою чергу, призведе до зміни режимів роботи видобувного комбайну або струга та механізованого кріплення.

Що стосується конструктивних зв'язків гірничих машин із зовнішнім середовищем, то вони проявляються через формування навантаження на силових виконавчих пристроях машин (вплив зовнішнього середовища на гірничу машину). Прикладом є сила реакції вугільного масиву на притиснення поставу конвеєра до груді забою штовхачами секцій механізованого кріплення за умови виїмки вугілля стругом. Зворотний конструктивний вплив гірничої машини на зовнішнє середовище також можливий, хоч і менш розповсюджений. Він виражається через зміну властивостей зовнішньої середовища у фізичній площині за умови певного режиму роботи гірничої машини. Зміна властивостей зовнішньої середовища саме у фізичній площині пояснюється тим, що взаємозв'язок гірничої машини з зовнішнім середовищем відбувається у багатьох випадках через фізичні процеси та фізичні величини. Прикладом такого нетипового зворотного зв'язку гірничої машини і зовнішнього середовища на конструктивному рівні є накопичення кінетичної енергії у маси вугілля, що транспортується забійним конвеєром.

У контексті вирішуваної задачі підвищення енергоефективності видобутку вугілля комбайном за рахунок вдосконалення його інформативної компоненти нас насамперед цікавлять конструктивні технологічні зв'язки видобувного комбайна з іншими гірничими машинами та зовнішнім середовищем.

У даному підрозділі проведемо дослідження конструктивних технологічних зв'язків видобувного комбайну (рис.2) з вугільним масивом (через шнековий виконавчий орган) та з забійним конвеєром (через опорні механізми).

Конструктивний технологічний зв'язок видобувного комбайну з вугільним масивом відбувається через момент опору на шнековому виконавчому органі, який розраховується за формулою

$$M_{в.о.}(t) = M_{різ.}(t) + M_{нав.}(t), \text{ Н} \cdot \text{м} ,$$

де  $M_{в.о.}$  – момент опору на виконавчому органі видобувного комбайну, Н·м;  $M_{різ.}$  – складова моменту опору на виконавчому органі видобувного комбайну, що формується за умови різання вугільного масиву різцями, Н·м;  $M_{нав.}$  – складова моменту опору на виконавчому органі видобувного комбайну, що формується за умови транспортування та навантаження вугілля лопатами шнека, Н·м.

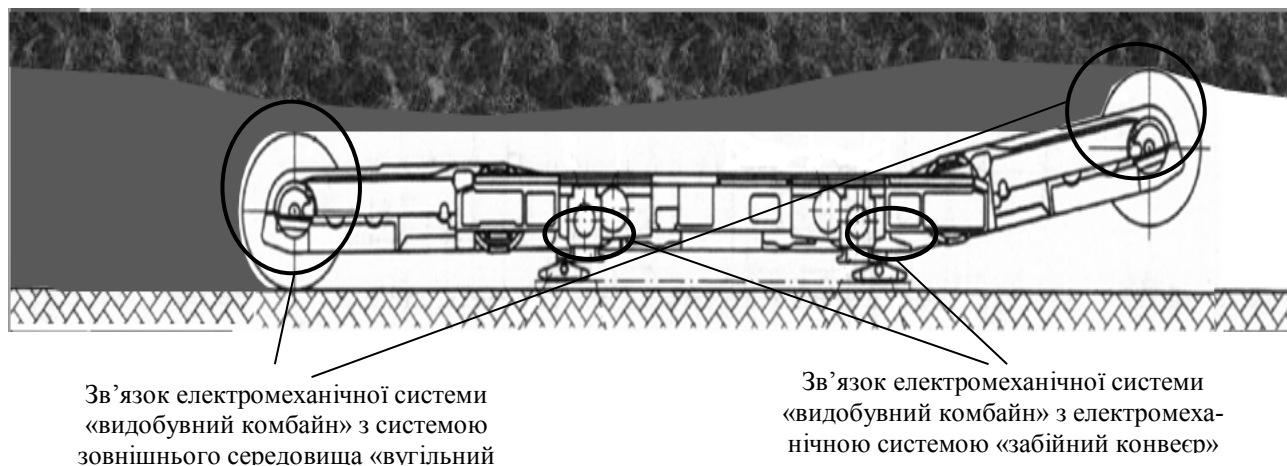


Рис. 2. Кінематичні зв'язки електромеханічної системи «видобувний комбайн» з іншими технологічними системами

У складовій моменту опору на виконавчому органі комбайна  $M_{різ.}$ , що пов'язана із різанням вугілля, також можна виділити декілька складових – високочастотну  $M_{різ.в-ч}$  та низькочастотну  $M_{різ.н-ч}$ . Високочастотні коливання моменту різання  $M_{різ.}$  мають місце внаслідок нерівномірності розподілу міцності вугілля в перетині пачки вугілля, що знімається виконавчим органом, а також через особливість фізичної природи процесу взаємодії різця з вугільним масивом. Результати численних досліджень статистичної динаміки вугільного комбайна показали, що високочастотна складова моменту різання  $M_{різ.в-ч}$  змінюється випадковим чином та описується автокореляційною функцією виду:

$$P_{\epsilon}(\tau) = D_{\epsilon,1} \cdot e^{-\alpha_{\epsilon,1} \cdot \tau} + D_{\epsilon,2} \cdot e^{-\alpha_{\epsilon,2} \cdot \tau} \cdot \cos(\beta_{\epsilon} \cdot \tau),$$

де  $\alpha_{\epsilon,1}, \alpha_{\epsilon,2}$  – параметри згасання,  $c^{-1}$ ;  $\beta_{\epsilon}$  – переважна частота коливань,  $c^{-1}$ ;  $D_{\epsilon,1}$  і  $D_{\epsilon,2}$  – дисперсії відповідно експонентної й експонентно-косинусної складових автокореляційної функції. Значення перерахованих параметрів автокореляційної функції є функціями середньої сили різання на одиночному різці  $\bar{Z}_p$ , що розраховується за спеціально розробленою методикою [1]. Дисперсія високочастотної складової моменту різання на виконавчому органі  $M_{різ.в-ч}$  визначається по формулі

$$D_{\epsilon}(\bar{Z}_p) = ((0,56 \cdot \bar{Z}_p + 50) \cdot \sqrt{n_{p,p}} \cdot 0,5 \cdot D)^2, \text{ (Н}\cdot\text{м)}^2,$$

де  $D$  – діаметр виконавчого органа по різцях, м;  $n_{p,p}$  – число одночасно ріжучих різців.

Низькочастотна складова моменту різання  $M_{різ.н-ч}$  також залежить від сили різання на одиночному різці:

$$M_{\text{різ.н-ч}}(\bar{Z}_p) = 0,5 \cdot D \cdot \sum_{i=1}^{n_{p.p}} \bar{Z}_{p.i}, \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Таким чином, саме через середню силу різання на одиночному різці  $\bar{Z}_p$  зовнішнє середовище впливає на момент різання на виконавчому органі видобувного комбайна, оскільки у методиці розрахунку даного параметру враховується одразу декілька фізичних характеристик вугільного масиву [1]. Майже усі фізичні характеристики вугільного масиву змінюються повільно у часі та можуть бути прийнятими незмінними на невеликому проміжку часу, окрім однієї – опірності вугілля різанню. Тому, для встановлення динамічного конструктивного технологічного зв'язку між комбайном та зовнішнім середовищем, проведемо дослідження впливу опірності вугілля різанню  $A$  на середню силу різання на виконавчому органі  $Z$ , що зв'язана з середньою силою різання на одиночному різці аналітичним виразом

$$Z = \sum_{i=1}^{n_{p.p}} \bar{Z}_{p.i}, \text{ Н} \cdot \text{м}$$

За основу при проведенні дослідження візьмемо відому енергетичну характеристику видобувного комбайна, що показана на рис.3, на якій видно, що середнє значення моменту різання на виконавчому органі, крім опірності вугілля різанню, залежить також від швидкості подачі комбайна.

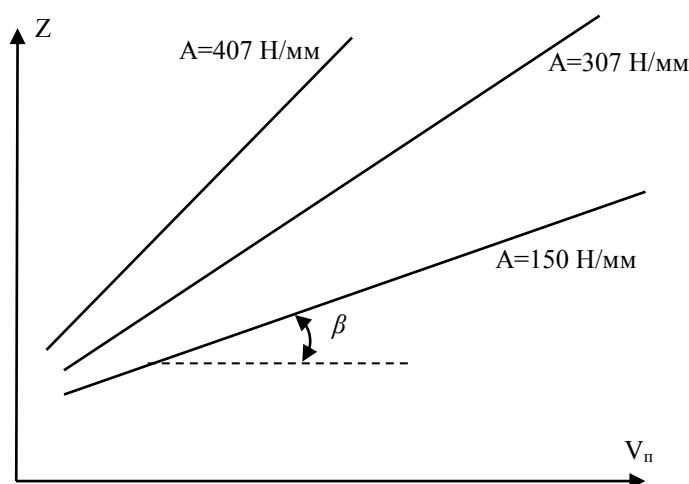


Рис. 3. Енергетична характеристика видобувного комбайна

Середня сила різання вугілля на виконавчому органі  $Z$ , від якої прямо пропорційно залежить момент різання на виконавчому органі, також прямо пропорційно залежить від швидкості подачі комбайна  $V_n$ . Але при зміні опірності вугілля різанню  $A$  змінюється кут нахилу  $\beta$  цієї залежності (рис.3). Тільки знаючи тангенс кута  $\beta$  можна визначити силу різання  $Z$  та, відповідно, момент

опору на виконавчому органі через швидкість подачі комбайна. Таким чином, стоїть задача встановлення залежності між кутом нахилу  $\beta$  енергетичної характеристики, що показана на рис.3, та опірністю вугілля різанню. Для рішення цієї задачі використовуються дані (табл.1), що отримані в ході випробувань видобувного комбайна УКД300 в реальних умовах на шахті «Павлоградська».

Таблиця 1

Експериментальні значення середньої сили різання на виконавчому органі комбайна при різних швидкостях подачі

$V_n$ , м/хв	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Опірність вугілля різанню $A=407$ Н/мм									
Z, кН	7,497	12,86	23,63	30,32	34,36	38,43	43,79	46,36	47,93
Опірність вугілля різанню $A=350$ Н/мм									
Z, кН	6,243	11,99	19,35	25,91	30,4	33,67	36,72	39,18	41,54
Опірність вугілля різанню $A=300$ Н/мм									
Z, кН	5,384	10,26	16,68	22,35	25,89	28,9	31,24	33,81	35,17
Опірність вугілля різанню $A=250$ Н/мм									
Z, кН	4,47	8,56	13,87	18,4	21,83	24,19	26,36	28,12	29,9
Опірність вугілля різанню $A=200$ Н/мм									
Z, кН	3,57	6,87	11,15	14,7	17,6	19,59	20,94	22,6	23,87
Опірність вугілля різанню $A=150$ Н/мм									
Z, кН	2,63	5,11	8,41	11,2	13,34	14,46	15,8	17	17,69

Отримаємо для залежності середньої сили різання  $Z$  від швидкості подачі комбайна  $V_n$  при опірності вугілля різанню  $A=407$  Н/мм рівняння лінійної регресії з нульовою константою. Для цього використаємо програму “Progr\_1\_mcd”, написану в математичному пакеті MathCad.

Progr\_1\_mcd. Визначення коефіцієнта рівняння лінійної регресії та коефіцієнта кореляції для залежності  $Z(V_n)$  при  $A = 407$  Н/мм

Значення  $Z$  для різних  $V_n$  при  $A = 407$ :

$v_0 := 1$	$Z_{407_0} := 7.497 \times 10^3$
$v_1 := 1.5$	$Z_{407_1} := 1.286 \times 10^4$
$v_2 := 2$	$Z_{407_2} := 2.363 \times 10^4$
$v_3 := 2.5$	$Z_{407_3} := 3.032 \times 10^4$
$v_4 := 3$	$Z_{407_4} := 3.436 \times 10^4$
$v_5 := 3.5$	$Z_{407_5} := 3.843 \times 10^4$
$v_6 := 4$	$Z_{407_6} := 4.379 \times 10^4$
$v_7 := 4.5$	$Z_{407_7} := 4.636 \times 10^4$
$v_8 := 5$	$Z_{407_8} := 4.793 \times 10^4$

Коефіцієнт рівняння лінійної регресії для залежності  $Z$  ( $V_n$ ) при  $A = 407$ :

$$b_Z := \text{slope}(v, Z_{407}) \quad b_Z = 1.036 \times 10^4$$

$$V_n := 0, 0.1.. 5$$

Задамо рівняння лінійної регресії:

$$Z_{407\_teor}(V_n) := b_Z \cdot V_n$$

Обчислимо коефіцієнт кореляції між  $Z$  та  $V_n$  при  $A = 407$ :

$$K\_kor\_407 := \text{corr}(v, Z_{407}) \quad K\_kor\_407 = 0.977$$

Результатом виконання програми “Progr\_1\_mcd” є значення тангенсу кута нахилу  $\beta$  енергетичної характеристики комбайна (рис.3) для опірності вугілля різанню 407 Н/мм ( $tg(\beta)=10360$  Н·хв/м). Справедливість саме лінійної регресії підтверджується значенням коефіцієнта кореляції для залежності середньої сили різання від швидкості подачі, що майже дорівнює одиниці.

Також результатом виконання програми “Progr\_1\_mcd” є нижченаведений графік рівняння лінійної регресії (суцільна лінія на рис.4) для залежності середньої сили різання на виконавчому органі (ВО) від швидкості подачі разом з експериментальними даними (показані маркерами у вигляді кіл на рис.4).

Нижче у табл.2 наведені результати статистичної обробки експериментальних залежностей середньої сили різання на ВО від швидкості подачі для інших опірностей вугілля різанню за допомогою програми “Progr\_1\_mcd”.



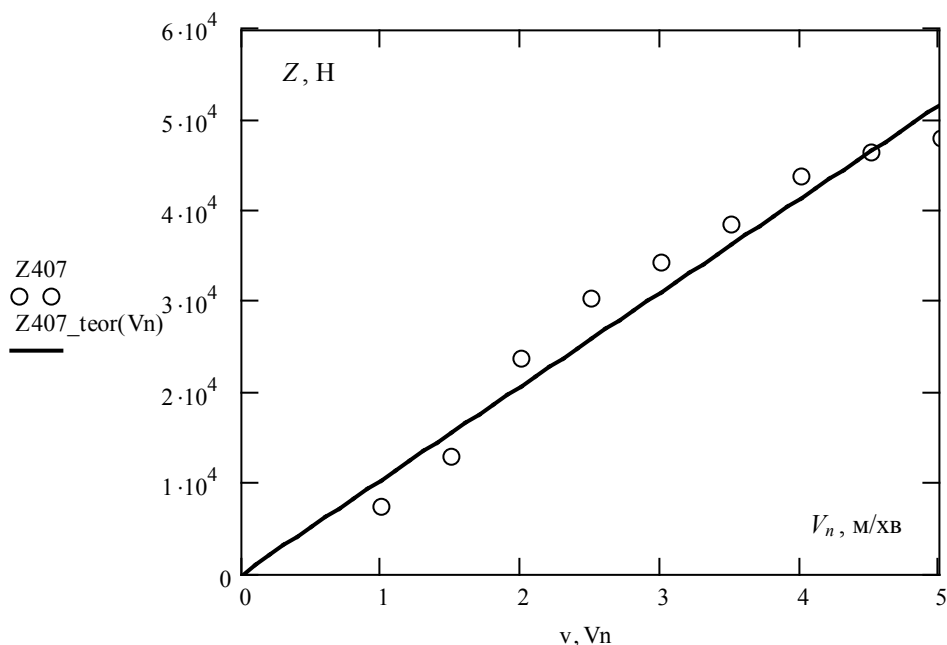


Рис. 4. Експериментальна та теоретична залежність середньої сили різання на ВО від швидкості подачі при опірності вугілля різанню 407 Н/мм

Таблиця 2

Результати статистичної обробки експериментальних залежностей середньої сили різання на ВО від швидкості подачі

Опірність вугілля різанню, Н/мм	Коефіцієнт рівняння лінійної регресії $b_Z$ для залежності $Z(V_n)$ , Н·хв/м	Коефіцієнт кореляції між $Z$ та $V_n$
150	3785	0,974
200	5081	0,977
250	6332	0,976
300	7508	0,978
350	8845	0,975
407	10360	0,977

На основі даних, що наведені в табл.2, визначимо коефіцієнт рівняння лінійної регресії та коефіцієнт кореляції для залежності тангенсу кута нахилу  $\beta$  енергетичної характеристики комбайна (рис.3) від опірності вугілля різанню. Для цього використаємо програму “Progr\_2\_mcd”.

Progr\_2\_mcd. Визначення коефіцієнта рівняння лінійної регресії та коефіцієнта кореляції для залежності коефіцієнтів  $b_Z$  від опірності вугілля

Значення коефіцієнтів рівнянь лінійної регресії для залежностей  $Z$  від  $V_n$  при відповідних значеннях опірності вугілля різанню:

$$A_0 := 150 \quad b_{Z_0} := 3.785 \times 10^3$$

$$A_1 := 200 \quad b_{Z_1} := 5.081 \times 10^3$$

$$A_2 := 250 \quad b_{Z_2} := 6.332 \times 10^3$$

$$A_3 := 300 \quad b_{Z_3} := 7.508 \times 10^3$$

$$A_4 := 350 \quad b_{Z_4} := 8.845 \times 10^3$$

$$A_5 := 407 \quad b_{Z_5} := 1.036 \times 10^4$$

Коефіцієнт рівняння лінійної регресії для залежності  $b_Z(A)$  :

$$B_Z := \text{slope}(A, b_Z) \quad B_Z = 25.41$$

$$A_y := 0, 0.1.. 410$$

Задамо рівняння лінійної регресії:

$$B_{Z\_teor}(A_y) := B_Z \cdot A_y$$

Обчислимо коефіцієнт кореляції між  $b_Z$  та  $A$  :

$$K_{kor\_Z} := \text{corr}(A, b_Z) \quad K_{kor\_Z} = 1$$

Зробимо перехід від середньої сили різання на ВО до моменту опору на ВО по відношенню до коефіцієнта рівняння лінійної регресії  $B_Z$  (діаметр ВО по зубкам дорівнює 0,9 м):

$$B_M := B_Z \cdot 0.45 \cdot 0.001 \quad B_M = 0.011$$

Як результат виконання програми “Progr\_2\_mcd” нижче отриманий графік рівняння лінійної регресії (суцільна лінія на рис.5) для залежності коефіцієнтів  $b_Z$  від опірності вугілля різанню разом з результатами статистичної обробки експериментальних залежностей середньої сили різання на ВО від швидкості подачі (показані маркерами у вигляді кіл на рис.5).

Також за результатами виконання програми “Progr\_2\_mcd” можна зробити висновок, що для комбайна УКД300 в умовах шахти «Павлоградська» відношення між середнім моментом різання на виконавчому органі та швидкістю подачі є лінійною функцією опірності вугілля різанню:

$$\frac{M_{piz.}}{V_n} = 0,5 \cdot D \cdot \frac{tg(\beta)}{1000} = 0,5 \cdot D \cdot \frac{25,41 \cdot A}{1000} = 0,011 \cdot A, \text{ кН} \cdot \text{хв.}$$

Правильність висновку підтверджується тим, що коефіцієнт кореляції для залежності тангенсу кута нахилу  $\beta$  енергетичної характеристики комбайна від опірності вугілля різанню дорівнює одиниці. Це означає лінійну залежність між цими двома величинами.

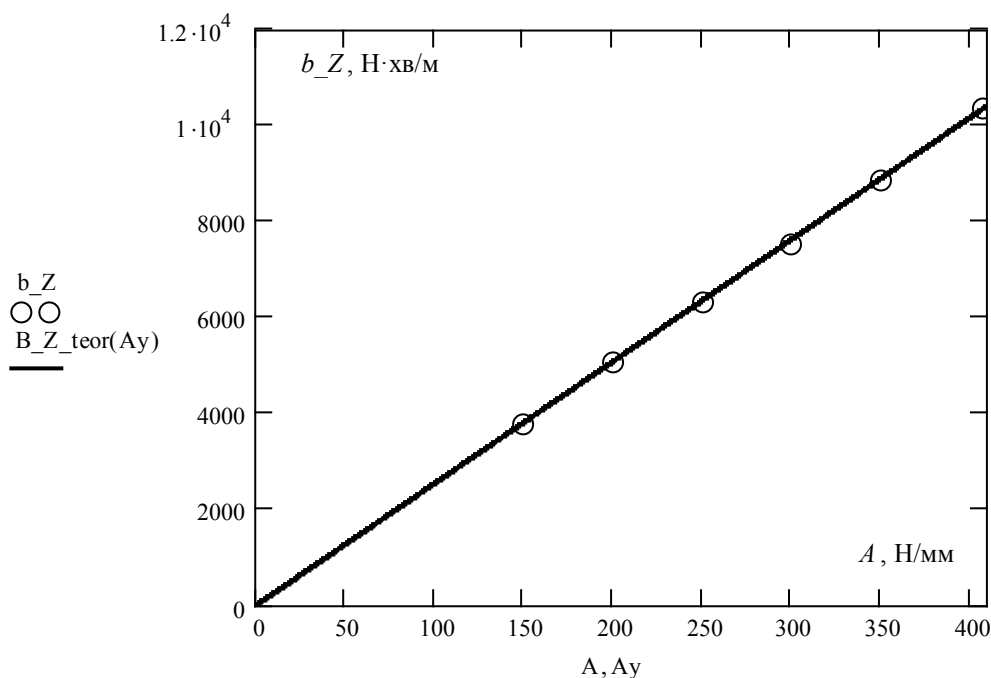


Рис. 5. Графік рівняння лінійної регресії (суцільна лінія) для залежності коефіцієнтів  $b_Z$  від опірності вугілля різанню  $A$  разом із значеннями коефіцієнтів  $b_Z$  (маркери) як результатами статистичного аналізу

Конструктивний технологічний зв'язок видобувного комбайну з забійним конвеєром відбувається через момент опору на приводній зірочці рушія приводу подачі. Навантаження на приводній зірочці рушія приводу подачі видобувного комбайна має складну природу. З однієї сторони, в динаміці моменту опору  $M_{o.n}$  на приводній зірочці рушія привода подачі присутня випадкова складова, що пов'язана зі складною зміною сили тертя  $F_{mp}$  між опорними елементами комбайна та поверхнями конструктивних елементів конвеєра, по яким він переміщується (конструктивний технологічний взаємозв'язок комбайна та конвеєра). З другої сторони, в динаміці моменту опору  $M_{o.n}$  є випадкова складова, яка зумовлена реакцією вугільного масиву на руйнування виконавчим органом (вплив зовнішнього середовища на видобувний комбайн).

Крім того, в динаміці моменту опору  $M_{o.n}$  на приводній зірочці рушія спостерігається високочастотна періодична складова  $M_{в-ч}$  із-за особливості процесу зачеплення зубців приводної зірочки рушія за цівки рейкового тягового органу (конструктивний технологічний взаємозв'язок комбайна та конвеєра).

Таким чином, формула для розрахунку моменту опору  $M_{o.n}$  на приводній зірочці рушія буде такою:

$$M_{o.n} = r_3 \cdot (F_{mp} + Y \pm F_m) + J \frac{dV_n}{dt} + M_{\theta-\psi} =$$

$$= r_3 \cdot (F_{mp} + \frac{m_k}{2} \cdot g \cdot \cos(\alpha_{nl}) \cdot k_{cm} + Y \pm \frac{m_k}{2} \cdot g \cdot \sin(\alpha_{nl})) + J \frac{dV_n}{dt} + M_{\theta-\psi}, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння ( $9,8 \text{ м/с}^2$ );  $\alpha_{nl}$  – кут нахилу вугільного пласта по простяганню (18 град.);  $k_{cm}$  – коефіцієнт тертя ковзання сталь/сталь (є змінною величиною з середнім значенням 0,15);  $r_3$  – радіус приводної зірочки рушія комбайна (0,15 м);  $m_k$  – маса комбайна (18000 кг);  $F_m$  – сила тяжіння комбайна, Н;  $Y$  – середня сила опору подачі комбайна зі сторони вугільного масиву, Н;  $J$  – механічний момент інерції комбайна,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $V_n$  – швидкість подачі комбайна,  $\text{м/с}$ .

На комбайні встановлено два приводи подачі, тому, якщо припустити рівномірність розподілу між ними зусиль на переміщення комбайна, маса комбайна повинна ділитися на два. Силу тяжіння комбайна  $F_m$  беремо зі знаком плюс для випадку переміщення комбайна знизу вгору.

Конструктивний технологічний взаємозв'язок комбайна та конвеєра у формулі розрахунку моменту опору  $M_{o.n}$  на приводній зірочці рушія враховується через такі фізичні величини, як коефіцієнт тертя ковзання сталь/сталь  $k_{cm}$  та високочастотна періодична складова  $M_{\theta-\psi}$ .

Вплив зовнішнього середовища на видобувний комбайн враховується через середню силу опору подачі комбайна  $Y$  зі сторони вугільного масиву. Проведемо дослідження конструктивного технологічного зв'язку між зовнішнім середовищем та видобувним комбайном через моменту опору  $M_{o.n}$  на приводній зірочці рушія приводу подачі.

Таблиця 3

Експериментальні значення середньої сили опору подачі комбайна при різних швидкостях подачі

$V_n$ , м/хв	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Опірність вугілля різанню $A=407 \text{ Н/мм}$									
$Y$ , кН	5,108	9,7	15,84	21,19	24,75	27,6	29,95	31,75	33,55
Опірність вугілля різанню $A=350 \text{ Н/мм}$									
$Y$ , кН	4,37	8,36	13,57	18,2	21,27	23,55	25,7	27,4	29,1
Опірність вугілля різанню $A=300 \text{ Н/мм}$									
$Y$ , кН	3,777	7,155	11,7	15,65	18,1	20,25	21,85	23,65	24,6
Опірність вугілля різанню $A=250 \text{ Н/мм}$									
$Y$ , кН	3,13	5,95	9,74	12,92	15,25	16,9	18,44	19,72	20,7
Опірність вугілля різанню $A=200 \text{ Н/мм}$									
$Y$ , кН	2,5	4,775	7,8	10,3	12,25	13,67	14,6	15,75	16,7
Опірність вугілля різанню $A=150 \text{ Н/мм}$									
$Y$ , кН	1,875	3,58	5,86	7,8	9,3	10,1	11	11,92	12,35

Середня сила опору подачі комбайна  $Y$  зі сторони вугільного масиву залежить від швидкості подачі комбайна. Але ця залежність, як і у випадку з силою різання вугілля, міняється при зміні опірності вугілля різанню. Тому в цьому підрозділі стоїть задача встановлення залежності коефіцієнтів пропорційності між силою опору подачі комбайна  $Y$  та швидкістю подачі від опірності вугілля різанню  $A$ . Для рішення цієї задачі використовуються дані (табл.3), що отримані в ході випробувань видобувного комбайна УКД300 в реальних умовах на шахті «Павлоградська».

Отримаємо для залежності середньої сили опору подачі  $Y$  від швидкості подачі комбайна  $V_n$  при опірності вугілля різанню  $A=407$  Н/мм рівняння лінійної регресії з нульовою константою. Для цього використаємо програму “Progr\_3\_mcd”, написану в математичному пакеті MathCad.

Progr\_3\_mcd. Визначення коефіцієнта рівняння лінійної регресії та коефіцієнта кореляції для залежності  $Y(V_n)$  при  $A = 407$  Н/мм

**Значення  $Y_n$  для різних  $V_n$  при  $A = 407$ :**

$$v_0 := 1 \quad Y_{407_0} := 5.108 \times 10^3$$

$$v_1 := 1.5 \quad Y_{407_1} := 9.7 \times 10^3$$

$$v_2 := 2 \quad Y_{407_2} := 1.584 \times 10^4$$

$$v_3 := 2.5 \quad Y_{407_3} := 2.119 \times 10^4$$

$$v_4 := 3 \quad Y_{407_4} := 2.475 \times 10^4$$

$$v_5 := 3.5 \quad Y_{407_5} := 2.76 \times 10^4$$

$$v_6 := 4 \quad Y_{407_6} := 2.995 \times 10^4$$

$$v_7 := 4.5 \quad Y_{407_7} := 3.175 \times 10^4$$

$$v_8 := 5 \quad Y_{407_8} := 3.355 \times 10^4$$

**Коефіцієнт рівняння лінійної регресії для залежності  $Y_n$  ( $V_n$ ) при  $A = 407$ :**

$$b\_Y := \text{slope}(v, Y_{407}) \quad b\_Y = 7.152 \times 10^3$$

$$V_n := 0, 0.1.. 5$$

**Задамо рівняння лінійної регресії:**

$$Y_{407\_teor}(V_n) := b\_Y \cdot V_n$$

**Обчислимо коефіцієнт кореляції між  $Y_n$  та  $V_n$  при  $A = 407$ :**

$$K\_kor\_407 := \text{corr}(v, Y_{407}) \quad K\_kor\_407 = 0.976$$

Результатом виконання програми “Progr\_3\_mcd” є значення коефіцієнта пропорційності між середньою силою опору подачі та швидкістю подачі комбайна для опірності вугілля різанню 407 Н/мм ( $K_{407}=7152 \text{ Н}\cdot\text{хв}/\text{м}$ ). Справедливість саме лінійної регресії підтверджується значенням коефіцієнта кореляції для залежності середньої сили опору подачі від швидкості подачі, що майже дорівнює одиниці.

Також результатом виконання програми “Progr\_3\_mcd” є нижченаведений графік рівняння лінійної регресії (суцільна лінія на рис.6) для залежності середньої сили опору подачі від швидкості подачі комбайна разом з експериментальними даними (показані маркерами у вигляді кіл на рис.6).

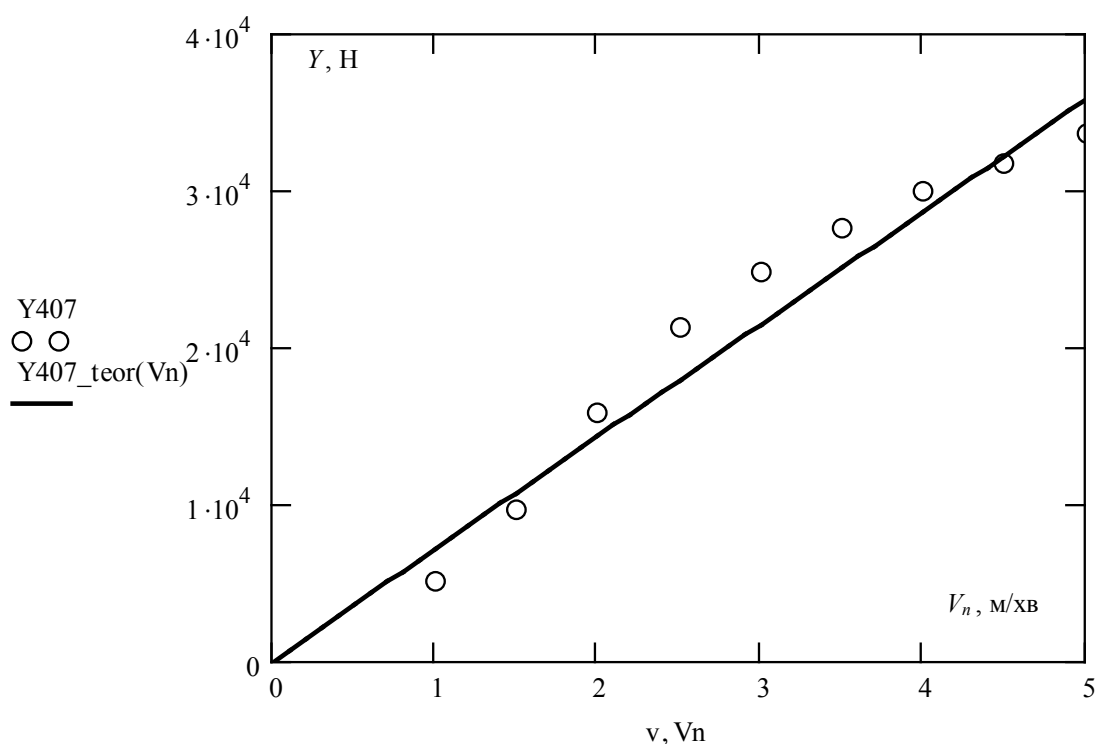


Рис. 6. Експериментальна та теоретична залежність середньої сили опору подачі від швидкості подачі при опірності вугілля різанню 407 Н/мм

Нижче у табл.4 наведені результати статистичної обробки експериментальних залежностей середньої сили опору подачі від швидкості подачі комбайна для інших опірностей вугілля різанню за допомогою програми “Progr\_3\_mcd”.

На основі даних, що наведені в табл.4, визначимо коефіцієнт рівняння лінійної регресії та коефіцієнт кореляції для залежності коефіцієнта пропорційності між середньою силою опору подачі та швидкістю подачі комбайна від опірності вугілля різанню. Для цього використаємо програму “Progr\_4\_mcd”.

Таблиця 4

Результати статистичної обробки експериментальних залежностей середньої сили опору подачі від швидкості подачі

Опірність вугілля різанню, Н/мм	Коефіцієнт рівняння лінійної регресії $b_Y$ для залежності $Y(V_n)$ , Н·хв/м	Коефіцієнт кореляції між $Y$ та $V_n$
150	2650	0,975
200	3557	0,978
250	4433	0,978
300	5256	0,976
350	6191	0,978
407	7152	0,976

Progr\_4\_mcd. Визначення коефіцієнта рівняння лінійної регресії та коефіцієнта кореляції для залежності коефіцієнтів  $b_Y$  від опірності вугілля

Значення коефіцієнтів рівнянь лінійної регресії для залежностей  $Y_n$  від  $V_n$  при відповідних значеннях опірності вугілля різанню:

$$A_0 := 150 \quad b_{Y_0} := 2.65 \times 10^3$$

$$A_1 := 200 \quad b_{Y_1} := 3.557 \times 10^3$$

$$A_2 := 250 \quad b_{Y_2} := 4.433 \times 10^3$$

$$A_3 := 300 \quad b_{Y_3} := 5.256 \times 10^3$$

$$A_4 := 350 \quad b_{Y_4} := 6.191 \times 10^3$$

$$A_5 := 407 \quad b_{Y_5} := 7.152 \times 10^3$$

Коефіцієнт рівняння лінійної регресії для залежності  $b_Y(A)$  :

$$B_Y := \text{slope}(A, b_Y) \quad B_Y = 17.497$$

$$A_y := 0, 0.1.. 410$$

Задамо рівняння лінійної регресії:

$$B_{Y\_teor}(A_y) := B_Y \cdot A_y$$

Обчислимо коефіцієнт кореляції між  $b_Y$  та  $A$  :

$$K_{kor\_Y} := \text{corr}(A, b_Y) \quad K_{kor\_Y} = 1$$

Як результат виконання програми “Prog\_4\_mcd” нижче отриманий графік рівняння лінійної регресії (суцільна лінія на рис.7) для залежності коефіцієнтів  $b_Y$  від опірності вугілля різанню разом з результатами статистичної обробки експериментальних залежностей середньої сили опору подачі від швидкості подачі (показані маркерами у вигляді кіл на рис.7).

Також за результатами виконання програми “Prog\_4\_mcd” можна зробити висновок, що коефіцієнт пропорційності між середньою силою опору подачі та швидкістю подачі комбайна УКД300 є лінійною функцією опірності вугілля різанню (для умов шахти «Павлоградська»):

$$K_{Y(V_n)}(A) = \frac{\bar{Y}}{V_n} = 17,497 \cdot A, \frac{H \cdot xv}{m}.$$

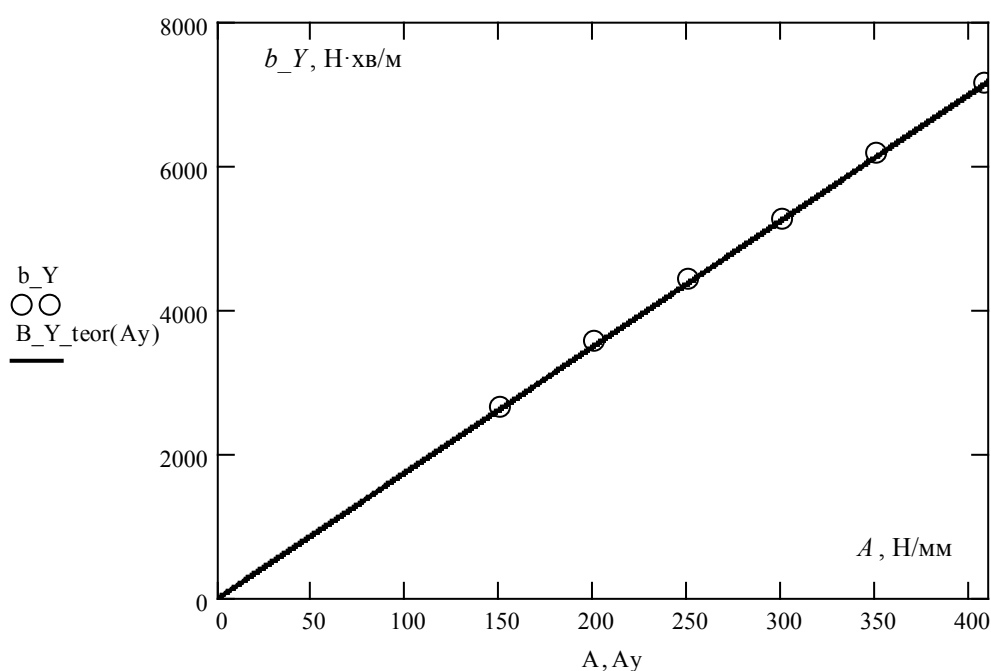


Рис. 7. Графік рівняння лінійної регресії (суцільна лінія) для залежності коефіцієнтів  $b_Y$  від опірності вугілля різанню  $A$  разом із значеннями коефіцієнтів  $b_Y$  (маркери) як результатами статистичного аналізу

Правильність висновку підтверджується тим, що коефіцієнт кореляції для залежності коефіцієнта пропорційності між середньою силою опору подачі та швидкістю подачі комбайна від опірності вугілля різанню дорівнює одиниці. Це означає лінійну залежність між цими двома величинами.

**Висновки.** Конструктивний технологічних зв'язок видобувного комбайну УКД300 з вугільним масивом через шнековий виконавчий орган в умовах пласта  $S_5$  шахти «Павлоградська» описується лінійною залежністю відношення середнього моменту різання до швидкості подачі від опірності вугілля різанню з коефіцієнтом пропорційності  $11 \text{ хв} \cdot \text{мм}$ .



Конструктивний технологічний зв'язок видобувного комбайну УКД300 з вугільним масивом через опорні механізми в умовах пласта С<sub>5</sub> шахти «Павлоградська» описується лінійною залежністю відношення середньої сили опору подачі до швидкості подачі від опірності вугілля різанню з коефіцієнтом пропорційності 0,017497 хв.

Список літератури

1. 1. Изделия угольного машиностроения. Комбайны очистные. Методика выбора параметров и расчета сил резания и подачи на исполнительных органах : ГСТУ КД12.10.040–1999. — [Действует с 01.01.2000]. — Донецк : Минуглепром Украины, 1999. — 75 с.
2. Стадник Н.И. Особенности и функциональная модель мехатронного очистного комплекса / Н. И. Стадник, А. В. Сергеев, В. П. Кондрахин // «Горное оборудование и электромеханика». — Дніпропетровськ, 2008 — №5 — С. 32—40.
3. Стадник Н.И. Мехатроника в угольном машиностроении / Н. И. Стадник, А. В. Сергеев, В. П. Кондрахин // «Горное оборудование и электромеханика». — Дніпропетровськ, 2007 — №4 — С. 20—29.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Самусею В.І.  
Надійшло до редакції 25.10.2014*