

## ТРИБОЛОГИЯ

УДК 621. 878

ЗАКОНОМІРНІСТЬ ЗМІНИ РЕСУРСУ РІЗАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ  
АВТОГРЕЙДЕРІВ

Є.С. Венцель, проф., д.т.н., О.В. Щукін, доц., к.т.н.,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* Розроблено математичну модель, що описує закономірності зносу ножа і враховує вплив різних режимів експлуатації автогрейдера при його роботі з різними ґрунтами з різним ступенем абразивності. Отримано залежність зміни ресурсу ножа від часу його контакту з ґрунтами трьох категорій.

*Ключові слова:* ресурс, безвідмовна робота, знос, робоче обладнання, ґрунт.

ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ РЕСУРСА РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
АВТОГРЕЙДЕРОВ

Е.С. Венцель, проф., д.т.н., А.В. Щукин, доц., к.т.н.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

*Аннотация.* Разработана математическая модель, описывающая закономерности износа ножа и учитывающая влияние различных режимов эксплуатации автогрейдера при его работе с различными ґрунтами с разной степенью абразивности. Получена зависимость изменения ресурса ножа от времени его контакта с ґрунтами трех категорий.

*Ключевые слова:* ресурс, безотказная работа, износ, рабочее оборудование, ґрунт.

REGULARITY OF CHANGE OF MOTOR-GRADERS CUTTING ELEMENTS  
RESOURCE

Ye. Ventsel, Prof., D. Sc. (Eng.), A. Shchukin, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.),  
Kharkiv National Automobile and Highway University

*Abstract.* The mathematical model describing the regularities of blade wear and taking into account the influence of different modes of grader operation by working with various soils with different abrasiveness degrees has been developed. The dependence of changes in blade resource on time of its contact with soils of three categories has been obtained.

*Key words:* resource, no-failure operation, wear, working equipment, soil.

## Вступ

Під час дослідження роботи автогрейдерів виявлено, що значна кількість відмов пов'язана з виходом з ладу робочого обладнання. При цьому, як свідчать дані [1, 2 та ін.], до 90 % відмов зумовлені швидким зносом різальних елементів робочих органів (РО).

Як відомо, експлуатація автогрейдерів відбувається в різних умовах. При цьому окремі робочі операції відрізняються одна від одної схемами прикладання зовнішніх навантажень, тому по-різному формується навантаженість вузлів. Отже, статистичні характеристики навантаженості в загальному випадку можуть бути постійними. Разом з тим візь-

мемо до уваги, що в кожному випадку сума накопичених втомних пошкоджень не залежить від послідовності виникнення навантажувальних режимів. Це дозволяє подати роботу автогрейдера такою, що складається з окремих типових режимів навантаження, які визначаються так само певними ґрунтовими умовами. Основна частина часу роботи автогрейдера припадає на режими, за яких його РО здійснює відносно повільні вертикальні й кутові переміщення.

### Аналіз публікацій

Результати експериментальних досліджень, що проводяться з РО автогрейдерів в умовах зв'язних однорідних ґрунтів, показують суттєві високочастотні коливання сил різання [3]. У реальних умовах під час різання ґрунту широкими ножами наявний не один скол ґрунту, а послідовність відколів, що відбуваються одночасно. Пульсації, що є причиною цього, не можуть бути виявлені через їх демпфірування масами робочого обладнання.

На числові характеристики (математичне очікування, дисперсія та ін.) випадкового процесу сумарного навантаження ножа автогрейдера впливають тільки числові характеристики міцнісних показників ґрунту. Через досить повільну зміну міцнісних показників однорідних ґрунтів можна подати їх вплив дискретним набором характеристик. При цьому в кожному конкретному випадку параметри ґрунтових умов є незмінними.

Разом з тим відомо, що РО автогрейдерів працюють у вельми несприятливих умовах. При цьому найбільш яскраво вираженим процесом, який впливає на довговічність РО, є зношування. У свою чергу, знос РО автогрейдерів, головним чином, залежить від абразивності ґрунтів, тобто їх здатності змінювати поперечний переріз різальних елементів, що в кінцевому підсумку призводить до проведення процедури з їх відновлення або, в гіршому випадку, – до відколу різальної частини з подальшою заміною всього ножа. При цьому абразивність ґрунтів зростає зі збільшенням вмісту, розміру та закріплених кварцових частинок (оксиду кремнію  $\text{SiO}_2$ ) [3]. До того ж, як встановлено в [4], зі збільшенням щільності ґрунту знос РО може збільшитися в 5 разів (особливо за малого вмісту глинистих частинок), що негативно впливає на ресурс ножів РО.

### Мета і постановка завдання

Метою цієї роботи є визначення взаємозв'язку ресурсу зі зносом ножа робочого обладнання автогрейдера за різних динамічних і знакозмінних навантажень.

### Закономірність зміни ресурсу різальних елементів робочих органів автогрейдерів

Одними з основних показників надійності РО автогрейдера є ймовірність безвідмовної роботи і ресурс.

Все експлуатаційне навантаження робочого обладнання автогрейдера можна розкласти на складові, що класифікуються за характерними ознаками [5]. У першу чергу необхідно розглянути такі складові:

$P(P_{\text{дин}})$  – ймовірність безвідмовної роботи ножа, залежна від максимального навантаження, що діє на крайку ножа;

$P(h_{\text{зн}})$  – ймовірність, що залежить від величини, на яку змінилася товщина ножа внаслідок зношування;

$P(P_{\text{зн}})$  – ймовірність, що залежить від знакозмінного навантаження.

Знаючи їх вплив на ймовірність безвідмовної роботи всього робочого обладнання автогрейдера, з'являється можливість внести певні корективи на етапі проектування ножа.

Тоді, згідно з [5], знайдемо сумарну ймовірність безвідмовної роботи ножа автогрейдера

$$P_{\Sigma} = P(P_{\text{дин}}) \cdot P(h_{\text{зн}}) \cdot P(P_{\text{зн}}). \quad (1)$$

Насправді ж імовірності  $P(P_{\text{дин}})$ ,  $P(h_{\text{зн}})$  та  $P(P_{\text{зн}})$  взаємопов'язані між собою таким чином: при зносі робочої поверхні ножа на величину  $h_{\text{зн}}$  змінюється переріз ножа, а отже, і його несуча здатність. У свою чергу, від останньої залежить максимальне значення зусилля на кромці ножа, яке він може витримати. Від несучої здатності залежить також імовірність  $P(P_{\text{зн}})$ .

В результаті досліджень процесів різання, зарізу, стопоріння й удару автогрейдера об перешкоду, що важко долається, було виконано оцінку навантаженості РО. Крім того, було проведено дослідження впливу кута установки відвала у плані на величину максимального зусилля на кромці ножа відвала при ударі об перешкоду, що важко долається.

На рис. 1 наведено отриманий нами розрахунковим шляхом графік зміни максимального зусилля  $P_{\max} = \max(R_x)$  на кромці ножа відвала при ударі об перешкоду, що важко долається, залежно від кута установки відвала у плані  $\alpha$  для трьох категорій ґрунту.

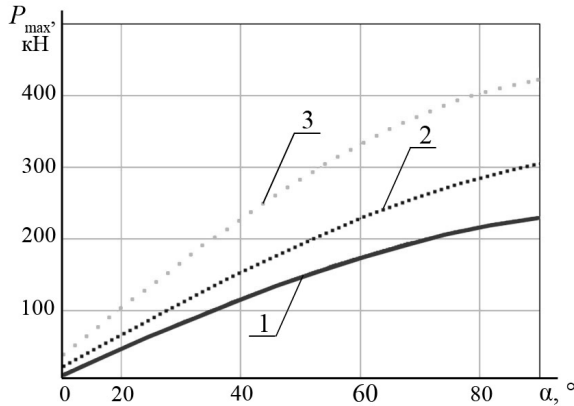


Рис. 1. Залежність  $P_{\max}$  від кута захвату відвала  $\alpha$ : 1 – I категорія ґрунту; 2 – II категорія; 3 – III категорія

Апроксимувавши залежність  $P_{\max} = f(\alpha)$ , подану на рис. 1, отримаємо

$$P_{\max}(\alpha) = A \cdot \sin\left(B \cdot \frac{\alpha - C}{80}\right) + D, \quad (2)$$

де коефіцієнти  $A$ ,  $B$ ,  $C$  і  $D$  отримані на підставі апроксимації залежності  $P_{\max} = f(\alpha)$ , поданої в табл. 1.

Таблиця 1 Значення коефіцієнтів  $A$ ,  $B$ ,  $C$  і  $D$

Категорія ґрунту	$A$	$B$	$C$	$D$
I	250	1,2	5	-10
II	305	1,25	10	20
III	380	1,4	12	50

Згідно з [4] будемо розглядати перші 700 годин роботи ножа у ґрунті. Тоді залежність зносу ножа автогрейдера як випадкова функція напрацювання в загальному випадку може бути подана у вигляді  $h(t) = a_u t^\beta + b_u$  (рис. 2). У цьому рівнянні при розрахунках були використані статистичні дані, отримані авторами під час експлуатації автогрейдерів. При цьому було взято, що показник  $\beta = 1/2$ ,  $b_u = 0$  [6].

Із графіка на рис. 2 видно, що у перші 50–100 годин роботи знос відбувається інтенсивно і

лінійно. Далі знос поступово квазістабілізується, а потім, після 500–600 годин, починає зростати з більшою швидкістю. Відповідно швидкість зношування ножа автогрейдера для кожної категорії ґрунту може бути визначена як  $v = dh_{\text{зн}}/dt$  [7].

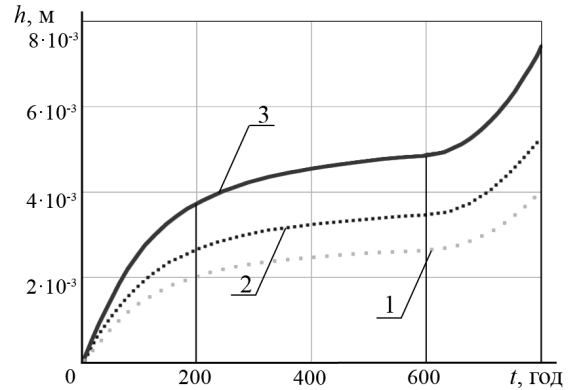


Рис. 2. Графік залежності величини зносу  $h$  від напрацювання  $t$  для трьох різних категорій ґрунту: 1 – I категорія ґрунту; 2 – II категорія; 3 – III категорія

У рівнянні (1) перший множник, що стосується ймовірності безвідмовної роботи ножа і залежить від максимального навантаження, був перетворений таким чином:

$$P(P_{\text{дин}}) = 1 - \frac{1}{2\pi S_x \sigma_v} \times \int_0^v \int_0^{R_x} e^{-\left[ \frac{(P - \bar{P})^2}{2S_x^2} + \frac{v^2}{2\sigma_v^2} \right]} dP dv. \quad (3)$$

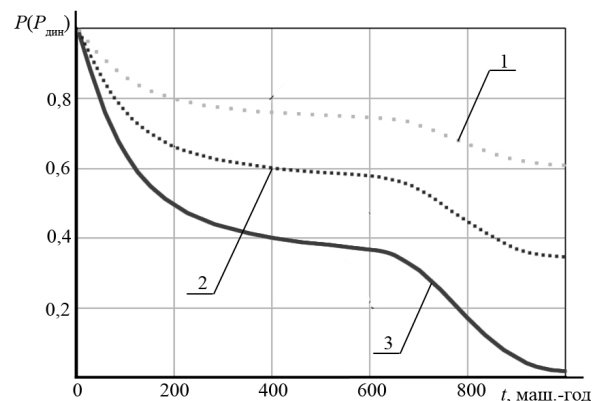


Рис. 3. Графік зміни ймовірності безвідмовної роботи ножа автогрейдера  $P(P_{\text{дин}})$  від часу його роботи в абразивному середовищі  $t$ , год: 1 – I категорія ґрунту; 2 – II категорія; 3 – III категорія

На рис. 3 показано залежності ймовірності безвідмовної роботи ножа автогрейдера  $P(P_{\text{дин}})$  від часу його експлуатації в абразивному середовищі, які отримані на підставі застосування нормального закону розподілу (3).

Падаюча характеристика графіків на рис. 3 свідчить про зниження ймовірності безвідмовної роботи ножа  $P(P_{\text{дин}})$  у процесі експлуатації робочого обладнання автогрейдера.

У результаті апроксимації залежності ймовірності  $P(P_{\text{дин}})$  від часу роботи ножа в абразивному середовищі  $t$  (рис. 3) отримано залежність

$$P(P_{\text{дин}}) = 1 - 0,02 \cdot t^{1/z}, \quad (4)$$

де  $z = 2,4; 2,13; 2$  – для I, II і III категорій ґрунту відповідно.

Розроблена математична модель сумарної ймовірності (1) дозволяє отримати теоретичний опис зміни ймовірності безвідмовної роботи робочого обладнання автогрейдера у процесі виконання робочих операцій та описати зміну ресурсу роботи ножа автогрейдера. Виходячи з узятих до уваги припущень, як було сказано вище, запропоновано розглядати ймовірність безвідмовної роботи як мультиплікативну функцію ймовірностей, кожен аргумент якої залежить від аргументу іншої ймовірності. Тоді сумарна ймовірність безвідмовної роботи ножа автогрейдера становитиме

$$P_{\Sigma} = P(P_{\text{дин}}) \times \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ \Phi \left[ \frac{P_{-1}^{\max} - m(P_{-1})}{\sqrt{2D(P_{-1})}} \right] - \Phi \left[ \frac{P_{-1}^{\min} - m(P_{-1})}{\sqrt{2D(P_{-1})}} \right] \right] \right\} \times \left\{ \Phi \left[ \frac{\frac{I_{\text{гр}}}{T^{\beta}} - m(a_u)}{\sqrt{D(a_u)}} \right] \right\}, \quad (5)$$

де  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – функція Лапласа,

$P_{-1} = P_{0-1} - R_x$ ;  $P_{0-1}$  – несуча здатність за втомного навантаження;  $R_x$  – діюче навантаження на кромку ножа;  $m(P_{-1})$  – математичне очікування (середнє значення) межі різниці несучої здатності ножа автогрейдера і максимального навантаження;  $D(P_{-1})$  – середньо-

квадратичне відхилення межі різниці несучої здатності й максимального навантаження.

У залежності  $h(t) = a_u t^{\beta} + b_u$  розглянемо випадок граничного зносу. Для цього у формулу зносу замість  $h(t)$  підставимо значення граничного зносу  $I_{\text{гр}}$  і розв'яжемо отримане рівняння відносно  $t=T$  при  $b_u = 0$ . Тоді ресурс ножа буде мати такий вигляд

$$T = \sqrt[\beta]{\frac{I_{\text{гр}}}{a_u}}, \quad (6)$$

де  $I_{\text{гр}}$  – граничний знос ножа.

На рис. 4 наведено графік-поверхню  $P_{\Sigma} = f(P(P_{\text{max}}), P(h_{\text{зн}}))$ , побудовану з використанням залежності (1).

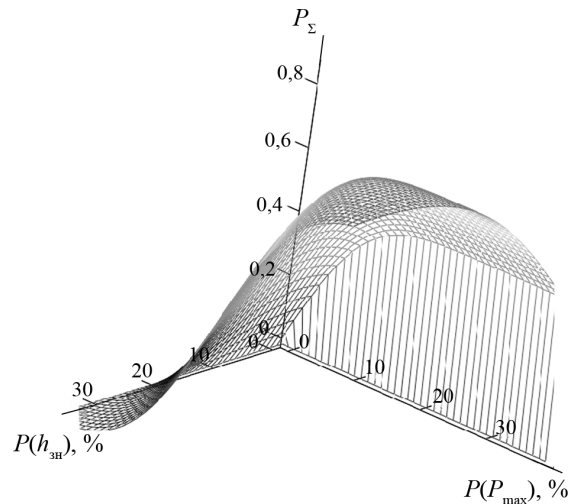


Рис. 4. Залежність зміни сумарної ймовірності безвідмовної роботи  $P_{\Sigma}$  від  $P(P_{\text{max}})$  і  $P(h_{\text{зн}})$

Апроксимуючи залежність сумарної ймовірності безвідмовної роботи робочого обладнання  $P_{\Sigma}$  від ймовірностей  $P(P_{\text{max}})$  і  $P(h_{\text{зн}})$ , було отримано:

$$P_{\Sigma} = 0,2 + 1,08P(P_{\text{max}}) + 0,24P(h_{\text{зн}}) - 0,13P(P_{\text{max}})^2 - 0,08P(h_{\text{зн}})^2 + 0,846P(P_{\text{max}})P(h_{\text{зн}}). \quad (7)$$

Таким чином, отримано залежність ймовірності безвідмовної роботи ножа, до якої увійшли параметри зносу, динамічне і знакозмінне навантаження (рис. 4). Слід також мати на увазі, що рівняння регресії  $P_{\Sigma} = f(P(P_{\text{max}}), P(h_{\text{зн}}))$  є дійсним тільки в межах тих дослід-

них даних, зокрема величини зносу, на підставі яких їх було отримано. Якщо значення вийдуть за межі дослідних даних, то в цьому випадку прогноз імовірності безвідмовної роботи ножа може містити значні помилки. Для розширення меж застосування рівнянь їх необхідно будувати на основі даних за декількома або всіма сучасними моделями об'єктів одного функціонального призначення.

Знаючи сумарну ймовірність безвідмовної роботи, знайдемо ресурс ножа автогрейдера. Для цього необхідно розв'язати рівняння (5) відносно величини  $T$ .

Функція Лапласа обчислюється тільки за допомогою спеціальної таблиці. Отже, рівняння (5) не можна розв'язати аналітично. Тому, використовуючи оператори MATLAB  $\text{erf}(x)$ , розв'яжемо чисельно це рівняння для сумарної ймовірності. Беручи до уваги нелінійність зміни величини зносу ножа від часу роботи  $h_{\text{зн}}=f(t)$  в абразивному середовищі під час виконання робочих операцій (рис. 2), одержимо ресурс роботи ножа робочого обладнання автогрейдера як функцію  $T=f(t)$  (рис. 5) для трьох категорій ґрунту.

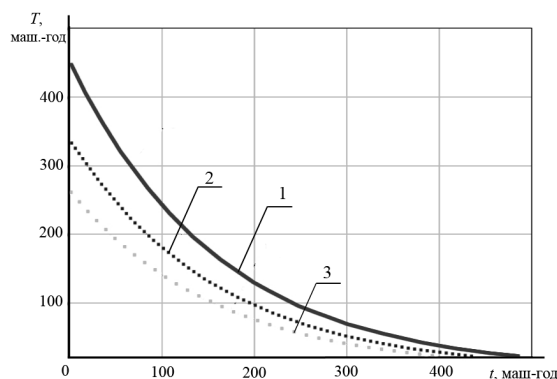


Рис. 5. Залежність ресурсу ножа  $T$  від часу його роботи в абразивному середовищі  $t$ : 1 – I категорія ґрунту; 2 – II категорія; 3 – III категорія

Із графіків на рис. 5 видно, що чим нижче категорія ґрунту, тим вище ресурс роботи ножа в цьому ґрунті.

Апроксимуючи залежність ресурсу ножа від часу його роботи в абразивному середовищі, отримаємо таку експоненційну залежність

$$T(t) = x \cdot e^{-\frac{t}{160}}, \quad (7)$$

де коефіцієнт  $x=447; 340; 260$  – для I, II і III категорій ґрунту відповідно.

Отримане рівняння не суперечить класу рішень мультиплікативного рівняння (5) для сумарної ймовірності безвідмовної роботи ножа РО автогрейдера.

### Висновки

Закономірність зміни ресурсу від зносу ножа РО автогрейдера носить експоненційний характер. При цьому чим вище категорія ґрунту, тим знос, а отже і ресурс, менше.

### Література

1. Густов Ю.И. Повышение износостойкости рабочих органов и сопряжений строительных машин / Ю.И. Густов // Механизация строительства. – 1996. – №5. – С. 15–16.
2. Кравченко И.Н. Износостойкие материалы для восстановления деталей рабочих органов строительных и дорожных машин / И.Н. Кравченко, В.Ю. Гладков, С.В. Карцев, В.П. Тростин // Строительные и дорожные машины. – 2004. – №5. – С. 32–34.
3. Волков Д.П. Надёжность роторных траншейных экскаваторов / Д.П. Волков, С.Н. Николаев, И.А. Марченко. – М.: Машиностроение, 1972. – 270 с.
4. Рейш А.К. Повышение износостойкости строительных и дорожных машин / А.К. Рейш. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
5. Анилович В.Я. Надёжность машин в задачах и примерах / В.Я. Анилович, А.С. Гринченко, В.Л. Литвиненко. – Х.: Око, 2001. – 318 с.
6. Волков Д.П. Надёжность строительных машин и оборудования : учебное пособие / Д.П. Волков, С.Н. Николаев. – М.: Высшая школа, 1979. – 400 с.
7. Бараян А.Г. Повышение износостойкости и долговечности ножей куттеров при самозатачивании: дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.04 / Бараян Ананий Генрикович. – Ставрополь, 2000. – 181 с.

Рецензент: І.Г. Кириченко, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 20 квітня 2016 р.