

АНАЛІЗ БІОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГІРНИКІВ ПРИ ПІДЗЕМНОМУ ВИДОБУТКУ ВУГІЛЛЯ

В. Шевченко^{1*}

¹Лабораторія вібраційної обробки мінеральної сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпропетровськ, Україна

*Відповідальний автор: e-mail V.Shevchenko@nas.gov.ua, тел. +380563702697

ANALYSIS OF MINERS' BIOMECHANICAL CHARACTERISTICS DURING UNDERGROUND COAL MINING

V. Shevchenko^{1*}

¹Laboratory of Vibrating Processing of Mineral Raw Materials, Institute of Geotechnical Mechanics named after M.S. Polyakov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipropetrovsk, Ukraine

*Corresponding author: e-mail V.Shevchenko@nas.gov.ua, tel. +380563702697

ABSTRACT

Purpose. Analysis and establishing regularities of changes in miner's biomechanical characteristics during underground coal mining in order to reduce the number of accidents and injuries in coal mines.

Methods. The complex research suggested using methods of mathematical analysis, mathematical statistics, probability theory, reliability theory, control theory, methods of biomechanics.

Findings. The influence of miner's biomechanical characteristics on productivity of the system "driver – cutter of the new technological level" is modeled and analyzed. We established regularities of safe operation of the system "driver – cutter of the new technological level" in conditions of the highly loaded face considering the influence of miner's biomechanical parameters and determined limits of the face load for these parameters.

Originality. For the first time the dependence of the total energy consumption on the value of cutter performance is established, which indicates that its movement along the face at a constant speed is more economical than moving at a variable speed, with the same average speed in both cases. The authors pioneered in assessing the degree of comfort of miners' working conditions through the indicator of driver energy consumption per ton of excavated rock. It was also proposed to introduce the index of driver's movement efficiency that is inversely proportional to the energy consumption per ton of rock mass and grows parabolically depending on the increase in the cutter speed and linearly in respect to increasing web width.

Practical implications. The results are the basis for developing the method for calculating miner's biomechanical parameters in highly loaded face.

Keywords: miner's biomechanical parameters, regularities, overall energy consumption, efficiency, reduction of the number of accidents and injuries

1. ВСТУП

При стабільному розвитку виїмкової техніки і постійно зростаючій проектній продуктивності очисних комплексів технологія вуглевидобутку за останні десятиліття істотно не змінилася. Невід'ємною частиною технології комплексно-механізованого вуглевидобутку залишається гірник. Безупинно зростаюча енергооснащеність, швидкість подачі й продуктивність видобувної техніки висувають нові вимоги до гірників, що повинні повною мірою забезпечувати реалізацію її проектних резервів у процесі виїмки вугілля.

Одними з параметрів властивих підсистемі "люди-на" у процесі функціонування основної системи вугле-

видобутку "гірники – очисний комплекс" є біомеханічні характеристики гірників. Перед розробниками сучасної очисної техніки та технологій ще на етапі проектування повинні ставитися задачі врахування індивідуальних особливостей гірників та оцінки впливу біомеханічних параметрів на надійність і безпеку процесів видобутку, вирішення питань підготовки та відбору кадрів, здатних ефективно керувати сучасними гірничими машинами і комплексами (Surgay, Vinogradov & Kiyashko, 2001; Coleman & Kerkering, 2007; Page, 2009; Sari, Selcuk, Karpuz, & Duzgun, 2009).

Постійне вдосконалення засобів захисту органів дихання також вимагає додаткових досліджень енерговират гірників під час вуглевидобутку (Campbell,

Coffey & Lenhart, 2001; Clayton, 2002; Janssen, Nelson, & Cuta, 2007; Laney & Attfield, 2010; Lee, Grinshpun, & Reponen, 2010; Lei, Yang, & Zhuang, 2014; Golinko, Cheberyachko, Radchuk, & Cheberyachko, 2014; Golinko, Cheberyachko, Cheberyachko, & Naumov, 2014; Golinko, Cheberyachko, Yavorskaya, & Cheberyachko, 2016).

Тому встановлення закономірностей зміни біомеханічних характеристик гірників при підземному видобутку вугілля є актуальним науково-прикладним завданням, що має істотне значення в галузі охорони праці для зниження рівня аварійності та травматизму на вугільних шахтах.

2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1. Технічні характеристики сучасних очисних комбайнів

Одними з параметрів властивим підсистемі “люди-на” у процесі функціонування системи “машиніст – виїмковий комбайн нового технічного рівня (НТР)” є біомеханічні характеристики гірника. Біомеханіка

(bios – життя і механе – знаряддя) – наука про закони механічного руху в живих системах, що вивчає рухи з погляду законів механіки, властивих усім без винятку механічним рухам матеріальних тіл (Utkin, 1989). Біомеханічні характеристики гірника очисного вибою (ГРОВ) – машиніста – це параметри, що характеризують механічну картину його рухів у процесі переміщення по лаві та керування очисним комбайном. Біомеханічні характеристики прийнято ділити на кінематичні – що характеризують зовнішню картину рухової діяльності, динамічні – причини, що характеризують зміни рухів і енергетичні – що характеризують механічну продуктивність та економічність.

Основні технічні характеристики сучасних очисних комбайнів, призначених для виїмки вугілля в довгих очисних вибоях пологих і пологопохилих пластів, що відпрацьовуються по простяганню з кутами падіння до 35°, а також по повстанню або падінню з кутами залягання пласта до 10° наведені в Таблиці 1.

Таблиця 1. Технічні характеристики сучасних очисних комбайнів

Тип	Потужність пласта, що виймається, м	Ширина захвата, м	Опірність різанню, кН/м	Максимальна робоча швидкість подачі, м/хв	Продуктивність, т/хв	Стійка потужність приводів, кВт	Питомі енерговитрати на видобуток (розрахункові значення), кВт год/т
1К101У	0.78 – 1.30	0.80; 0.63	300	4.4	1.2	110.0	5500.0
1К101УД	0.95 – 1.30	0.80	300	5.2	3.0	290.0	5800.0
К103М	0.60 – 1.30	0.80	360	5.0	2.0 – 3.2	290.0	5437.5
КА80	0.85 – 1.25	0.63; 0.80	360	5.0	2.2 – 3.3	180.0	3272.7
КА90	0.80 – 1.25	0.80	400	5.0	2.0 – 5.0	200.0	2400.0
КА200	0.80 – 1.25	0.80	400	5.0	3.0 – 5.0	310.0	3720.0
ГШ200Б	0.95 – 1.50	0.80; 0.63	360	6.0	3.0 – 5.0	226.0	2712.0
ГШ200У	1.05 – 1.45	0.80	360	5.0	4.0 – 5.5	310.0	3381.8
РКУ10	1.10 – 1.93	0.63; 0.88	360	5.0 – 10.0	5.0	200.0	2400.0
УКД 200/250	0.85 – 1.30	0.63; 0.80	360	5.0	3.3	330.0	6000.0
УКД 300	0.85 – 1.50	0.70	360	12.0	10.0	420.0	2520.0
К85М (Росія)	0.90 – 1.50	0.63; 0.80	360	8.5	—	200.0 – 220.0	1348.0
МВ 320Е (Чехія)	1.00 – 2.30	0.63; 0.80	360	11.5	10.0	321.5	1929.0
1ГШ68	1.25 – 2.50	0.50; 0.63; 0.80	360	3.0 – 4.4	5.0	320.0	3840.0
2ГШ68Б	1.40 – 2.50	0.50; 0.63	360	6.0	5.0	320.0	3840.0
ГШ500	1.30 – 2.70	0.63	360	6.0	5.0 – 11.0	564.5	3079.0
РКУ13	1.35 – 2.60	0.63; 0.80	360	5.0 – 10.0	8.0	200.0; 315.0; 400.0	3000.0
КШ1КГУ	1.40 – 2.92	0.63	300	4.4	3.0	110.0	2200.0
КДК500	1.35 – 3.20	0.63; 0.80	360	20.0	18.0	597.5	1991.7
К400 (Росія)	1.45 – 2.60	0.63; 0.80	360	15.0	—	535.0	1100.8
EL2000 (Німеччина, DBT)	1.40 – 3.50	—	—	45.0	—	1240.0	702.9
SL300/2 (Німеччина, Eickoff)	1.50 – 3.50	0.80 – 1.20	—	54.5	—	1098.0	503.7
KGS-600 (Польща)	1.30 – 3.20	—	—	7.4 – 9.2	—	520.0	1570.0
KGE-710F (Польща)	1.20 – 3.30	—	—	16.0	—	512.0/612.0/712.0	1062.5
К500 (Росія)	1.50 – 3.50	0.63; 0.80	360	10.0	5.0 – 11.0	635.0	3463.6
МВ 612Е (Чехія)	1.80 – 4.00	0.63; 0.80	360	15.0	29.0	612.0	1266.2
7LS1 (Англія, Joy)	1.50 – 4.00	—	—	8.0 – 9.5	—	880.0	2105.3
КШ3М	1.80 – 3.30	0.63; 0.50	300	4.4	3.0 – 5.0	210.0	2520.0
1КШЕ	2.20 – 4.25	0.50	360	2.0 – 8.0	5.0	500.0	6000.0
КДК700	2.00 – 4.30	0.63; 0.80	360	20.0	24.0	860.0	2150.0
EL3000 (Німеччина, DBT)	2.20 – 6.00	—	—	45.0	—	1940.0	657.2
SL500 (Німеччина, Eickoff)	2.00 – 5.50	—	—	37.0	—	1130.0 – 1540.0	693.7
KGE 750F (Польща)	1.60 – 4.30	—	—	16.0; 22.0	—	935.0	900.4
К700А (Росія)	2.80 – 5.50	—	360	10.0	—	850.0	1280.1
МВ 712Е (Чехія)	2.50 – 5.00	0.63; 0.80	360	15.0	37.0	696.0	1128.7

Дані Таблиці 1 свідчать, що зі збільшенням потужності, пластів що виймаються, збільшуються як проектна продуктивність і максимальна швидкість подачі, так і енергооснащеність сучасних очисних комбайнів, а питомі енерговитрати на тону добутого вугілля знижуються.

Залежність максимальної швидкості подачі v_n , продуктивності q , енергооснащеності P і питомих енерговитрат H_w сучасних очисних комбайнів від потужності пластів, що виймаються, m наведена на Рисунку 1.

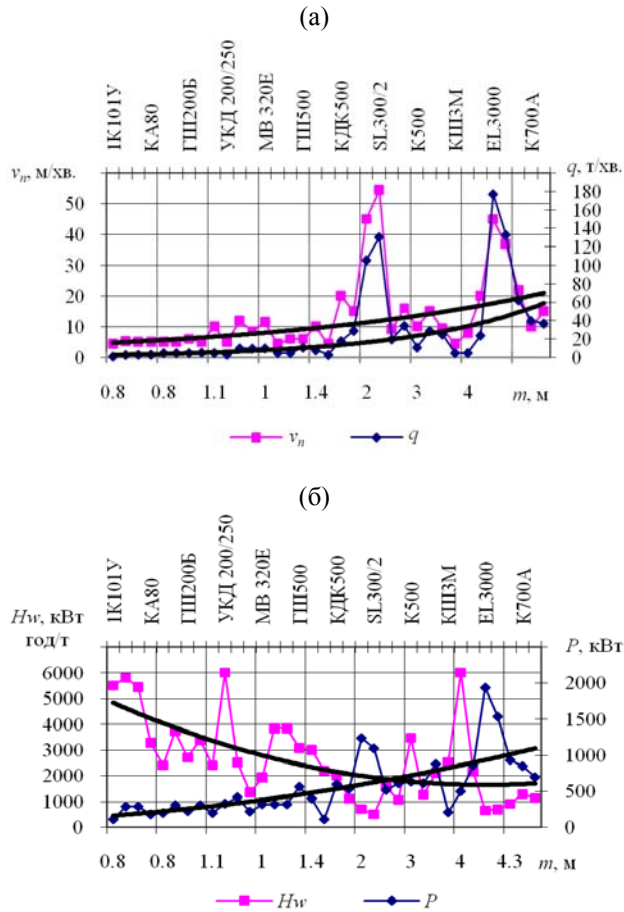


Рисунок 1. Залежність (а) максимальної швидкості подачі й продуктивності, (б) енергооснащеності й питомих енерговитрат сучасних очисних комбайнів від потужності пластів, що виймаються

Так, для вітчизняних очисних комбайнів, призначених для виїмки тонких пластів потужністю 0.7 – 1.2 м максимальна проектна швидкість подачі перебуває в діапазоні від 4.4 (комбайн ІК101У) до 12.0 м/хв (УКД300), для пластів середньої потужності 1.21 – 2.50 м проектна швидкість подачі становить від 3 (ІГШ68) до 20 м/хв (КДК500), для комбайнів, призначених для виїмки потужних пластів (2.51 – 5.00 м) максимальна швидкість подачі становить від 8 (ІКШЕ) до 25 м/хв (КДК700). Для закордонних комбайнів, призначених для виїмки тонких пластів, максимальна швидкість подачі досягає 11.5 м/хв (МВ 320Е), для виїмки пластів середньої потужності – 54.5 м/хв (SL300/2) і для комбайнів, призначених для виїмки потужних пластів – 45 м/хв (EL3000). Таким

чином, має місце тенденція збільшення максимальної проектної швидкості подачі очисних комбайнів зі збільшенням потужності пластів, що виймаються. Залежність питомих енерговитрат від швидкості подачі для сучасних очисних комбайнів наведена на Рисунку 2. Графік свідчить про зменшення питомих енерговитрат на видобуток зі збільшенням швидкості подачі очисних комбайнів. Дана залежність носить гіперболічний характер.

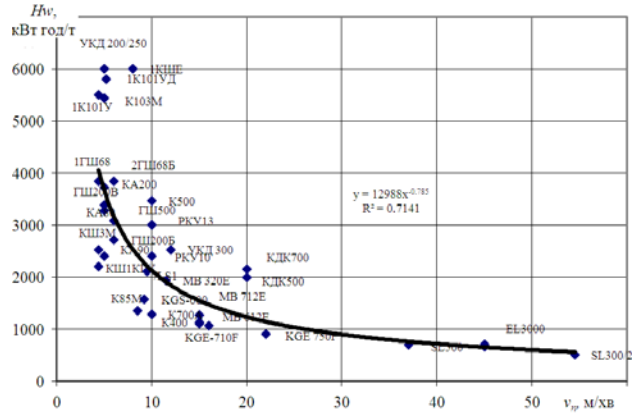


Рисунок 2. Залежність питомих енерговитрат на видобуток вугілля від швидкості подачі сучасних очисних комбайнів

При стабільному розвитку виїмкової техніки і проектної продуктивності очисних комбайнів, що постійно підвищується, технологія вуглевидобутку за останні десятиліття істотно не змінилася. Невід'ємною частиною технології комплексно-комплексно-механізованого вуглевидобутку залишається гірник. Безупинно зростаюча енергооснащеність, швидкість подачі та продуктивність видобувної техніки висувають нові вимоги до гірників, які повинні повною мірою забезпечувати реалізацію її проектних резервів у процесі виїмки вугілля. Особливо актуальна дана проблема для високонавантажених вибоїв, обладнаних сучасними комплексами НТР.

2.2. Типові положення ГРОВ-машиніста у процесі переміщення по лаві

Типові положення ГРОВ-машиніста в процесі переміщення по лаві та керування очисним комбайном при різних діапазонах потужності пластів, що виймаються, наступні. Так, при потужності пласта, що виймається, до 0.9 м машиніст, як правило, переміщається по лаві слідом за комбайном у положенні лежачи (поповзом), при потужності пласта, що виймається, від 0.9 до 1.4 м найбільш зручним способом переміщення є переміщення на колінах (четвериньках), при потужності від 1.4 до 1.8 м машиніст переміщається в положенні зігнувшись і лише при потужності пласта, що виймається, більше 1.8 м машиніст переміщається в найбільш звичному для людини положенні – у повний ріст.

У Таблиці 2 наведені дані про розподіл основних технічних параметрів сучасних очисних комбайнів і швидкості переміщення машиніста по лаві для різних діапазонів потужності пласта, що виймається.

Таблиця 2. Діапазони зміни основних технічних характеристик сучасних очисних комбайнів і швидкості переміщення машиніста по лаві при різних потужностях пласта, що виймається (Surgay, Vinogradov, & Kiyashko, 2001)

Параметр		Діапазони потужності пласта, що виймається, м			
		0.5 – 0.9	0.91 – 1.4	1.41 – 1.8	1.81 – 5
Максимальна проектна швидкість подачі комбайнів, м/хв	вітчизняних 4-го покоління	3 – 5	4 – 6	5 – 8	5 – 10
	вітчизняних НТР	10	12	20	24
	закордонних	8.5	16	54.5	45
Стійка потужність приводів, кВт	вітчизняних 4-го покоління	110 – 310	200 – 420	200 – 597.5	210 – 860
	вітчизняних НТР	420	420	597.5	860
	закордонних	200 – 220	200 – 300	512 – 1098	696 – 1940
Питомі енерговитрати на видобуток, кВт год/т	вітчизняних 4-го покоління	2400 – 5800	2400 – 6000	2000 – 3840	2156 – 6000
	вітчизняних НТР	2520	2520	1992	2150
	закордонних	1348	1348 – 1929	700 – 3465	657.2 – 1280
Швидкість переміщення машиніста по лаві ¹ м/хв		0.5 – 2.8	2.81 – 7	7.1 – 10	10.1 – 12

Дані таблиці свідчать, що сучасні вітчизняні комбайни НТР (УКД300, КДК500, КДК700) у стані забезпечувати істотно більші швидкості подачі, ніж комбайни 4-го покоління (К103М, 1К101УД, ГШ200У, 2ГШ68Б, РКУ10 та ін.). Максимальна проектна швидкість подачі вітчизняних комбайнів НТР в середньому в 2 рази перевищує швидкість подачі традиційних комбайнів для всіх діапазонів потужності пласта, що виймається, а для закордонних комбайнів, призначених для виїмки пластів середніх і потужних (SL300/2, SL500, EL3000) – більш ніж в 4 – 5 разів.

2.3. Швидкість переміщення машиніста по лаві та швидкість подачі комбайна

Сучасні комбайни НТР практично всі розраховані на високу опірність пластів різанню до 400 кН/м при традиційній ширині захвату. Дані параметри істотно не обмежують досягнути швидкість подачі сучасних комбайнів, що у даний час більшою мірою визначається енергооснащеністю елементів виїмкового комплексу і технологічних параметрів процесу вуглевидобутку в цілому. Енергооснащеність закордонних комбайнів перевищує енергооснащеність вітчизняних, а питомі енерговитрати у закордонних комбайнів нижче для всіх діапазонів потужності пласта, що виймається.

Як видно з Таблиці 2, при обладнанні очисних вибоїв комплексами НТР і високому коефіцієнті готовності процесу вуглевидобутку, швидкість переміщення машиніста може істотно обмежувати проектну продуктивність сучасних виїмкових комбайнів. Для реалізації технічних можливостей комплексів НТР повинна забезпечуватися умова $v \geq v_n$, тобто швидкість переміщення машиніста v повинна бути рівною швидкості подачі очисного комбайна v_n .

Швидкість пересування людини пропорційна довжині та частоті кроку:

$$v = l \cdot n, \quad (1)$$

де:

l – довжина кроку, м;

n – частота кроків (темпересування), 1/хв.

При переміщенні машиніста поповзом або на колінах (четверінках) темп визначається як число циклів у хвилину, а довжина кроку дорівнює відстані, подоланій за один цикл (крок).

2.4. Енерговитрати машиніста при переміщенні по лаві

Збільшення швидкості подачі очисних комбайнів, а, отже, і швидкості переміщення по лаві вимагає від гірника збільшення енерговитрат. З погляду біомеханіки загальні енерговитрати людини становлять витрати метаболічної енергії на переміщення (Surgay, Vinogradov, & Kiyashko, 2001). У свою чергу метаболічну енергію становлять теплові втрати енергії і повна механічна енергія. Остання складається з роботи внутрішніх органів і явної механічної роботи. Явна механічна робота складається із внутрішньої і зовнішньої роботи. До внутрішньої роботи відноситься робота, чинена при переміщенні окремих сегментів тіла щодо загального центра мас (загальний центр мас – точка, у якій прикладена рівнодіюча всіх сил діючих на людину). Зовнішня механічна робота складається з роботи в поздовжньому і поперечному напрямку.

Таким чином, при переміщенні машиніста по лаві корисною є лише робота в поздовжньому напрямку. Інші витрати енергії не є корисними відносно критерію механічної продуктивності – швидкості переміщення машиніста по лаві (швидкості подачі комбайна), але є невід'ємною складовою будь-якого руху.

Залежність загальних енерговитрат E , Вт (Дж/с) від швидкості переміщення для людини виражається наступною формулою (Роров, 1998):

$$E = E_0 + b_1 v + b_2 v^2, \quad (2)$$

де:

v – швидкість пересування, м/хв;

E_0 – витрати енергії в стані спокою, Вт (Дж/с) (при оцінці енерговитрат по частоті серцевих скорочень $E_0 = ЧСС_0$, де: $ЧСС_0$ – частота серцевих скорочень у стані спокою, уд/хв);

b_1 – коефіцієнт, що характеризує лінійний компонент реакції організму на навантаження, що переважає в зоні навантажень помірної і великої відносної потужності;

b_2 – коефіцієнт, що характеризує квадратичний компонент реакції організму на навантаження, що виникає в зоні великої і субмаксимальної відносної потужності, коли витрати на подолання зовнішніх сил опору руху і на роботу внутрішніх органів значно зростають.

Згідно (Роров, 1998) параметри змінюються в діапазонах $E_0 = 240 - 280$ Вт; $b_1 = 0.1 - 6$; $b_2 = 0.03 - 2$ і для попередніх розрахунків можуть бути прийняті мінімальні їхні значення.

Залежність енерговитрат від швидкості переміщення машиніста по лаві для вітчизняних традиційно використовуваних комплексів і комплексів НТР наведена на Рисунку 3.

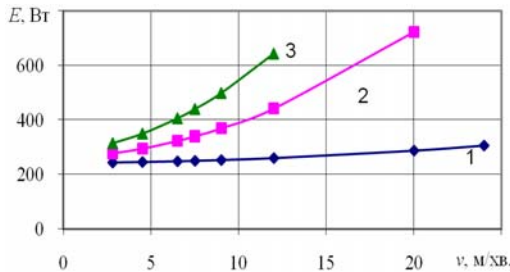


Рисунок 3. Залежність загальних енерговитрат машиніста від швидкості його переміщення по лаві: 1 – при потужності пласта $t > 1.8$ м і переміщенні в повний ріст; 2 – при $t = 0.91 - 1.4$ м і переміщенні на колінах; 3 – при $t = 0.7 - 0.9$ м і переміщенні поповзом

Графіки (Рис. 3) свідчать про те, що у високонавантажених лавах при повній реалізації технічних можливостей сучасних комплексів НТР машиністи будуть нести більші енерговитрати, чим при роботі із традиційними комплексами. Таким чином, тенденція підвищення проектної продуктивності та швидкості подачі очисних комбайнів буде супроводжуватися підвищенням загальних енерговитрат машиніста в процесі переміщення по лаві та керування комбайном.

2.5. Енергетична вартість метра шляху при переміщенні по лаві

Крім енерговитрат іншим важливим критерієм ефективності рухової діяльності людини є механічна продуктивність. При циклічних рухах (до яких відносяться всі види переміщень машиніста по лаві при різних його положеннях) механічна продуктивність оцінюється часом подолання відстані або швидкістю пересування. Важливим біомеханічним критерієм, що характеризує ефективність рухових дій при переміщенні, є енергетична вартість метра шляху (Utkin, 1989).

Розділимо обидві частини рівняння (2) на швидкість v і одержимо залежність енергетичної вартості метра шляху від швидкості переміщення машиніста по лаві:

$$\frac{E}{v} = \frac{E_0}{v} + b_1 + b_2 v \quad (3)$$

Продиференціював праву частину виразу (3) по dv маємо $\frac{E}{v} = b_2 - \frac{E_0}{v^2}$. Отримане рівняння вказує на існування екстремуму типу мінімум функції (3) у точці оптимальної швидкості пересування, що забезпечує мінімальну енергетичну вартість метра шляху.

На Рисунку 4 наведені залежності енергетичної вартості метра шляху від швидкості переміщення машиніста по лаві.

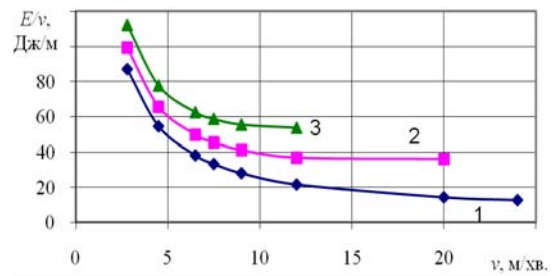


Рисунок 4. Залежність енергетичної вартості метра шляху від швидкості переміщення машиніста по лаві: 1 – при потужності пласта $t > 1.8$ м і переміщенні в повний ріст; 2 – при $t = 0.91 - 1.4$ м і переміщенні на колінах; 3 – при $t = 0.7 - 0.9$ м і переміщенні поповзом

Графіки свідчать про те, що для діапазону швидкостей, характерних для традиційних комплексів і комплексів НТР, вартість метра шляху, на відміну від загальних енерговитрат, зменшується. Вирішивши рівняння $\frac{E}{v} = b_2 - \frac{E_0}{v^2} = 0$, одержимо оптимальну

(для людини із середньостатистичними даними і при ідеальних умовах зовнішнього середовища) швидкість переміщення машиніста по лаві, що при переміщенні поповзом становить приблизно 12 м/хв; на колінах – 16 м/хв; у повний ріст – 50 м/хв. Отже, для сучасних комбайнів НТР значення оптимальної швидкості (за критерієм енергетичної вартості метра шляху) поки не досягнуто.

Квадратичний характер залежності (2) також свідчить про те, що переміщення з постійною швидкістю завжди більш економічно, ніж переміщення зі змінною швидкістю при однаковій величині середньої швидкості, що обумовлено домінуванням фракції кінетичної енергії в загальній енергії переміщення машиніста і нерівномірним характером її витрати при зміні швидкості. Таким чином, для високонавантажених вибоїв, при високому коефіцієнті готовності процесу вуглеводобутку, раціональним буде такий режим роботи очисного комбайна, при якому забезпечується сталість його швидкості подачі $v_n = \text{const}$, що забезпечить економію енерговитрат машиніста при функціонуванні системи “машиніст – очисний комбайн НТР”.

2.6. Оптимальна швидкість переміщення машиніста

Значення оптимальної швидкості переміщення машиніста може істотно відрізнятися як для різних зовнішніх умов (температури навколишнього середовища, вологості та швидкості руху повітря, кута нахилу виробки та ін.), так і залежати від індивідуальних особливостей гірника (віку, досвіду, кваліфікації, навичок та ін.). Рухові можливості у людини інтенсивно розвиваються замолоду і поступово загасають у дозрілих літах. Найбільш економічні величини швидкості, довжини кроку і темпу також змінюються з віком, що може бути компенсовано досвідом і кваліфікацією, особливо у видах рухової діяльності зі складною технікою і тактикою. Залежність оптимальної швидкості переміщення v_{opt} від віку людини T з відзначеними границями довірчих інтервалів наведена на Рисунку 5 (Utkin, 1989). Оптимальна швидкість людини у віці від 20 до 24 – 26 років збільшується, а потім знижується.

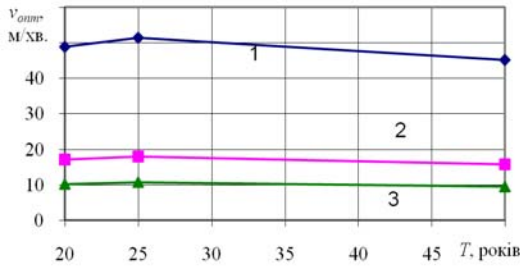


Рисунок 5. Залежність оптимальної швидкості переміщення v_{opt} від віку людини T : 1 – при потужності пласта $t > 1.8$ м і переміщенні в повний ріст; 2 – при $t = 0.91 - 1.4$ м і переміщенні на колінах; 3 – при $t = 0.7 - 0.9$ м і переміщенні поповзом

Витрати енергії на 1 м шляху різні як при різних швидкостях переміщення так при різних положеннях людини. Існує оптимальна швидкість переміщення для різних положень тіла людини. Гранична (оптимальна) швидкість задається числом Фруда, що визначається по виразу (Utkin, 1989):

$$Fr = \frac{v^2}{gL_0}, \tag{4}$$

де:

- g – прискорення вільного падіння, м/с²;
- v – швидкість пересування людини, м/с;
- L_0 – висота загального центра мас тіла в основній стійці, м.

Безрозмірний критерій подібності Фруда характеризує співвідношення між інерційними силами і силами гравітації (вагою) залежно від швидкості v , прискорення через силу ваги g і масштабу довжини L_0 для всіх динамічних переміщень у гравітаційному полі (Yavorskiy & Detlaf, 1976). Так, при $Fr < 1$ даний

критерій свідчить об перевагу сил ваги над силами інерції, а при $Fr > 1$, навпаки, про перевагу сил інерції над силами ваги. Гранична швидкість відповідає умові $Fr = 1$ і для різної висоти загального центра мас людини в основній стійці може бути визначена згідно виразу:

$$v_{zp} = \sqrt{gL_0}. \tag{5}$$

Так, для різних діапазонів потужності пласту, що виймається, висота загального центра мас (точки, до якої прикладена рівнодіюча всіх сил діючих на тіло) різна. Загальний центр мас (центр ваги) (ЗЦМ) людини можливо визначити графічним або аналітичним способом (Fedotov, 1996). Вихідні та розрахункові дані по визначенню загального центра мас людини представлені в Таблиці 3.

Вихідними даними є відносна $P_{відн}$ і абсолютна вага ланок P_i тіла людини (як правило, для вирішення подібного роду завдань число ланок тіла людини n досить брати рівним 15), довжина ланки l_i , радіус центра ваги k і відстань центра мас ланки до проксимального кінця $l_i = l_i k$. Середні дані про вагу ланок тіла і про положення їхніх центрів ваги широко відомі з літературних джерел по біомеханіці (Bernshteyn, 1947).

Аналітичний спосіб визначення ЗЦМ заснований на додаванні моментів сил ваги по теоремі Варіньйона: сума моментів сил щодо будь-якого центра дорівнює моменту суми цих сил (або рівнодіючої) щодо того ж центра. Для цього необхідно прив'язати положення людини до системи координат з відзначеними на ній центрами ваги кожної ланки. На Рисунок б схематично представлені положення машиніста (людини із середньостатистичними антропометричними даними) при різних діапазонах потужності пласта, що виймається, із прив'язкою до координатної сітки.

Таблиця 3. Вихідні та розрахункові дані до визначення ЗЦМ машиніста

Ланка	Відносна вага ланки $P_{відн}, \%$	Абсолютна вага ланки $P_i, \text{кг}$	Радіус центра ваги k	Відстань центра мас ланки до проксимального кінця $l_i = l_i k$	Моменти сил при різних положеннях машиніста (потужності пласта, що виймається)							
					Повний ріст $t > 1.8 \text{ м}$		Зігнувшись $t = 1.41 - 1.8 \text{ м}$		На колінах $t = 0.91 - 1.4 \text{ м}$		Поповзом $t = 0.7 - 0.9 \text{ м}$	
					P_{xi}	P_{yi}	P_{xi}	P_{yi}	P_{xi}	P_{yi}	P_{xi}	P_{yi}
Все тіло	100	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Голова	7	7	—	—	770	1137	1120	910	1190	700	630	280
Тулуб	43	43	0.44	0.44	4300	5375	5160	4730	5590	3225	6235	1290
Праве плече	3	3	0.47	14.1	240	420	360	390	381	300	465	60
Ліве плече	3	3	0.47	14.1	390	360	420	240	465	180	540	81
Праве передпліччя	2	2	0.42	12.6	180	240	220	230	240	160	330	30
Ліве передпліччя	2	2	0.42	12.6	280	220	300	140	320	80	400	30
Права кисть	1	1	0.44	4.4	110	105	115	85	127	55	185	5
Ліва кисть	1	1	0.44	4.4	165	110	170	60	180	27	215	0
Праве стегно	12	12	0.42	16.8	960	720	960	780	1020	360	960	180
Ліве стегно	12	12	0.42	16.8	1200	780	1200	780	1320	420	960	276
Права гомілка	5	5	0.44	17.6	300	150	300	125	350	100	325	50
Ліва гомілка	5	5	0.44	17.6	575	200	575	175	600	100	300	125
Права стопа	2	2	0.42	10.5	60	40	60	40	90	46	90	40
Ліва стопа	2	2	0.42	10.5	220	0	220	0	160	46	54	50
Сума	—	100	—	—	9750	9857	11180	8685	12033	5799	11689	2497
Координати ЗЦМ					X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
					97.50	98.575	111.80	86.85	120.33	57.99	116.89	24.97

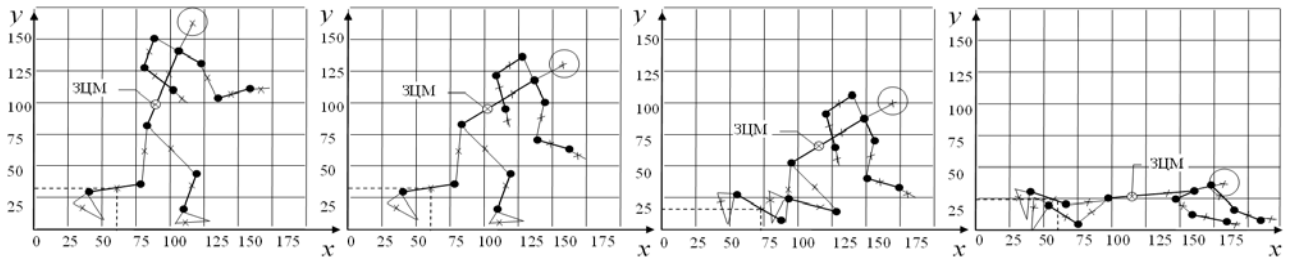


Рисунок 6. Схема до розрахунку загального центра мас машиніста при різних потужностях пласта, що виймається

Далі необхідно виміряти горизонтальну x_i і вертикальну y_i координати центрів ваги кожної ланки і обчислити значення горизонтальних $P_i x_i$ і вертикальних $P_i y_i$ моментів статичних сил, що діють на всі ланки, щодо осей X і Y , знайти суми горизонтальних $\sum P_i x_i$ і вертикальних $\sum P_i y_i$ моментів сил, що діють на ланки тіла. Горизонтальна і вертикальна координати ЗЦМ людини знаходяться за наступними виразами (Fedotov, 1996):

$$X_{зцм} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i x_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad Y_{зцм} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i y_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (6)$$

У Таблиці 3 наведені дані розрахунку положення загального центра мас машиніста для його характерних положень при різних потужностях пласта, що виймається. Розраховане положення ЗЦМ машиніста при різних діапазонах потужностей пласта, що виймається, також відзначено на схемі (Рис. 6).

Розраховане положення ЗЦМ машиніста із середньостатистичними антропометричними даними (зріст 170 – 175 см і маса 75 – 80 кг) при різних діапазонах потужності пласта, що виймається, складо: при переміщенні поповзом довжина $L_0 \approx 0.25$ м; на колінах $L_0 \approx 0.58$ м; при переміщенні зігнувшись $L_0 \approx 0.87$ м; у повний ріст – $L_0 \approx 2$ м.

Аналіз підтверджує, що число Фруда (0.0009 до 0.0016 – для швидкостей, характерних традиційним комплексам і з 0.009 до 0.017 – комплексам НТУ) і гранична швидкість переміщення (1 – 3 км/год) збільшуються з підвищенням потужності пласта, що виймається, з 0.8 до 1.8 м, тобто переважають сили гравітації, що діють на машиніста, над силами інерції, особливо для нижніх діапазонів потужності (переміщення поповзом і на колінах). Крім того, істотно зростають енерговитрати машиніста при забезпеченні граничної швидкості переміщення за критерієм Фруда. Результати аналізу дозволяють зробити висновки про те, що економічність переміщення маши-

ніста при забезпеченні граничної швидкості зростає зі збільшенням потужності пласта, що виймається.

2.7. Стійкість положення машиніста при переміщенні по лаві

Важливою біомеханічною характеристикою є стійкість положення машиніста при різних діапазонах потужності пласта, що виймається. У біомеханіці розрізняють динамічну та статичну стійкість. Показники динамічної стійкості характеризують здатність тіла вертатися до первісного положення рівноваги при припиненні дії на тіло сил у процесі руху. Показники статичної стійкості характеризують здатність тіла пручатися порушенню його рівноваги.

Для оцінки динамічної стійкості необхідно (Bakulin, 1996):

- визначити площу опори по горизонтальній осі X (Рис. 7);
- з'єднати ЗЦМ із краями площі опори і опустити перпендикуляр з ЗЦМ на опору;
- виміряти довжину площі опори l , довжину опори вперед l_1 і назад l_2 , висоту розташування ЗЦМ H . Вихідні дані для визначення динамічної стійкості машиніста представлені в Таблиці 4;
- оцінити стійкість положення тіла машиніста по куту стійкості. Він утворений лінією дії сили ваги і лінією, що з'єднує ЗЦМ із краєм площі опори. Це граничний кут, на який можна повернути тіло до збереження його положення. Кут стійкості, відбиваючи здатність тіла вертатися до первісного положення рівноваги при припиненні дії на тіло сил, що порушують цю рівновагу, є динамічним показником стійкості рівноваги. Якщо кут стійкості не менш 5° , то положення прийнято вважати нестійким. При куті стійкості більше 5° тіло перебуває в обмежено стійкій рівновазі. Сума двох кутів стійкості в одній площині називається кутом рівноваги. Він характеризує запас стійкості в цій площині, тобто визначає розмах переміщень центра ваги до можливого перекидання в ту або іншу сторони. Результати розрахунків по визначенню показників динамічної стійкості машиніста представлені в Таблиці 4.

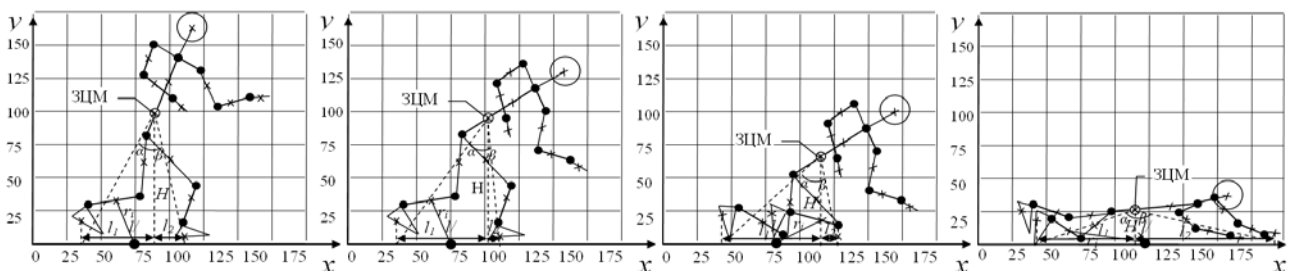


Рисунок 7. Схема до визначення стійкості положення машиніста при різних діапазонах потужності пласта

Таблиця 4. Показники динамічної стійкості положення машиніста при різних діапазонах потужності пласта

Положення	Висота ЗЦМ H , м	Розмір площі опори l , м	Позитивні проекції ЗЦМ, м		Кути стійкості, град		Кут рівноваги $\alpha + \beta$	Оцінки стійкості
			l_1	l_2	α	β		
У повний ріст	0.9856	80	50	30	29.0	17.0	46.0	стійке
Зігнувшись	0.8685	80	75	5	49.4	3.2	52.6	не стійке
На колінах	0.5799	90	75	15	74.1	14.8	88.9	стійке
Поповзом	0.2497	190	90	100	26.5	49.5	76.0	стійке

Аналіз даних свідчить, що найбільш стійким положенням є переміщення поповзом, переміщення в повний ріст і на колінах мають меншу стійкість, положення машиніста при переміщенні зігнувшись є нестійким. Кут стійкості є динамічним показником. Оцінка статичної стійкості, тобто здатності тіла пручатися порушенню його рівноваги, здійснюється по моментах інерції. Момент інерції дорівнює добутку мас всіх матеріальних точок тіла на квадрат радіуса від даної точки до осі обертання (Bakulin, 1996):

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2, \quad (7)$$

де:

m_i – маси ланок тіла, кг;

r_i – відстань від центра мас ланки по ймовірній осі або точки обертання тіла, м;

n – число основних ланок тіла (для оцінки стійкості достатньо $n = 14$).

За точку опори (обертання) тіла можна прийняти середину площі опори тіла в даній статичній позі (Рис. 7). Далі необхідно виміряти радіуси обертання всіх ланок тіла (мм). Обчислити моменти інерції ланок тіла. Моменти, що обертають тіло за годинниковою стрілкою, уважати зі знаком (+), а проти годинникової стрілки – зі знаком (-). Визначити момент сумарної інерції тіла машиніста.

Вихідні та розрахункові дані для визначення статичної стійкості представлені в Таблиці 5. Статичну стійкість тіла можна оцінити по величині знака (+ або -) моменту інерції тіла. При $J = 0$ тіло зберігає рівновагу. При $J < > 0$ тіло зберігає статичне положення за рахунок роботи певних груп м'язів. Аналіз даних (Табл. 5) показує, що сумарний момент інерції збільшується, а статична стійкість положення машиніста відповідно зменшується зі збільшенням потужності пласта, що виймається.

Таблиця 5. Вихідні та розрахункові дані для визначення моменту інерції машиніста

Ланка	Абс. маса ланки, кг	Радіус обертання, м			Момент інерції ланки,				
		У повний ріст	Зігнувшись	На колінах	Поповзом	У повний ріст	Зігнувшись	На колінах	Поповзом
Все тіло	100	—	—	—	—	—	—	—	—
Голова	7	183.15	166.50	143.19	73.26	234807.0	194056.0	143524.0	37569.2
Тулуб	43	139.86	126.54	99.90	39.96	841115.0	688532.0	429140.0	68662.5
Праве плече	3	153.18	146.52	119.88	33.30	70392.3	64404.3	43113.6	3326.6
Ліве плече	3	139.86	116.55	96.57	59.94	58682.5	40751.7	27977.3	10778.4
Праве передпліччя	2	133.20	126.54	99.90	49.95	35484.5	32024.7	19960.0	4990.0
Ліве передпліччя	2	139.86	106.56	89.91	79.92	39121.6	22710.1	16167.6	12774.4
Права кисть	1	119.88	99.90	79.92	66.60	14371.2	9980.0	6387.2	4435.5
Ліва кисть	1	149.85	113.22	99.90	99.9	22455.0	12818.8	9980.0	9980.0
Праве стегно	12	66.60	66.60	36.63	43.29	53226.7	53226.7	16101.1	-22488.0
Ліве стегно	12	89.91	73.26	49.95	49.95	97005.7	64404.3	29940.0	-29940.0
Права гомілка	5	43.29	39.96	23.31	63.27	-9370.1	-7984.0	-2716.8	-20015.0
Ліва гомілка	5	56.61	56.61	33.30	73.26	16023.5	16023.5	5544.4	-26835.0
Права стопа	2	46.62	49.95	49.95	86.58	-4346.8	-4990.0	-4990.0	-14992.0
Ліва стопа	2	33.30	33.30	26.64	99.90	2217.7	2217.7	-1419.4	-19960.0
Сума	100	—	—	—	—	1471187.0	1188176.0	738709.0	18285.6

Показники динамічної і статичної стійкості характеризують можливість втрати рівноваги машиністом у процесі переміщення по лаві та керування комбайном. Від втрати рівноваги прямо залежить імовірність одержання травми машиністом при переміщенні по лаві. У цьому зв'язку показники динамічної стійкості – кут стійкості та кут рівноваги і показник статичної стійкості – сумарний момент інерції побічно впливають на рівень травматизму машиністів при переміщенні по лаві для різних діапазонів потужності пласта, що виймається. Проведений аналіз указує на те, що ймовірність втрати рівноваги і одержання травми при переміщенні по лаві найбільш висока в положенні зігну-

вшись (потужності пласта, що виймається, $m = 1.41 - 1.80$ м) і в положенні в повний ріст ($m > 1.80$ м) більше безпечними відносно травматизму є переміщення на колінах (четверінках) ($m = 0.91 - 1.40$ м) і лежачи (поповзом) ($m = 0.7 - 0.9$ м).

2.8. Зміни рухових можливостей і деяких морфофункціональних показників ГРОВ

Важливою біомеханічною і фізіологічною характеристикою є антропометричні дані – тотальні розміри тіла людини (довжина, ширина, об'єм). Час виконання руху, наприклад одного кроку, за інших рівних умов залежить від розмірів тіла. Однак зі збільшен-

ням лінійних розмірів тіла збільшується і час окремих рухів. Максимальна частота рухів обернено пропорційна часу виконання рухів. Має місце пряма пропорційність довжини кроку l і обернена пропорційність частоти кроків n тотальним розмірам тіла h (Donskoy, 1975): $l \propto h$, $n \propto h^{-1}$. Отже, швидкість переміщення машиніста по лаві, рівна добутку довжини і частоти кроків (числа циклів у хвилину при перемі-

щенні лежачи (поповзом), не залежить від розмірів тіла. Інші показники, що характеризують рухові можливості людини, можуть бути проаналізовані подібним чином (Donskoy, 1975).

Основні, допоміжні функції, процеси і операції, виконувані ГРОВ очисного вибою в процесі комплексно-механізованої виїмки вугілля представлені в Таблиці 6.

Таблиця 6. Основні, допоміжні процеси та операції ГРОВ

Гірник	Основна функція (місце розташування при виконанні основної функції)	Допоміжні функції (супутні основний)	Допоміжні процеси і операції
ГРОВ1	Виїмка вугілля комбайном (між першим і другим (від вибою) рядами гідростійок)	<ul style="list-style-type: none"> – стежить за правильним положенням комбайна в площині пласта; – забезпечує максимальну швидкість його руху в даних умовах; – свою роботу координує з роботою ланки; – заміна зубків на початку зміни. 	<ul style="list-style-type: none"> – кінцеві операції; – заміна зубків при знаходженні комбайна в ніші; – зарубка комбайна косими заїздами.
ГРОВ2	Видвігання консольних верхняків (між першим і другим (від вибою) рядами гідростійок)	<ul style="list-style-type: none"> – стежить за правильністю укладання кабелю і шланга зрошення в ринву кабелеукладача і положенням магістральних ліній гідросистеми; – стежить за станом покрівлі. 	<ul style="list-style-type: none"> – кінцеві операції; – заміна зубків при знаходженні комбайна в ніші; – монтаж навантажувального лемеша; – кріплення лави додатковим кріпленням у зонах розмиву вугільного пласта; – зарубка комбайна косими заїздами.
ГРОВ3	Зачищення вугілля між конвеєром і вибоєм (під перекриттям висунутого консольного верхняка на відстані не менш 10 м від корпусу комбайна)	<ul style="list-style-type: none"> – стежить за правильною роботою навантажувального щитка комбайна; – дає команду ГРОВ4 на засування конвеєра до вибою. 	<ul style="list-style-type: none"> – кінцеві операції; – кріплення лави додатковим кріпленням при переході тектонічних порушень; – кріплення лави додатковим кріпленням у зонах розмиву вугільного пласта.
ГРОВ4	Пересувка ставу конвеєра (між першим і другим рядами (від вибою) гідростійок під перекриттям секцій кріплення)	<ul style="list-style-type: none"> – зачищення ґрунту між не пересуненими секціями кріплення і задвинутим конвеєром лави. 	<ul style="list-style-type: none"> – кінцеві операції; – кріплення лави додатковим кріпленням при переході тектонічних порушень; – кріплення лави додатковим кріпленням у зонах розмиву вугільного пласта.
ГРОВ5	Пересувка секцій кріплення (останній ряд гідростійок кріплення)	<ul style="list-style-type: none"> – підготовляє секції кріплення до пересувки після засувки конвеєра під вибій; – остаточна установка комплексу кріплення відповідно до паспорта; – перед розвантаженням секцій кріплення попередньо оглядається покрівля; – установка контрольних стійок в необхідних місцях; – робить зачищення і пересувку секцій. 	<ul style="list-style-type: none"> – кінцеві операції.
ГРОВ6	Зачищення лави між конвеєром і переднім рядом гідростійок секцій кріплення попереду комбайна (між переднім рядом гідростійок секцій кріплення і конвеєром лави)	<ul style="list-style-type: none"> – зачищення проходу для людей між першим і другим рядами гідростійок секцій кріплення і блоків керування. 	<ul style="list-style-type: none"> – кінцеві операції; – монтаж навантажувального лемеша; – зарубка комбайна косими заїздами.
ГРОВ 9,10,13,14	Кріплення і оформлення нижньої ніші (простір нижньої ніші)	—	– кінцеві операції.
ГРОВ 7,8,11	Кріплення і оформлення верхньої ніші (простір верхньої ніші)	—	– кінцеві операції.
Гірничий майстер зміни	Контроль і спостереження за правильністю виконання основних функцій (за межами очисного вибою)	—	—

Зміни рухових можливостей і деяких морфофункціональних показників ГРОВ із прив'язкою до конкретної технологічної операції процесу виїмки представлені Таблиці 7. Дані Таблиці 7 свідчать про те, наприклад, щодо роботи, яка вимагає більшої абсолютної сили і механічної потужності, варто залучати гірників із більшими тотальними розмірами і, напав-

ки, для виконання, роботи, що потребує високої частоти рухів і більшої відносної потужності, – залучати робітників з меншими тотальними розмірами тіла. З іншої сторони необхідно враховувати, що залучення до роботи ГРОВ із більшими тотальними розмірами тіла буде супроводжуватися більшим споживанням кисню, що можливо в добре вентиляльованих виробках.

Таблиця 7. Теоретично передбачені зміни рухових можливостей і деяких морфофункціональних показників людини при збільшенні тотальних розмірів тіла (h)

Показник (біомеханічна характеристика)	Технологічна операція процесу виїмки, що вимагає прояви характеристики	Пропорційність розмірам
Абсолютна сила	пересувка ставу конвеєра, пересувка секцій кріплення, кріплення і оформлення ніш	h^2
Відносна сила	висування консольних верхняків, зачищення вугілля	h^{-1}
Механічна потужність	переміщення по лаві	h^2
Частота рухів	переміщення по лаві та керування комбайном	h^{-1}
Висота стрибка	—	h^0
Швидкість переміщення	переміщення по лаві	h^0
Стартове прискорення	—	h^{-1}
Життєва ємність легенів	процеси і операції, що вимагають прояви абсолютної сили та механічної потужності	h^3
Легенева вентиляція	процеси і операції, що вимагають прояви абсолютної, відносної сили та механічної потужності	h^2
Споживання кисню	процеси і операції, що вимагають прояви абсолютної, відносної сили та механічної потужності	h^2
Систолічний об'єм крові	процеси і операції, що вимагають прояви абсолютної сили та механічної потужності	h^3

У подібному аналізі також можна користуватися такими характеристиками як поверхневі (площа поверхні тіла) і об'ємними (вага, об'єм) характеристиками, які відповідно пропорційні квадрату і кубу лінійних розмірів (Donskoy, 1975). Інші характеристики (Табл. 7) визначаються відповідно до даних з виправленням відповідно на квадратну та кубічну пропорційність.

Залежність загальних енерговитрат (E , ккал/хв) від ваги тіла людини (P , кг) може бути визначена відповідно до наступних виразів (Zatsiorskiy, Aleshinskiy & Yakunin, 1982):

– у положенні сидячи: $E = 0.1P^{0.6} + 1$;

– стоячи: $E = 0.05P^{0.77} + 1$;

– при переміщенні зі швидкостями до 6 км/годину: $E = 0.047P + 1.024$.

Виходячи із цього, для роботи, яка супроводжується тривалими циклічними переміщеннями, а також, яка вимагає тривалого збереження положення тіла, але не потребує великої абсолютної сили, доцільно залучати гірників з меншими тотальними розмірами тіла (вагою).

Залежність споживання кисню (V_{O_2} , л/хв) від швидкості переміщення, довжини і маси людини описується виразом (Zatsiorskiy, Aleshinskiy, & Yakunin, 1982):

$$V_{O_2} = \frac{0.39h}{0.0053h - 0.375} \cdot [1.92(0.62v)^{0.176} - 1.445] \times 2P [0.85(0.62v)^2 - 2.44v + 9.66] 10^{-5}, \quad (8)$$

де:

v – швидкість переміщення, км/год;

h – довжина тіла, см;

P – маса тіла, кг.

Важливим є урахування впливу швидкості повітряного потоку (схеми вентиляції) на величину надлишкового споживання кисню гірником у процесі виїмки вугілля. Дана залежність виражається формулою (Zatsiorskiy, Aleshinskiy, & Yakunin, 1982):

$$\Delta V_{O_2} = 0.00757v_{відн}^2, \quad (9)$$

де:

V_{O_2} – надлишкове споживання кисню, л/хв;

$v_{відн}$ – швидкість переміщення людини щодо повітряного потоку, м/с.

Кількість споживаного кисню залежить від тотальних розмірів тіла (довжини і маси), а також від швидкості подачі комбайна і руху повітряного потоку по виробці. Правилами безпеки регламентована максимальна швидкість руху повітря в діючих виробках при постійній присутності людей, що становить від 0.25 до 4 м/с (Pravila..., 2010). Залежність надлишкового споживання кисню від припустимої Правилами безпеки швидкості руху повітря в очисному вибої наведена на Рисунку 8.

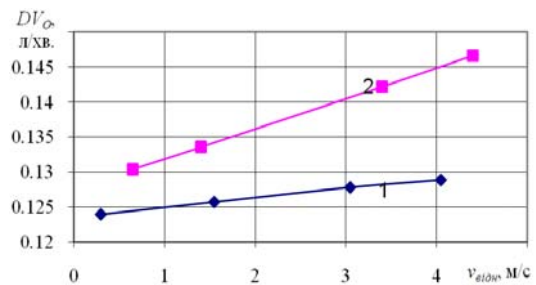


Рисунок 8. Залежність надлишкового споживання кисню від швидкості руху повітря в лаві: 1 і 2 – вибой, обладнаний традиційною технікою і технікою НТР

У вибоях, обладнаних технікою НТР (при високій швидкості подачі та відносній швидкості руху повітря), надлишкове споживання кисню вище, ніж у вибоях, обладнаних традиційною технікою. Високонавантажени лави повинні добре провітрюватися при низькій запиленості. Таким чином, у високонавантажених лавах при двосторонній виїмці та інтенсивному провітрюванні струмінь повітря, що рухається в напрямку, протилежному руху комбайна, негативно позначається на економічності переміщення машиніста.

2.9. Загальна оцінка економічності рухової діяльності ГРОВ

Для загальної оцінки економічності рухової діяльності людини застосовують показник, подібний до коефіцієнта корисної дії в загальній механіці, – коефіцієнт механічної ефективності рівний (Utkin, 1989):

$$KME = \frac{A}{E} \cdot 100\% = \frac{N}{E} \cdot 100\%, \quad (10)$$

де:

A – механічна робота, Дж;
 N – потужність, Вт;
 E – загальна кількість витраченої (метаболічної) енергії, Дж;

\dot{E} – швидкість витрати метаболічної енергії, Вт.

Механічна робота дорівнює:

$$A = F\Delta S, \quad (11)$$

де:

F – сила, Н;
 ΔS – переміщення, м.
 Потужність дорівнює:

$$N = \frac{A}{\Delta t} = \frac{F\Delta S}{\Delta t} = Fv, \quad (12)$$

де:

v – швидкість переміщення, м/с;
 Δt – інтервал часу від моменту початку до моменту закінчення дії сили, с.

Механічна робота при переміщенні людини затрачається на рух тіла як цілого і рух окремих частин тіла відносно ЗЦМ. Повна зовнішня механічна енергія переміщення людини являє собою суму зовнішньої і внутрішньої енергії:

$$E_{заг} = E_{зовн} + E_{внутр} = mgh + \frac{mv^2}{2} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i v_i^2}{2} + \frac{J_i \omega_i^2}{2} \right), \quad (13)$$

де:

m – маса людини, кг;
 h – висота ЗЦМ над нульовим рівнем, м;
 v – швидкість центра мас, м/с;
 m_i – маса i -ї ланки, кг;
 v_i – швидкість центра мас i -ї ланки, м/с;
 J_i – момент інерції ланки щодо осі обертання, що проходить через центр його мас;
 ω_i – миттєва кутова швидкість i -ї ланки.

У виразі (13) перші два доданки представляють зовнішню енергію, третій – внутрішню механічну енергію переміщення. Перший доданок являє собою енергію, спрямовану на подолання сили ваги (здійснення вертикальної роботи), другий – енергію, що витрачається на розгін або гальмування ЗЦМ (здійснення позовжньої роботи).

При переміщенні машиніста по лаві саме дана складова повної механічної енергії є “корисною”, інші доданки повної енергії з енергетичної точки зору представляють втрати енергії. При переміщенні має місце також енергія, що витрачається на рухи в поперечному напрямку. Однак у таких переміщеннях як ходьба, біг, переміщення на колінах і поповзом дана фракція енергії є несуттєвою (Zatsiorskiy, Arguin, & Seluyanov, 1981).

Користуючись результатами визначення ЗЦМ машиніста (Табл. 3), можна обчислити зовнішню енергію його переміщення при різних діапазонах потужності пласта, що виймається. Розрахункові дані наведені в Таблиці 8.

Таблиця 8. Результати розрахунку зовнішньої механічної енергії переміщення машиніста

Параметр	Переміщення			
	У повний ріст	Зігнувшись	На колінах	Поповзом
Потужність пласта, що виймається, м	1.81 – 5.00	1.41 – 1.80	0.9 – 1.4	0.70 – 0.90
Висота центра мас, м	0.98	0.87	0.58	0.25
Маса, кг	100.00	100.00	100.00	100.00
Швидкість переміщення (комплекси НТР), м/с	0.40	0.33	0.20	0.15
Швидкість переміщення (традиційні комплекси), м/с	0.125	0.108	0.075	0.047
Потенційна енергія, Дж	966.03	851.13	568.30	244.70
Кінетична енергія (комплекси НТР), Дж	8.00	5.50	2.00	1.10
Кінетична енергія (традиційні комплекси), Дж	0.78125	0.586806	0.28125	0.10
Повна механічна енергія (комплекси НТР), Дж	974.035	856.69	570.302	245.831
Повна механічна енергія (традиційні комплекси), Дж	966.82	851.72	568.58	244.82

Дані (Табл. 8) свідчать про збільшення зовнішньої механічної енергії переміщення машиніста зі збільшенням діапазонів потужності пласта, що виймається. Однак слід зазначити, що в реальних умовах у зв'язку з рекуперацією (переходом одного виду енергії в інший) зовнішня механічна енергія переміщення людини не є адитивною функцією потенційної і кінетичної енергій.

2.10. Принцип мінімуму енерговитрат

У циклічних переміщеннях, до яких відносяться всі види переміщення машиніста по лаві в процесі виймки вугілля, для характеристики економічності техніки також використовують величину енерговитрат, що приходить на 1 метр шляху (3). Найважливішим критерієм оптимальності при переміщенні

людини є економічність рухової діяльності, обернено пропорційна енергії, затрачуваної на одиницю виконаної роботи або метр пройденого шляху, а найбільш важливим принципом рухової діяльності людини є принцип мінімуму енерговитрат. При переміщенні машиніста у вибої корисною є робота на переміщення в позовжньому напрямку. Таким чином, коефіцієнт економічності (коефіцієнт корисної дії) машиніста обернено пропорційний питомим енерговитратам на одиницю шляху (на метр шляху):

$$KE = \frac{1}{\frac{E}{v}} = \frac{1}{\frac{E_0}{v} + b_1 + b_2 v}. \quad (14)$$

Формула (14) характеризує ККД машиніста виїмкового комбайна по біомеханічних характеристиках. Формула свідчить про зростання коефіцієнта економічності машиніста з ростом швидкості подачі очисного комбайна. Функція (14) має екстремум у точці оптимальної швидкості, що забезпечує мінімальні енерговитрати на 1 м шляху (максимальне значення коефіцієнта економічності). Наведені вище розрахунки вказують, що за інших рівних умов екстремум буде досягнутий при швидкості переміщення при переміщенні поповзом $v_{omn} \approx 0.7$ км/год ≈ 12 м/хв; на колінах – $v_{omn} \approx 0.97$ км/год ≈ 16 м/хв. У повний ріст – $v_{omn} \approx 3$ км/год ≈ 50 м/хв.

Нормуючи показник (14) щодо оптимальної швидкості переміщення одержимо залежність коефіцієнта економічності машиніста виїмкового комбайна від швидкості його переміщення по лаві (ККД машиніста по біомеханічних характеристиках) (Рис. 9).

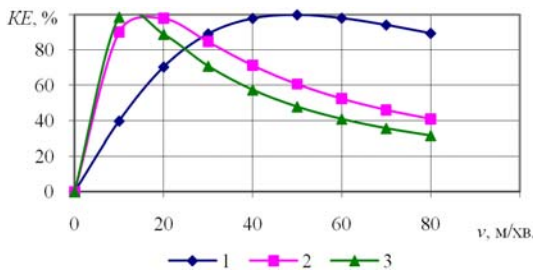


Рисунок 9. Залежність нормованого коефіцієнта економічності машиніста від швидкості переміщення по лаві: 1 – при $t > 1.8$ м, переміщення у повний ріст; 2 – при $t = 0.91 - 1.4$ м, переміщення на колінах; 3 – при $t = 0.7 - 0.9$ м, переміщення поповзом

Таким чином, для ГРОВ при малих швидкостях переміщення по лаві (при нижніх діапазонах потужності пласта, що виймається) принцип мінімуму енерговитрат порушується.

2.11. Економічність функціонування системи “машиніст – виїмковий комбайн НТР”

Кількість вугілля (гірської маси) добутого з 1 м лави може бути визначене по виразу (Kiyashko, 1992):

$$Q = mr\gamma, \quad (15)$$

де:

- m – потужність пласта, що виймається, м;
- r – ширина захвату комбайна, м;
- γ – щільність гірської маси, т/м³.

З огляду на (14) і (15) для оцінки економічності переміщення машиніста в процесі виїмки вугілля доцільно ввести показник енерговитрат машиніста на 1 тону добутого вугілля (гірської маси) або показник енергетичної вартості 1 тонни вугілля рівний:

$$\frac{E}{Q} = \frac{E}{vmr\gamma} = \frac{\frac{E_0}{v} + b_1 + b_2v}{mr\gamma}. \quad (16)$$

У свою чергу коефіцієнт економічності в цьому випадку буде дорівнювати:

$$KE = \frac{Q}{E} = \frac{vmr\gamma}{E} = \frac{mr\gamma}{\frac{E_0}{v} + b_1 + b_2v}. \quad (17)$$

Залежність коефіцієнта економічності (параметра, зворотного показнику енергетичної вартості 1 тонни вугілля) від швидкості подачі, характерної для різних діапазонів потужностей пласта, що виймається, і ширини захвату наведені на Рисунку 10.

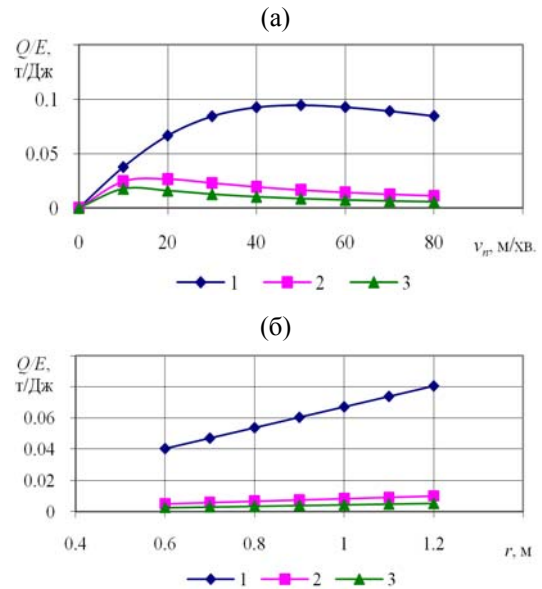


Рисунок 10. Залежність коефіцієнта економічності видобутку 1 тонни гірської маси від швидкості подачі (а) і ширини захвату виїмкового комбайна (б): 1 – при $t > 1.8$ м, переміщення в повний ріст; 2 – при $t = 0.91 - 1.4$ м, переміщення на колінах; 3 – при $t = 0.7 - 0.9$ м, переміщення поповзом

Аналіз даних вказує на зростання коефіцієнта економічності зі збільшенням як швидкості подачі, так і ширини захвату. Однак, для швидкості подачі буде досягнутий екстремум при оптимальній швидкості подачі. У свою чергу для виїмкового комбайна питомі енерговитрати (кВт год/т) на руйнування вугілля (енергоємність видобутку) визначаються за наступною методикою (Kiyashko, 1992):

$$H_w = \frac{P_{cm}}{60v_nmr\gamma}, \quad (18)$$

де:

- P_{cm} – стійка потужність двигунів комбайна, кВт;
- v_n – швидкість подачі комбайна, м/хв;
- m – потужність пласта, що виймається, м;
- r – ширина захвату комбайна, м;
- γ – щільність гірської маси, т/м³.

Таким чином, енергоємність видобутку знижується, а споживана потужність зростає зі збільшенням швидкості подачі комбайна. Економічність роботи комбайна по руйнуванню вугілля обернено пропорційна енергоємності:

$$H_w^{-1} = \frac{60v_nmr\gamma}{P_{cm}}. \quad (19)$$

Аналіз формул (18) і (19) указує на той факт, що для сучасної технології вуглевидобутку залежність економічності руйнування гірського масиву комбайном від швидкості подачі зростає лінійно, у той час як для залежності економічності переміщення машиніста від швидкості подачі має місце параболічний характер.

Елементи системи “машиніст – виїмковий комбайн НТР” у процесі виїмки вугілля функціонують послідовно. При відмові одного з елементів виключається робота іншого. У системі “машиніст – виїмковий комбайн НТР” варто розрізняти ККД окремого елемента (комбайна і людини) та ККД, що характеризує весь ланцюг перетворень енергії в даній системі. При послідовній взаємодії елементів системи загальний ККД системи дорівнює добутку часток ККД, або шаблів.

$$\eta_{заг} = \prod_{i=1}^n \eta_i, \text{ при паралельній сумі часток ККД –}$$

$$\eta_{заг} = \sum_{i=1}^n \eta_i. \text{ Коефіцієнт корисної дії системи “машиніст – виїмковий комбайн НТР” дорівнює:}$$

$$\eta = \eta_n \eta_m, \quad (20)$$

де:

η_n – коефіцієнт корисної дії машиніста;

η_m – коефіцієнт корисної дії очисного комбайна.

З огляду на (18)–(20) економічність (ефективність) функціонування системи “машиніст – виїмковий комбайн НТР” буде визначатися виразом:

$$KE_{лм} = \left(\frac{E}{Q}\right)^{-1} H_w^{-1} = \frac{mr\gamma}{E_0 + b_1 + b_2v} \cdot \frac{v_n mr\gamma}{60P_{cm}}. \quad (21)$$

На Рисунку 11 наведені залежності показника економічності функціонування системи “машиніст – виїмковий комбайн НТР” від швидкості подачі та ширини захвату комбайна.

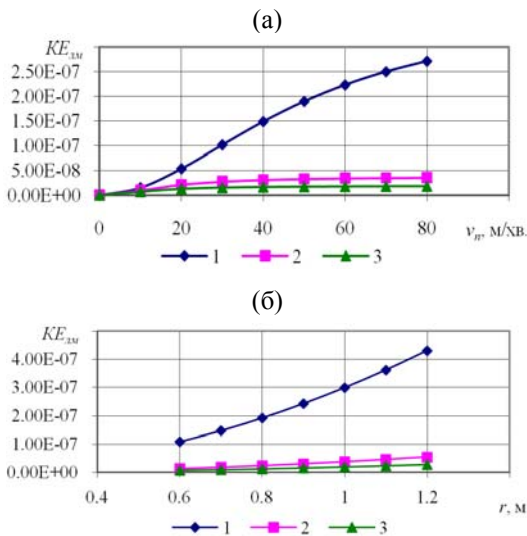


Рисунок 11. Залежність показника економічності системи “машиніст – виїмковий комбайн” від швидкості подачі (а) і ширини захвату (б): 1 – при $t > 1.8$ м, переміщення в повний ріст; 2 – при $t = 0.91 - 1.4$ м, переміщення на колінах; 3 – при $t = 0.7 - 0.9$ м, переміщення поповзом

Залежність показника економічності функціонування системи “машиніст – виїмковий комбайн НТР” від швидкості подачі найбільше точно апроксимується поліномом четвертого ступеня. Даний характер обумовлений існуванням екстремуму функціональної залежності показника економічності машиніста від швидкості його переміщення.

Таким чином, підвищення економічності функціонування системи “машиніст – виїмковий комбайн” буде мати межу, обумовлену фізіологічними можливостями машиніста. Тому з метою дотримання принципу мінімуму енерговитрат машиніста в технології комплексно-комплексно-механізованого видобутку вугілля необхідно передбачити елементи механізації процесу переміщення машиніста по лаві. Зі збільшенням ширини захвату, за інших рівних умов, показник економічності роботи системи “машиніст – виїмковий комбайн НТР” зростає у квадратичній залежності. Так, при збільшенні ширини захвату з 0.63 до 1 м показник економічності зростає в 2.7 рази. Тому, для підвищення економічності системи “машиніст – виїмковий комбайн НТР” при досягненні оптимальних значень швидкості переміщення машиніста по лаві доцільно управляти таким параметром, як ширина захвату.

3. ВИСНОВКИ

Загальні енерговитрати машиніста зростають із 315 до 1570 Вт при переміщенні поповзом, а енергетична вартість 1 м шляху знижується з 87 до 12 Дж/м при переміщенні в повний ріст, якщо швидкість подачі очисних комбайнів зростає з 3 до 24 м/хв. Квадратичний характер залежності загальних енерговитрат від величини подачі вказує на те, що переміщення по лаві з постійною швидкістю є більш економічним, чим переміщення зі змінною при однаковій середній.

Оптимальна для “ідеальних” умов швидкість переміщення машиніста по лаві за критерієм енергетичної вартості 1 м шляху при переміщенні поповзом становить 12 м/хв, на колінах – 16 м/хв, у повний ріст – 50 м/хв. Однак швидкість сильно залежить як від зовнішніх умов (потужності пласта, що виймається, положення машиніста, швидкості та напрямку руху повітря, схеми виїмки), так і від індивідуальних особливостей гірника (кваліфікації, віку, антропометричних даних).

Для оцінки комфортності умов праці доцільно ввести показник енерговитрат машиніста на 1 т добутої гірської маси. Показник економічності переміщення машиніста, обернено пропорційний енерговитратам на 1 т гірської маси, зростає в параболічній залежності зі збільшенням швидкості подачі комбайна і у лінійної – від ширини захвату. Показник змінюється в межах від 0.007 до 0.140 т/Дж зі збільшенням швидкості подачі з 3 до 24 м/хв і потужності пласта з 0.8 до 1.8 м, а в межах 0.01 – 0.20 т/Дж зі збільшенням ширини захвату з 0.63 до 0.80 м. Цей же показник необхідно використовувати при обґрунтуванні надбавок до заробітної плати за важкість умов праці гірників.

Уперше встановлені закономірності безпечного функціонування системи “машиніст – виїмковий комбайн нового технічного рівня” в умовах високонавантаженої лави, з урахуванням впливу біомехані-

чних параметрів гірників і визначені межі навантаження на лаву по цих параметрах. Коефіцієнт корисної дії (ККД) системи “машиніст – виїмковий комбайн” визначається енергоємністю комбайна і економічністю робочих прийомів машиніста, причому ККД зростає у квадратичній залежності в 2.7 рази зі збільшенням ширини захвату комбайна з 0.63 до 1 м, а залежність ККД від швидкості подачі має межу, обумовлена біомеханікою машиніста, при цьому оптимальна швидкість переміщення машиніста по лаві (для середньостатистичної людини в типових умовах) становить: при потужності пласта 0.8 – 0.9 м (переміщення поповзом) – 12 м/хв; при потужності 0.9 – 1.4 м (переміщення на колінах і ліктях) – 16 м/хв; при потужності більше 1.8 м (переміщення в повний ріст) – 50 м/хв.

Одержані результати покладені в основу методики розрахунку біомеханічних параметрів гірників у високонавантажній лаві. Методика дозволяє давати оцінку впливу біомеханічних параметрів гірників на продуктивність виїмкового комбайна та струга.

ВДЯЧНІСТЬ

Результати статті отримані при виконанні держбюджетної тематики Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова особисто автором.

REFERENCES

- Bakulin, A.S. (1996). *Biomehanika dvizheniy cheloveka*. Kuzbas: Kubanskiy gosudarstvennyi universitet fizicheskoy kulturyi, sporta i turizma.
- Bernshteyn, N.A. (1947). *O postroenii dvizheniy*. Moskva: Medgiz.
- Campbell, D.L., Coffey, C.C., & Lenhart, S.W. (2001). Respiratory Protection as a Function of Respirator Fitting Characteristics and Fit-Test Accuracy. *AIHAJ – American Industrial Hygiene Association*, 62(1), 36-44. <https://doi.org/10.1080/15298660108984607>
- Clayton, M.P. (2002). A Review of Assigned Protection Factors of Various Types and Classes of Respiratory Protective Equipment with Reference their Measured Breathing Resistances. *Annals of Occupational Hygiene*, 46(6), 537-547. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mef071>
- Coleman, P.J., & Kerkering, J.C. (2007). Measuring Mining Safety With Injury Statistics: Lost Workdays as Indicators of Risk. *Journal of Safety Research*, 38(5), 523-533. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2007.06.005>
- Donskoy, D.D. (1975). *Biomehanika*. Moskva: Prosveschenie.
- Fedotov, V.V. (1996). *Opreделение obshchego tsentra tyazhesti tela cheloveka: metodicheskie rekomendatsii k izucheniyu kursa biomehaniki dlya studentov fakulteta fizvospitaniya*. Kaliningrad: Kaliningradskiy universitet.
- Golinko, V.I., Chebryachko, S.I., Radchuk, D.I., & Chebryachko, Yu.I. (2014). Study of Aerodynamic Breathing Resistance of Dust Respirators. *Naukovyi Visnik Natsionalnoho Hirnychoho Universyrtu*, (6), 131-136.
- Golinko, V.I., Chebryachko, S.I., Chebryachko, Yu.I., & Naumov, N.N. (2014). Comparative Study of Respirator Protective Efficiency in Laboratory and in Production Environment. *Naukovyi Visnik Natsionalnoho Hirnychoho Universyrtu*, (1), 99-105.
- Golinko, V.I., Chebryachko, S.I., Yavorskaya, E.A., & Chebryachko, Yu.I. (2016). Analysis of Protective Value of Dust-fighting Respirators and its Effect on Dust Burden of Miners. *Gornyi Zhurnal*, (3), 54-59.
- Janssen, L.L., Nelson, T.J., & Cuta, K.T. (2007). Workplace Protection Factors for an N95 Filtering Facepiece Respirator. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4(9), 698-707. <https://doi.org/10.1080/15459620701517764>
- Kiyashko, I.A. (1992). *Protsessy podzemnyh gornyh robot*. Kyiv: Vyshcha Shkola.
- Laney, A.S., & Attfield, M.D. (2010). Coal Workers' Pneumoconiosis and Progressive Massive Fibrosis are Increasingly More Prevalent among Workers in Small under Ground Coal Mines in the United States. *Occupational and Environmental Medicine*, (67), 428-431. <https://doi.org/10.1136/oem.2009.050757>
- Lee, S.A., Grinshpun, S.A., & Reponen, T. (2008). Respiratory Performance Offered by N95 Respirators and Surgical Masks: Human Subject Evaluation with NaCl Aerosol Representing Bacterial and Viral Particle Size Range. *Annals of Occupational Hygiene*, 52(3), 177-185. <https://doi.org/10.1093/annhyg/men005>
- Lei, Z., Yang, J., & Zhuang, Z. (2014). Novel Algorithm for Determining Contact Area between a Respirator and a Head form. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(4), 227-237. <https://doi.org/10.1080/15459624.2013.858818>
- Page, K. (2009). Blood on the Coal: The Effect of Organizational Size and Differentiation on Coal Mine Accidents. *Journal of Safety Research*, 40(2), 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2008.12.007>
- Popov, G.I. (1998). Prognosticheskoe testirovanie sportsmenov. *Sbornik Trudov Rossiyskoy Gosudarstvennoy Akademii Fizicheskoy Kulturyi*, (3), 35-42.
- Pravyla bezpeky u vuhilnyh Shahtah. (2010). NPAOP 10.0-1.01-10. Kyiv: Minvuhleprom Ukrainy.
- Sari, M., Selcuk, A.S., Karpuz, C., & Duzgun, H.S.B. (2009). Stochastic Modeling of Accident Risks Associated with an Underground Coal Mine in Turkey. *Safety Science*, 47(1), 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2007.12.004>
- Shevchenko, V.G. (2013). *Nauchno-metodicheskie osnovyi opredeleniya gotovnosti sistem "gornorabochie – ochistnoy kompleks" k povyisheniyu bezopasnosti ugledobyichi*. Kyiv: Naukova dumka.
- Surgay, N.S., Vinogradov, V.V., & Kiyashko, Yu.I. (2001). Proizvoditelnost ochistnykh kompleksov novogo tehnikeskogo urovnya i puti ee povyisheniya. *Ugol Ukrainy*, (6), 3-5.
- Utkin, V.L. (1989). *Biomehanika fizicheskikh uprazhneniy*. Moskva: Prosveschenie.
- Yavorskiy, B.M., & Detlaf, A.A. (1976). *Spravochnik po fizike*. Moskva: Nauka.
- Zatsiorskiy, V.M., Aleshinskiy, S.Yu., & Yakunin, N.A. (1982). *Biomehanicheskie osnovyi vyinoslivosti*. Moskva: Fizkultura i sport.
- Zatsiorskiy, V.M., Aruin, A.S., & Seluyanov, V.N. (1981). *Biomehanika dvigatel'nogo apparata cheloveka*. Moskva: Fizkultura i sport.

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Аналіз та встановлення закономірностей зміни біомеханічних характеристик гірників при підземному видобутку вугілля для зниження рівня аварійності та травматизму на вугільних шахтах.

Методика. Використаний комплексний метод дослідження із застосуванням методів математичного аналізу, математичної статистики, теорії ймовірностей, теорії надійності, теорії управління, методів біомеханіки.

Результати. Виконано моделювання і аналіз впливу біомеханічних характеристик гірників на продуктивність системи “машиніст – виїмковий комбайн нового технічного рівня”. Встановлено закономірності безпечного функціонування системи “машиніст – виїмковий комбайн нового технічного рівня” в умовах високонавантаженої лави, з урахуванням впливу біомеханічних параметрів гірників і визначені межі навантаження на лаву по цих параметрах.

Наукова новизна. Вперше встановлено залежність загальних енерговитрат від величини подачі очисного комбайна, що вказує на те, що переміщення по лаві з постійною швидкістю є більш економічним, чим переміщення зі змінною при однаковій середній. Вперше для оцінки комфортності умов праці гірника введено показник енерговитрат машиніста на тону добутої гірської маси. Вперше запропоновано показник економічності переміщення машиніста, який обернено пропорційний енерговитратам на тону гірської маси, зростає в параболічній залежності зі збільшенням швидкості подачі комбайна і у лінійної – від ширини захвата.

Практична значимість. Одержані результати покладені в основу методики розрахунку біомеханічних параметрів гірників у високонавантаженої лави.

Ключові слова: біомеханічні параметри гірників, закономірності, загальні енерговитрати, економічність, зниження аварійності та травматизму

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Анализ и установление закономерностей изменения биомеханических характеристик горнорабочих при подземной добыче угля для снижения уровня аварийности и травматизма на угольных шахтах.

Методика. Использован комплексный метод исследований с применением методов математического анализа, математической статистики, теории вероятностей, теории надежности, теории управления, методов биомеханики.

Результаты. Выполнено моделирование и анализ влияния биомеханических характеристик горнорабочих на производительность системы “машинист – выемочный комбайн нового технического уровня”. Установлены закономерности безопасного функционирования системы “машинист – выемочный комбайн нового технического уровня” в условиях высоконагруженной лавы с учетом влияния биомеханических параметров горнорабочих и определены пределы нагрузки на лаву по этим параметрам.

Научная новизна. Впервые установлена зависимость общих энергозатрат от величины подачи очистного комбайна, которая указывает на то, что перемещение по лаве с постоянной скоростью является более экономичным, чем перемещение с переменной при одинаковой средней. Впервые для оценки комфортности условий работы горняков введен показатель энергозатрат машиниста на тонну добытой горной массы. Впервые предложен показатель экономичности перемещения машиниста, который обратно пропорционален энергозатратам на тонну горной массы и возрастает в параболической зависимости от увеличения скорости подачи комбайна и в линейной – от ширины захвата.

Практическая значимость. Полученные результаты положены в основу методики расчета биомеханических параметров горнорабочих в высоконагруженной лаве.

Ключевые слова: биомеханические параметры горнорабочих, закономірності, общі енергозатрати, економічність, зниження аварійності и травматизма

ARTICLE INFO

Received: 31 October 2016

Accepted: 5 December 2016

Available online: 30 December 2016

ABOUT AUTHORS

Volodymyr Shevchenko, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Vibrating Processing of Mineral Raw Materials and Scientific Secretary of the Institute, Institute of Geotechnical Mechanics named after M.S. Polyakov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Simferopolska St, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: V.Shevchenko@nas.gov.ua