

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ КОΠΑННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД КОВШЕМ ЕКСКАВАТОРА НА ЇХ ОПІР КОΠΑННЮ

А. І. Крючков, Л. І. Євтеєва

Національний технічний університет України «КПІ»

просп. Перемоги, 37, 03056, м. Київ, Україна. E-mail: l2212i@ukr.net

У результаті аналітичних та експериментальних досліджень встановлена закономірність опору гірської породи копанню ковшем екскаватора від швидкості її копання. Розрахована залежність питомого динамічного коефіцієнта опору гірської породи копанню від швидкості копання ковшем екскаватора типу мехлопата для кожної із шести категорій гірських порід за класифікацією Домбровського–Белякова.

Ключові слова: екскаватор, ківш, опір копанню, динаміка, швидкість копання, динамічний коефіцієнт опору.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ КОПАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД КОВШОМ ЭКСКАВАТОРА НА ИХ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОПАНИЮ

А. И. Крючков, Л. И. Евтеева

Национальный технический университет Украины «КПИ»

просп. Победы, 37, 03056, г. Киев, Украина. E-mail: l2212i@ukr.net

В результате аналитических и экспериментальных исследований установлена закономерность сопротивления горной породы копанию ковшом экскаватора от скорости их копания. Рассчитана зависимость удельного динамического коэффициента сопротивления горной породы копанию от скорости копания ковшом экскаватора типа механическая лопата для каждой из шести категорий горных пород по классификации Домбровского–Белякова.

Ключевые слова: экскаватор, ковш, сопротивление копанию, динамика, скорость копания, динамический коэффициент сопротивления.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Незважаючи на те, що загальний обсяг екскаваційних робіт в умовах українських кар'єрів значно знизився, проте навантаження на одиницю обладнання (в тому числі й екскаватора) залишилося на попередньому рівні, а в багатьох випадках і зросло. Але проведення порівняння розрахункових значень (за традиційними методиками) як продуктивності копання екскаватора, так і експлуатаційної змінної продуктивності екскаватора з фактичними значеннями показали їх слабку відповідність (коефіцієнт кореляції 0,18 і 0,21 відповідно).

У результаті проведеного аналізу виявилось, що продуктивність копання екскаватора не зростає пропорційно збільшенню потужності, що підводиться до гірського масиву (за рахунок збільшення швидкості і зусилля копання), як це передбачається в традиційних методиках розрахунку. Таке положення, на наш погляд, обумовлене залежністю опору гірського масиву копанню ковшем екскаватора від швидкості копання.

У зв'язку з цим, метою даної роботи є встановлення закономірності впливу швидкості копання (черпання) гірської породи ковшем екскаватора типу мехлопата на опір гірської породи копанню.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Висловлювання у вигляді гіпотези про те, що сила різання ґрунту залежить від швидкості різання неодноразово наводилися у спеціальній пресі і навіть підтверджувалися експериментами. У роботі [1] на підставі експериментів з плугом установлено, що швидкість різання впливає на силу різання, але незначно. У діапазоні зміни швидкості (0,4 ... 2,0) м/с сила різання зростає на 12 %. Ратьє [2] у діапазоні (0,05 ... 0,3) м/с не виявив такого впливу. Дослідження Н.Г. Домбровського [1] показали, що зміна швидкості ковша екскаватора від 0,4 до 1,0 м/с викликає збільшення зусилля різання на (3...6) %. Дослідження Г.І. Кліюпа під керівництвом Н.Г. Домбровського виявили, що зміна швидкості різання ґрунту від 1 до 7 м/с викликає зростання сили різання на 40 %. Експерименти з ґрунтами Ю.А. Ветрова [2] показали, що зростання опору ґрунту зі збільшенням швидкості різання відбувається як під впливом збільшення енергетичних витрат при пластичних деформаціях ґрунту, так і за рахунок витрат енергії на збільшення швидкості переміщення гірської маси в просторі ковша, тобто сила різання при збільшенні швидкості різання може бути визначена на підставі експериментальних досліджень з урахуванням статичної сили з поправкою на динамічну добавку $P_V = P_C + \Delta P_{\text{кін}}$.

При впровадженні ножа в масиві розвиваються спочатку пружні деформації, а далі утворюється пластичне ядро, що впливає на решту ґрунту. В міру збільшення поверхні контакту ножа і пластичного ядра з масивом в ґрунті виникає майданчик зсуву, на якому формується граничний напружений стан ґрунту, який призводить до зрушення і відриву від масиву елемента ґрунту. Елементи стружки ґрунту переміщуються по поверхні відділення та по передній грані ножа, причому в першому наближенні траєкторію можна прийняти прямолінійною. При цьому швидкість відкидання гранта залежить від швидкості різання, кута різання і напрямку руху стружки.

Експериментальні та аналітичні дослідження показали [1, 2, 4, 7], що залежність сили різання від швидкості різання при відділенні елемента стружки від масиву і просуванні його в ковші описується виразом

$$P_V = P_C + (K_1 V + K_2 V^2 + K_3 V^3) S, \quad (1)$$

$$\text{де } K_1 = \frac{P_C \sin \delta}{V_p \sin(\delta + \theta)}; \quad K_2 = \rho_r \frac{\sin \delta \cdot \cos \theta}{\sin(\delta + \theta)}; \quad K_3 = \frac{\rho_r}{V_p} \cdot \frac{\sin^2 \delta \cdot \cos \theta}{\sin^2(\delta + \theta)};$$

P_C – статична сила різання при швидкості різання близької до нуля, Н;

δ – кут різання, град.;

θ – кут між вектором швидкості деформування гірської породи і напрямком різання, град.;

V_p – швидкість руйнування гірської породи, м/с;

ρ_r – щільність гірської породи, кг/м³; S – поперечний переріз стружки, м².

Таким чином, залежність сили різання від швидкості різання при відділенні елемента стружки від масиву і просування його в ковші описується кубічним поліномом (1).

На підставі достатньої кількості експериментальних досліджень Н.Г. Домбровський [1] запропонував оцінювати вплив сили копання на ківш екскаватора при його впровадженні в масив гірської породи по залежності

$$P_K = K_F S, \quad (2)$$

де K_F – коефіцієнт опору гірської породи копанню, МПа;

S – площа перерізу стружки, м².

Як правило, коефіцієнт опору ґрунту копанню визначають експериментально, або шляхом розрахунку на основі параметрів, які пов'язані з величиною K_F , але також знаходяться експериментальним шляхом [1, 5].

Одним із завдань дослідження є сполучення методу розрахунку показника питомого динамічного опору породи при різних швидкостях копання з класифікацією ґрунтів і гірських порід по важкості розробки одноковшовими екскаваторами (Домбровського-Белякова) [5, 6]. У статті приведені результати дослідження для найбільш розповсюдженого на кар'єрах по видобутку будівельних матеріалів екскаватора ЕКГ–5А.

З формули (2) виходить, що коефіцієнт динамічного опору гірської породи копанню в нашому випадку буде мати вигляд

$$K_F^{\delta} = \frac{P_V + P_{np} + P_{зан}}{S}, \text{ МПа}, \quad (3)$$

де P_V – сила різання, що враховує швидкість копання V_k (1);

P_{np} – сила опору призми волочіння;

$P_{зан}$ – сила опору заповнення ковша.

Враховуючи низку залежностей – силу різання ґрунту при швидкості близькій до нуля; силу різання з врахуванням впливу швидкості копання (1); сили опору призми волочіння; сили опору заповнення ковша [7], – вираз для розрахунку коефіцієнта питомого динамічного опору гірської породи копанню набуде вигляду

$$K_F^{\delta} = K_F^c + K_1 V + K_2 V^2 + K_3 V^3, \quad (4)$$

де $K_F^c = \frac{(P_c + P_{np} + P_{зан})}{S}$ – питомий статичний коефіцієнт опору ґрунту копанню.

Процес копання ведеться по послідовній напіввільній схемі.

Комп'ютерні розрахунки питомого динамічного опору гірської породи копанню виконані для кар'єрних екскаваторів при різних швидкостях копання для різних категорій порід. При цьому початковими даними для розрахунку є конструктивні параметри ковша, властивості породи, умови взаємодії ковша з ґрунтом.

Для різних категорій порід початкові дані до розрахунку опору порід копанню зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Початкові дані до розрахунку опору порід копанню

Категорії порід	V_k	0	2	4	6	8	10
II	K_F^{\max}	0,18	0,21	0,25	0,31	0,41	0,54
	K_F^{cp}	0,14	0,162	0,198	0,25	0,335	0,46
	K_F^{\min}	0,1	0,115	0,145	0,19	0,26	0,38
III	K_F^{\max}	0,25625	0,3	0,3625	0,44	0,56	0,69
	K_F^{cp}	0,2	0,2375	0,28425	0,345	0,43625	0,5585
	K_F^{\min}	0,14375	0,176	0,206	0,25	0,3125	0,427
IV	K_F^{\max}	0,35625	0,42	0,49	0,58	0,68125	0,825
	K_F^{cp}	0,290625	0,34125	0,404375	0,4775	0,569125	0,696
	K_F^{\min}	0,225	0,2625	0,31875	0,375	0,457	0,567
V	K_F^{\max}	0,5	0,57	0,65	0,755	0,875	1,05625
	K_F^{cp}	0,409375	0,47094	0,5415	0,6275	0,7375	0,8875
	K_F^{\min}	0,31875	0,371875	0,433	0,5	0,6	0,71875
VI	K_F^{\max}	1,02	1,133	1,25	1,3875	1,54375	1,725
	K_F^{cp}	0,76625	0,84775	0,94375	1,0625	1,198375	1,3625
	K_F^{\min}	0,5125	0,5625	0,6375	0,7375	0,853	1

Результати розрахунку питомого динамічного коефіцієнта опору ґрунту копанню приведені на рис. 1 для різних категорій гірських порід по класифікації Домбровського-Белякова. Як бачимо з приведених результатів розрахунку, традиційні значення питомого коефіцієнта опору гірської породи копанню можна використовувати тільки при зміні швидкості копання від 0 до 1 м/с. Для більших швидкостей необхідно обов'язково враховувати залежність опору ґрунту від швидкості копання. Для розрахунку рекомендована залежність (4), коефіцієнти K_1 , K_2 , K_3 для якої приведені в табл. 2. Розраховувався максимальний, середній та мінімальний опори для кожної категорії порід. Аналогічні розрахунки виконані для екскаваторів ЕКГ–8 та ЕКГ–12,5.

При зміні швидкості копання до 3 м/с (робочий діапазон для екскаватора ЕКГ-5А) відношення динамічного коефіцієнта опору копанню до статичного прийме вигляд

$$\frac{K_F^d}{K_F^c} = 1 + K_1'V + K_2'V^2 + K_3'V^3, \quad (5)$$

де $K_1' = 0,0682$; $K_2' = 0,0041$; $K_3' = 0,0003$, для всіх шести категорій гірських порід.

Тоді динамічний коефіцієнт опору копанню ґрунту для будь-якої категорії ґрунтів можна розрахувати за виразом

$$K_F^d = K_F^c (1 + K_1'V + K_2'V^2 + K_3'V^3), \text{ МПа}, \quad (6)$$

з максимальною похибкою менше 5 %.

Таблиця 2 – Коефіцієнти K_1 , K_2 , K_3 для розрахунку питомого динамічного коефіцієнта опору ґрунту копанню

Категорія порід		K_1	K_2	K_3
II	max	0,0123	0,0005	0,0002
	mid	0,0108	0,00003	0,0002
	min	0,0093	-0,0005	0,0002
III	max	0,0162	0,0023	0,0001
	mid	0,0182	-0,00006	0,0002
	min	0,0206	-0,0025	0,0003
IV	max	0,0324	-0,0003	0,0002
	mid	0,0265	-0,0002	0,0002
	min	0,0206	-0,0001	0,0001
V	max	0,0367	-0,0007	0,0003
	mid	0,0315	-0,0005	0,0002
	min	0,0263	-0,0002	0,0002
VI	max	0,054	0,0005	0,0001
	mid	0,037	0,0017	0,0001
	min	0,0201	0,0028	0,00001

Таким чином, встановлену закономірність впливу швидкості копання гранта ковшем екскаватора на величину коефіцієнта опору копанню необхідно обов'язково враховувати при розрахунках продуктивності копання, зусиль копання та енергетичних показників процесу.

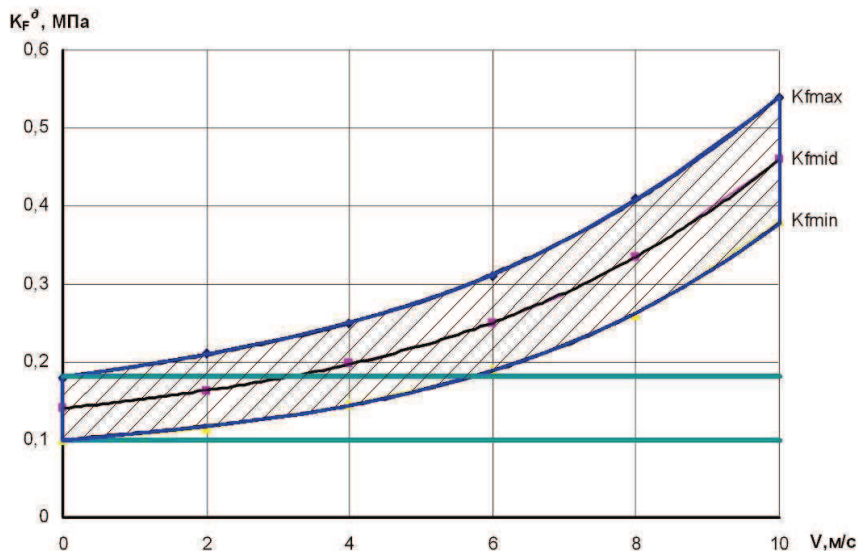
ВИСНОВКИ.

1. У результаті аналітичних та експериментальних досліджень встановлена закономірність, що опір гірської породи копанню ковшем екскаватора нелінійно зростає з ростом швидкості копання та описується кубічним поліномом у реальному діапазоні зміни швидкості.

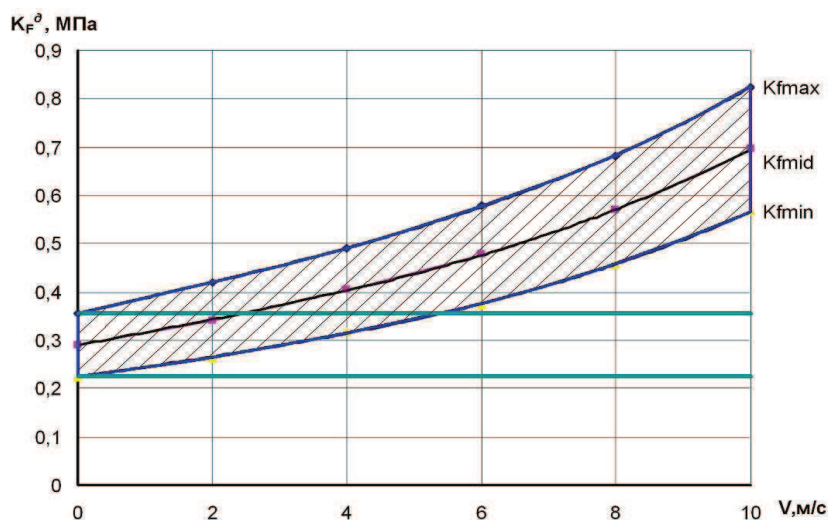
2. Використовуючи одержану закономірність, розрахована залежність (4) питомого динамічного коефіцієнта опору гірської породи копанню від швидкості копання ковшем екскаваторів ЕКГ-3,2, ЕКГ-4,6, ЕКГ-5А, ЕКГ-8И, ЕКГ-12,5 та ЕКГ-20 для кожної з шести категорій ґрунтів і гірських порід в залежності від важкості розробки одноковшовими екскаваторами у відповідності з класифікацією Домбровського-Белякова. Встановлено, що величина K_F^d майже співпадає з названою класифікацією тільки в діапазоні швидкості копання $V_k = 0 \dots 1$ м/с. При більших швидкостях опір ґрунту копанню значно зростає по поліноміальній кубічній залежності.

3. Для екскаватора ЕКГ–5А запропонована єдина залежність $K_F^d = f(K_F^c, V_k)$

(б) для всіх категорій порід, що значно спрощує методику розрахунку опору гірської породи копанню ковшем екскаватора.



а)



б)

Рисунок 1 – Залежність питомого динамічного коефіцієнта опору ґрунту копанню від швидкості копання: а) II категорія порід; б) IV категорія порід

ЛІТЕРАТУРА

1. Домбровский Н.Г. Экскаваторы. – М.: Машиностроение, 1969. – 261 с.
2. Ветров Ю.А. Расчет сил резания и копания грунтов. – К.: Издательство Киевского университета, 1965. – 166 с.
3. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. – М.: Недра, 1971. – 236 с.
4. Зеленин А.Н. Резание грунтов. – М.: Издат АН СССР, 1959. – 569 с.
5. Беляков Ю.И. Проектирование экскаваторных работ. – М.: Недра. 1983. – 349 с.

6. Беляков Ю.И. Выемочно-погрузочные работы на карьерах. – М.: Недра. 1987. – 268 с.

7. Динамика изменения коэффициента сопротивления горной породы при копании ковшом экскаватора / Л.И. Евтеева, А.И. Крючков // Тези X Всеукраїнської наукової конференції студентів, магістрів та аспірантів «Сучасні проблеми екології та геотехнології», 10–12 квітня 2013 р. – Житомир.: Житомирський держ. технолог.ун-т., 2013. – С. 332.

INFLUENCE OF SPEED OF DIGGING OF MOUNTAIN BREEDS OF EXCAVATOR BUCKET ON THEIR RESISTANCE TO DIGGING

A. Kruchkov, L. Evteeva

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"
prosp. Peremohy, 37, 03056, Kyiv, Ukraine

As a result of analytical and experimental researches is set the law of resistance of mountain breed to digging of excavator bucket from speed of her digging. It is calculated dependence of specific dynamic coefficient of resistance of mountain breed to digging from speed of digging of excavator bucket of type of shovel for each of six categories of mountain breeds for classifications of Dombrovsky-Belyakov.

Key words: power-shovel, bucket, resistance to digging, dynamics, speed of digging, dynamic coefficient of resistance.

REFERENCES

1. Dombrovsky, N.G. (1969) *Ekskavatory* [Diggers], Mashinostroyeniye, Moscow, USSR.
2. Vyetrov, U.A. (1965) *Raschet sil rezaniya i kopaniya gruntov* [Calculation of cutting forces digging soil], Izd. Kyevsogo universiteta, Kyev, USSR.
3. Vyetrov, U.A. (1971) *Rezaniye gruntov zemleroynymi mashinami* [Digging ground machines], Nedra, Moscow, USSR.
4. Zelenin, A.N. (1959) *Rezaniye gruntov* [Ground machines], Izdat. AN SSSR, Moscow, USSR.
5. Belyakov, U.I. (1983) *Proektirovaniye ekskavatornyh rabot* [Design excavation], Nedra, Moscow, USSR.
6. Belyakov, U.I. (1987) *Vyemochno-pogruzochnye raboty na karerakh* [Excavation and loading work in the quarries], Nedra, Moscow, USSR.
7. Evteeva, L.I., Kryuchkov, A.I. (2013) "Dynamics of change in the resistance coefficient of rock in co-pany backhoe", *Proceedings of X All-Ukrainian Conference of Students, masters and PhD students "Modern Problems of Ecology and Geotechnology"*, April 10–12, Zhytomyr State. tehnoloh.un-t., p. 332.

Стаття надійшла 28.11.2014.