

І.М. Рудько, к.т.н.
Б.Я. Бакай, к.т.н., доц.
Ю.І. Цимбалюк, к.т.н.
В.М. Гобела, ст. викладач

Національний лісотехнічний університет України

Техніко-технологічне оцінювання ефективності використання бульдозерного обладнання в лісоексплуатаційних умовах

Розглянуто методологічні аспекти оптимального вибору бульдозерного технологічного обладнання, яке експлуатують у природно-виробничих умовах лісогосподарських підприємств. З урахуванням техногенного впливу на навколишнє середовище, технічної й технологічної придатності зазначеного обладнання наведено рекомендації щодо його раціонального вибору за такими критеріями: продуктивність, собівартість виконання робіт та відносні виробничі витрати (узагальнений показник). Сформовано перелік показників і розроблено прикладне програмне забезпечення для виконання інженерних розрахунків, яке дозволяє, заощаджуючи ресурси, оперативно оцінювати параметри працездатності технологічного обладнання, необхідні для прийняття зваженого рішення. У процесі проведення технологічного і техніко-економічного оцінювання ефективності використання бульдозерного обладнання та розроблення системи автоматизованого розрахунку його експлуатаційних параметрів як базову методологічну основу використано аналітичний метод визначення опору розроблення ґрунту й експериментально-аналітичний метод визначення опору переміщенню землерійно-транспортувальної машини.

Прогнозування експлуатаційних властивостей технологічного обладнання в лісоексплуатаційних умовах проведено за рахунок комп'ютерного моделювання та раціонального вибору відповідних моделей із наявного парку машин з урахуванням складності поставленого завдання (обсягу робіт, тривалості процесу будівництва, ґрунтових і кліматичних умов, відстаней транспортування ґрунту тощо), техніко-економічних й експлуатаційних показників роботи (зокрема, наявності модернізованих робочих органів тощо).

Сформульовано низку основних тенденцій щодо підвищення ефективності використання бульдозерного технологічного обладнання в лісоексплуатаційних умовах. Запропоновано окремі рішення, які можуть бути впроваджені галузевими фахівцями у їх професійній інженерній діяльності (у галузі виробництва й експлуатації спеціалізованих машин та обладнання).

Ключові слова: бульдозерне обладнання; експлуатаційні властивості; ефективність роботи.

Актуальність теми. Відомо, що в Україні надзвичайно актуальною є потреба збільшення щільності (густоти) лісових дорожніх мереж, якісного поліпшення технічного стану лісових доріг зокрема та ефективності господарських перевезень в цілому, а також використання можливостей застосування сучасних систем лісових машин. Тому лісогосподарські підприємства зобов'язані у найближчій перспективі суттєво інтенсифікувати процеси дорожнього будівництва та реконструкції. Заплановане збільшення обсягів будівництва передбачатиме також розширення сфери робіт, пов'язаних з переміщенням значних мас ґрунту і експлуатуванням спеціального технологічного обладнання.

Більшість об'єктів лісової дорожньої інфраструктури галузеві лісогосподарські підприємства споруджують та обслуговують власними силами. При цьому в багатьох лісгоспах фактично відсутній необхідний комплекс дорожньої будівельної техніки, тому окремі дорожні роботи виконують із застосуванням спеціального обладнання та машин, які беруть в оренду в дорожньо-будівельних організаціях й у приватних підприємств.

Зважаючи на те, що в умовах вітчизняного лісопромислового виробництва не менше як половину обсягів земляних робіт в умовах рівнинного чи горбистого рельєфів виконують із застосуванням бульдозерного технологічного обладнання (в умовах гірського рельєфу – за допомогою екскаваторів), проблематика раціонального застосування технічних комплексів для виконання дорожніх земляних робіт є надзвичайно актуальною з огляду як на наявні техніко-технологічні, так й економічні аспекти проблеми. В цілому підвищення ефективності роботи й обґрунтування оптимального вибору моделей технологічного обладнання землерійно-транспортувальних машин є однією з актуальних проблем прикладної механіки, яка потребує вирішення з огляду на нагальну потребу зниження матеріальних і енергетичних затрат для процесів відомчого дорожнього будівництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі проведеного огляду літературних джерел [1, 2] виокремлено основні конструкційні схеми та режими роботи бульдозерного технологічного обладнання, встановлено основні фактори, що впливають на його роботу, та сформовано основні критерії оцінювання ефективності застосування різних моделей бульдозерів для виконання земляних дорожньо-будівельних робіт у лісоексплуатаційних умовах (рис. 1) з використанням систем моніторингу [3].

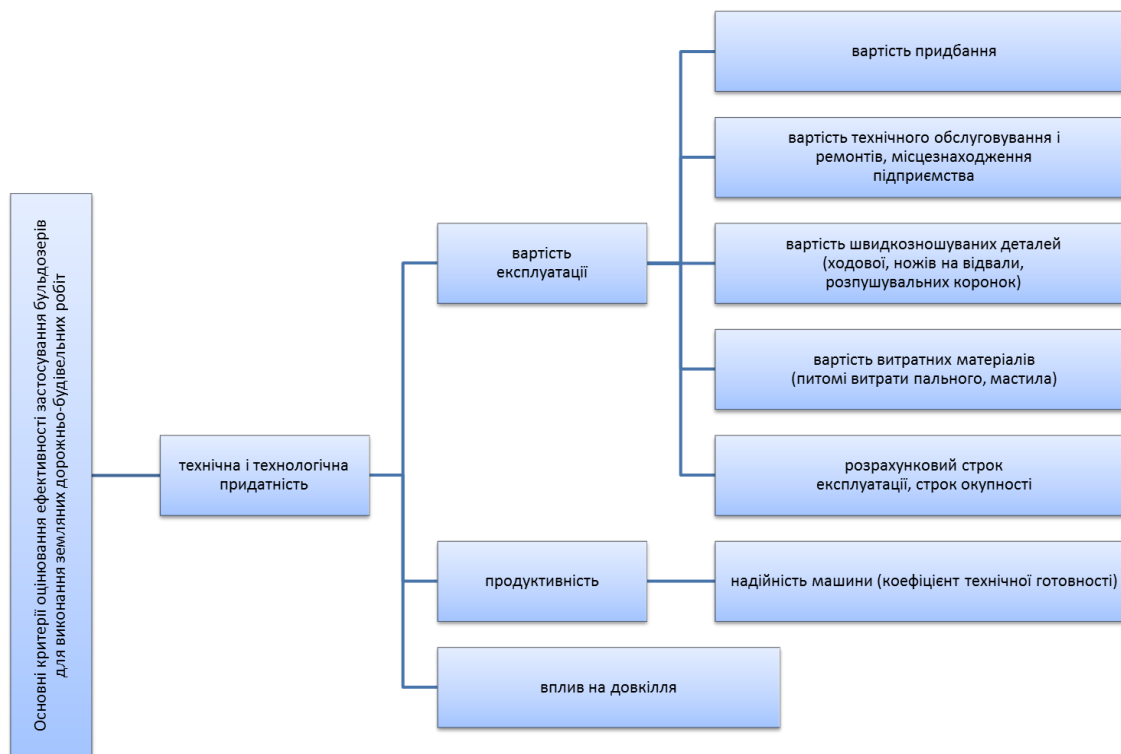


Рис. 1. Основні критерії оцінювання ефективності застосування бульдозерного обладнання в лісоексплуатаційних умовах

На даний час у суміжних галузях промисловості вже вирішено низку теоретичних і практичних завдань, пов'язаних з ефективністю вибору окремих дорожньо-будівельних машин або комплексу цих машин, зокрема, розглянуто шляхи підвищення ефективності використання спеціальних машин, питання технології та організації виконання робіт на виробничих об'єктах. Також визначено низку техніко-економічних та експлуатаційних показників, які є пріоритетними під час обґрунтування вибору технологічного обладнання землерійно-транспортних машин; при цьому ефективним є забезпечення техніко-технологічних й економічних умов [4, 5] з дотриманням вимог охорони праці й довкілля [6–8]. В цілому у результаті проведеного аналізу інформаційних науково-професійних джерел з розглянутої проблематики зроблено висновок, що досі актуальним залишається питання раціонального вибору бульдозерного обладнання для його роботи в лісоексплуатаційних умовах (зокрема й на основі інформаційних даних автоматизованого розрахунку техніко-економічних та експлуатаційних параметрів).

Метою статті є підвищення ефективності процесу експлуатації бульдозерного обладнання за рахунок раціонального вибору відповідних моделей з наявного парку машин, урахування обсягів і тривалості виконання робіт, техніко-економічних параметрів й природно-виробничих умов. Необхідною передумовою ефективного застосування бульдозерного обладнання для виконання дорожніх земляних робіт у лісоексплуатаційних умовах є попереднє проведення аналітичних проектних розрахунків й розроблення на цій основі рекомендацій для керівників інженерних служб та інших структурних підрозділів щодо придбання та експлуатації спеціалізованого бульдозерного обладнання (оскільки тепер галузеві підприємства йдуть шляхом придбання типових і бюджетних, але не завжди якісних й затребуваних землерійно-транспортних машин).

Викладення основного матеріалу. Під час експлуатування бульдозерного обладнання у лісовиробничих умовах [9] першочергово необхідно враховувати такі його конструкційні особливості, як тип рушія, трансмісії базової машини і привода керування, загальне конструкційне виконання, форму відвала і ножа, наявність додаткових пристроїв, що підвищують ефективність роботи землерійно-транспортної машини в різних рельєфно-кліматичних, ґрунтових [10] та гідрологічних умовах.

Вагові й енергетичні параметри (рис. 2), а також геометричні розміри робочих органів (рис. 3) у бульдозерів приблизно однієї потужності, як правило, різняться незначною мірою, але робочі швидкості руху базової машини залежно від її конструкції й природно-виробничих експлуатаційних умов можуть різнитися суттєво.

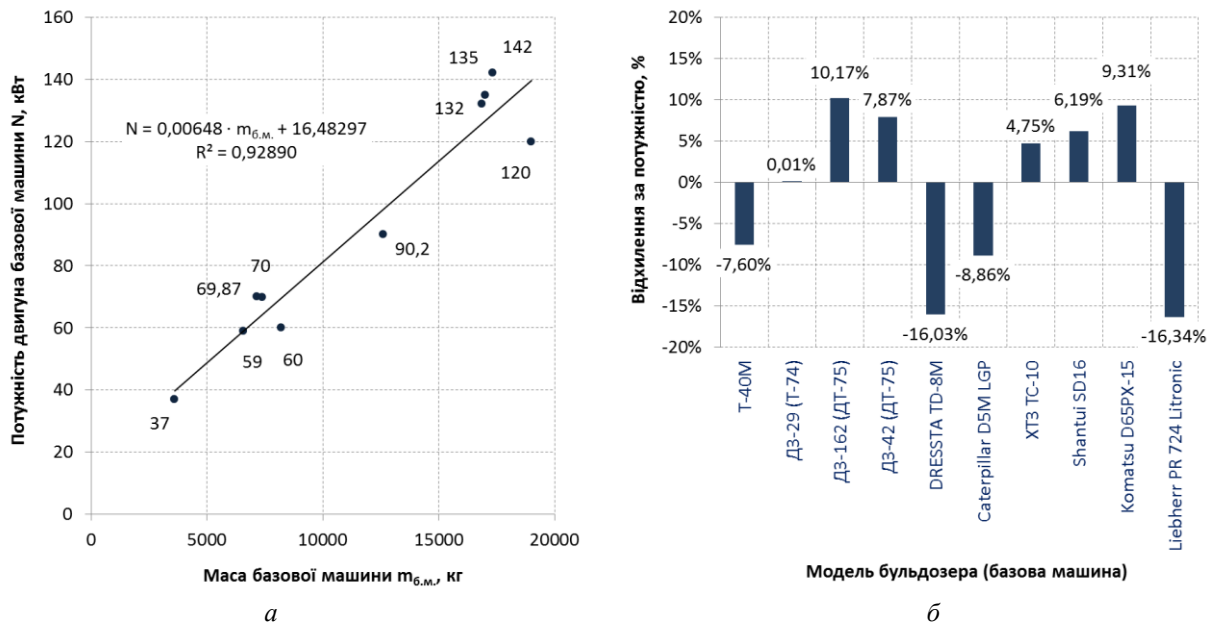


Рис. 2. Порівняльна характеристика вагових (а) та енергетичних (б) параметрів бульдозерної техніки

Геометричні параметри робочого органу бульдозера залежать від ряду конструкційних та прогнозованих технологічних умов [2]. На рисунку 3 кривими штриховими лініями показано межі рекомендованих діапазонів раціональних значень довжини відвала B і висоти відвала H (як для неповоротних конструкцій у міліметрах):

$$\begin{cases} B \approx (1200 \dots 1400) \cdot \sqrt[3]{0,001 m_{б.м.}} ; \\ H \approx (450 \dots 400) \cdot \sqrt[3]{0,001 m_{б.м.}} , \end{cases} \quad (1)$$

де $m_{б.м.}$ – маса базової машини, кг.

Для висоти відвала H й, відповідно, неповоротних і поворотних конструкцій відвалів рекомендовано також використовувати й такі залежності:

$$\begin{cases} H = 500 \cdot \sqrt[3]{0,0001 T_n} - 0,001 A \cdot T_n ; \\ H = 450 \cdot \sqrt[3]{0,0001 T_n} - 0,001 A \cdot T_n , \end{cases} \quad (2)$$

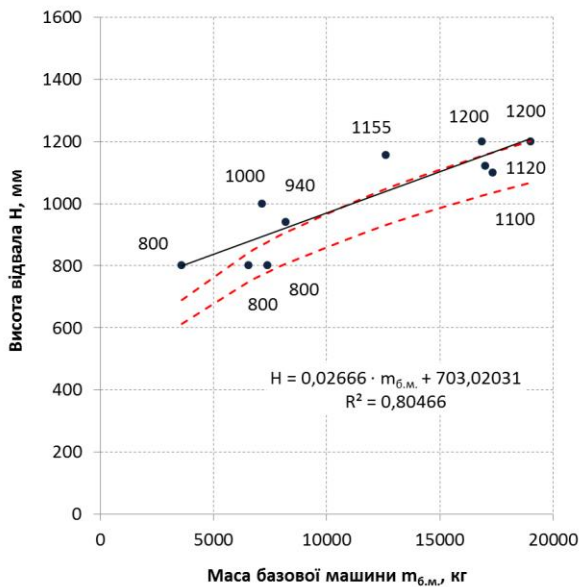
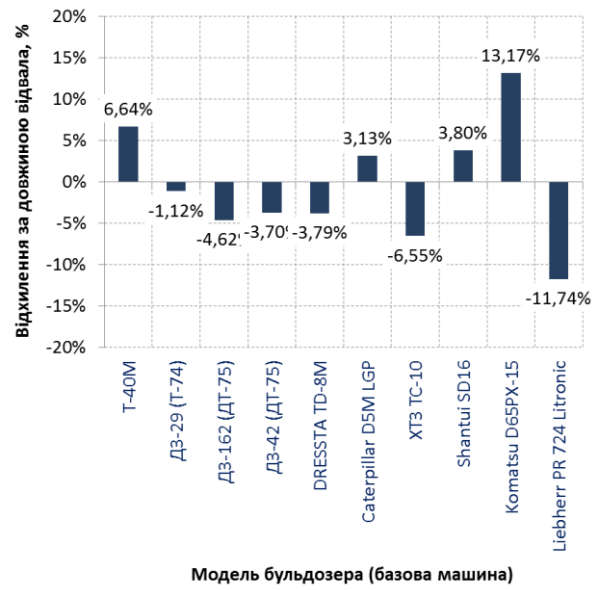
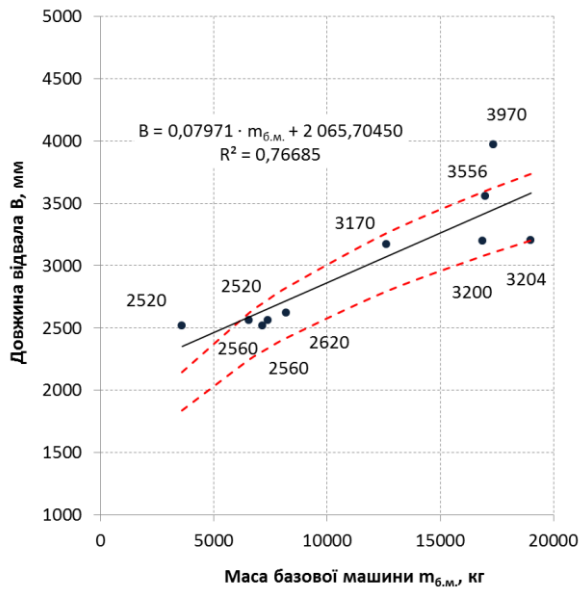
де T_n – номінальне тягове зусилля бульдозера (зусилля, яке розвиває базова машина на щільному ґрунті з урахуванням довантаження від сили тяжіння навісного обладнання та буксування $\delta \leq 7\%$ для гусеничних і $\delta \leq 20\%$ для колісних рушіїв на нижчій швидкості руху), кН;

A – емпіричний коефіцієнт; $A = 0,5$ при $T_n \leq 400000 H$ і $A = 0,1$ при $T_n > 400000 H$.

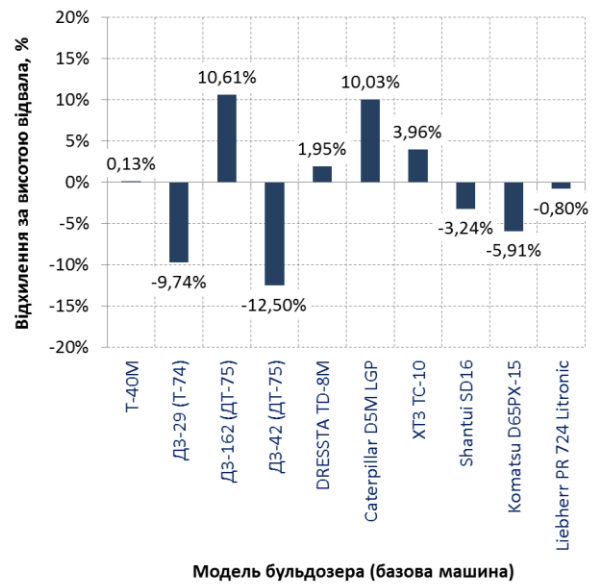
Також необхідно враховувати те, що відвали багатьох моделей бульдозерів оснащують дашком, висота якого в середньому становить

$$H_\phi \approx (0,1 \dots 0,25) \cdot H . \quad (3)$$

Дашок при основному положенні відвала в процесі виконання земляних робіт у лісоексплуатаційних умовах встановлюють, здебільшого, вертикально. Однак необхідно враховувати й те, що загальна висота відвала з дашком у транспортному положенні не повинна обмежувати розрахункову видимість перед бульдозером й необхідний кут в'їзду машини. Під час обґрунтування вибору моделі бульдозера в цілому важливо звертати увагу на увесь спектр параметрів технологічного обладнання (рис. 1), зокрема, на його вартість, вартість запасних частин та обслуговування, витрату пального, технічний ресурс, надійність, техногенний вплив на навколишнє природне середовище, а також строк окупності (для лісоексплуатаційних умов не менше як 3–7 років).



а



б

Рис. 3. Порівняльна характеристика геометричних параметрів робочих органів (відвалів) бульдозерної техніки: а – довжини відвала V ; б – висоти відвала H

Вартість експлуатації різних моделей бульдозерів значною мірою визначає економічність їх роботи, яку інколи не беруть до уваги під час обґрунтування вибору цього технологічного обладнання (наприклад, у різних базових машин з однаковими за потужністю двигунами можуть суттєво (до 15–30 %) відрізнятися питомі витрати пального; й це стосується не лише порівняння нових та морально застарілих моделей). Тому за наявності на підприємстві кількох моделей бульдозерів (або можливості орендування кількох таких машин у дорожньо-будівельних організаціях чи у приватних підприємств) цей показник безперечно варто враховувати. Водночас згідно з рисунком 1 одним із найважливіших показників роботи бульдозерів, що використовують у лісоексплуатаційних умовах, є їх змінна продуктивність [11] й, відповідно, собівартість виконання земляних робіт та відносна виробничі витрати (рис. 4–6). Зазначені показники роботи бульдозерного обладнання залежать від багатьох чинників, зокрема від місткості відвала, швидкостей руху машини під час робочого і холостого ходу, інших виробничих параметрів технологічно-транспортного процесу. Також украй важливим для потокового дорожньо-будівельного процесу в лісоексплуатаційних умовах є показник надійності роботи технологічного обладнання [12], похідним від якого є коефіцієнт технічної готовності. У свою чергу від коефіцієнта технічної готовності залежить продуктивність і виробіток за весь період експлуатації машини.

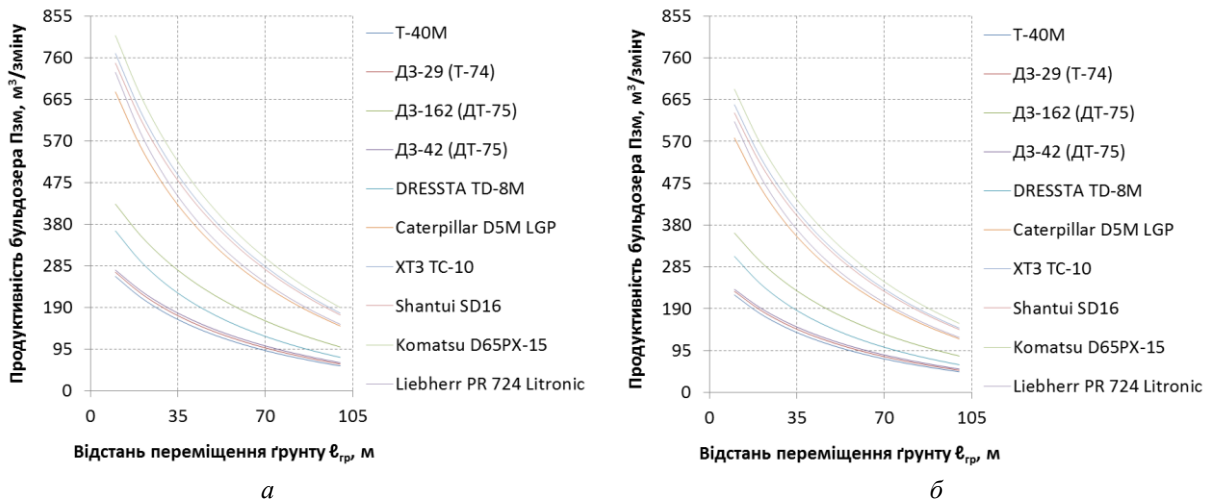


Рис. 4. Порівняльна характеристика продуктивності роботи бульдозерної техніки під час її експлуатації в умовах супіщаних (а) та суглинистих (б) ґрунтів

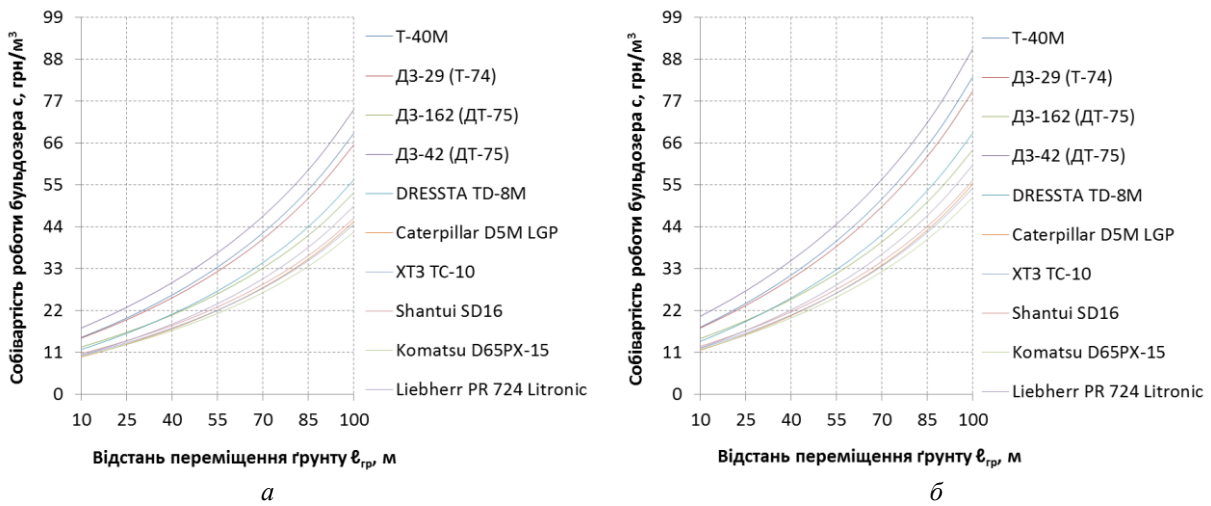


Рис. 5. Порівняльна характеристика собівартості роботи бульдозерної техніки під час її експлуатації в умовах супіщаних (а) та суглинистих (б) ґрунтів

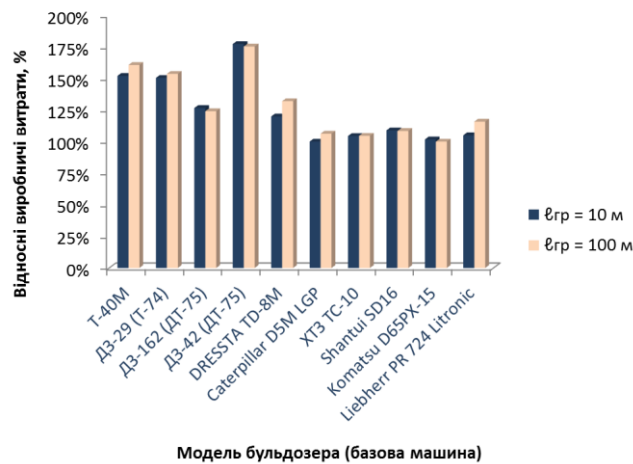


Рис. 6. Порівняльна характеристика відносних виробничих витрат для роботи бульдозерної техніки в лісоексплуатаційних умовах (усереднене значення для розроблення супіщаних і суглинистих ґрунтів)

З метою мінімізації трудовитрат, заощадження матеріальних і часових ресурсів, а також забезпечення можливості оперативного обґрунтування вибору й раціональної експлуатації бульдозерного обладнання в лісоексплуатаційних умовах сформовано перелік показників та розроблено прикладне програмне забезпечення для виконання інженерних розрахунків (рис. 7, 8).

Вхідні дані:

1	Тип рушія базової машини	гусеничний	▼	1
2	Маса базової машини, $m_{б.м.}$		кг	15990
3	Тип місцевого ґрунту	глина	▼	4
4	Коефіцієнт зчеплення рушія з ґрунтом		-	0,80
5	Потужність двигуна базової машини		кВт	125
6	ККД трансмісії		-	0,86
7	Ширина базової машини		мм	2480
8	Категорія ґрунту за складністю розроблення		-	3

Рис. 7. Формування вхідних даних для інженерних розрахунків

Вихідні дані:

Мін. Макс. Прийнято

Тягове зусилля					
1	Номінальне тягове зусилля, T_n	Н	146 823	153 097	149 960
2	Тягове зусилля, реалізоване двигуном	Н			154 800
3	Умова реалізації тягового зусилля	$T_n < [T_n]$			виконується
Геометрія відвала					
4	Висота відвала, H	мм	1 158		1100
5	Довжина відвала, B	мм	3 190		3200
6	Висота дашка, H_d	мм	110	275	193
7	Радіус кривизни відвала, R	мм	926	1 042	984
8	Кут різання відвала, α	град	50	55	53
9	Кут нахилу відвала, ϵ	град	75	75	75
10	Кут перекидання ґрунту, β	град	70	75	73
11	Ширина ножа, a	мм	250	▼	250
12	Кут захвату, γ	град	60	90	90
13	Кут нахилу козирка, β_k	град	90	90	90
Швидкості руху					
14	Швидкість руху бульдозера, v	м/с	0,72	2,89	0,8
15	Швидкість опускання відвала, v_s	м/с			0,15
16	Задній кут (мінімальне значення), θ	град	11		11
Об'єм призми волочіння ґрунту					
17	Об'єм призми ґрунту, V	м ³			0,821
18	Кут внутрішнього тертя ґрунту, ρ	град			40
19	Співвідношення розмірів відвала, H/B	-	0,3	0,4	0,34
Експериментально-аналітичний метод розрахунку опору переміщення бульдозера					
20	Опір переміщенню машини, W_1	Н			36 878
21	Коефіцієнт опору руху рушія, f	-			0,11
22	Поздовжній ухил шляху, α_n	град	0	20	5
23	Вага бульдозера, G	Н	183 528	191 372	187 450
24	Опір ґрунту різанню, W_2	Н			84 512
25	Вплив α на опір різанню ґрунту, ϕ_k	-			1,42
26	Питомий опір ґрунту різанню, K	МПа			0,16
27	Глибина різання, h	м	0	0,50	0,11
28	Ширина площадки затуплення ножа, s	м	0,001	0,005	0,003

в межах

29	Коефіцієнт опору від затуплення, η_3	МПа		0,34	
30	Опір переміщенню ґрунту, $W_3 + W_4$	Н		12 713	
31	Щільність ґрунту в природному стані, $\rho_{гр}$	кг/м ³		1 850	
32	Коефіцієнт розпушення, $K_{розп}$	-		1,26	
33	Щільність розпушеного ґрунту, ρ_p	кг/м ³		1 468	
34	Кут зовнішнього тертя ґрунту, φ	град		32,5	
35	Максимальна глибина різання ґрунту, h_{max}	м	при $V = 0$	0,153	ніж гострий ніж затуплений
			при $V = 0$	0,149	
36	Мінімальна глибина різання ґрунту, h_{min}	м	при $V = max$	0,149	ніж гострий ніж затуплений
			при $V = max$	0,131	
37	Коефіцієнт втрат ґрунту при транспорт., Δ	м ³		0,29	
38	Глибина різання ґрунту при транспорт., h_n	м	транспортув. V	0,023	
39	Умова заміщення втрат ґрунту	$h_n < h_{min}$			виконується
40	Опір переміщенню бульдозера, R_n	Н		134 103	
41	Умова забезпечення руху бульдозера	$R_n < T_n$			виконується
Аналітичний метод розрахунку опору ґрунту копанню					
42	Опір переміщенню бульдозера, R_n	Н		139 704	
43	Зчеплення ґрунту, C	Па		75 000	
44	Кут зсуву ґрунту від масиву, ψ	град		25	
45	Опір ґрунту копанню, P_k	Н		102 826	
46	Умова забезпечення руху бульдозера	$R_n < T_n$			виконується
Розбіжність результатів розрахунку опору переміщенню більдозера R_n					
47	Похибка δ_1	%		4,18	
Максимальні навантаження на бульдозер (зустріч з перешкодою)					
48	Максим. зусилля, що діє на відвал, $R_{n\ max}$	Н		486 162	
49	Динамічна складова зусилля, $P_{дин}$	Н		373 081	
50	Жорсткість перешкоди, A_1	кН/м	гранітний масив ▼	130 000	
51	Жорсткість металоконструкції машини, A_2	кН/м		15 191	
52	Зведена жорсткість	кН/м		13 601	
53	Динамічний коефіцієнт, K_d	-		4,30	
Розрахунок зусиль заглиблення і підймання відвала					
54	Вага бульдозерного обладнання, $G_{p.o.}$	Н		30 588	
55	Вага базової машини, $G_{б.м.}$			156 862	
56	Віддаль між ц.в. машини і задньою кромкою поверхні гусениць, a , мм			1335	
57	Віддаль між віссю упяржн. шарн. і задн. кромк. пов. гусениць, b , мм			1380	
58	Віддаль між віссю упяржн. шарн. і ц.в. бульдоз. обладнання, $l_{p.o.}$, мм			2775	
59	Віддаль між ріжучою комкою і задньою кромкою пов. гусениць, l , мм			4825	
60	Віддаль між осями упяржн. шарн. і гідрочиліндра підйому, s , мм			3362	
61	Максимальне зусилля заглиблення, $P_{ц.з.}$	Н		19 225	
62	Максимальне зусилля підймання $P_{ц.в.}$	Н		124 821	
63	Віддаль між віссю упяржн. шарн. і опорною поверхнею, m , мм			420	
64	Необхідне зусилля заглиблення, $P_{ц.з.}'$	Н		4 264	
65	Необхідне зусилля підймання $P_{ц.в.}'$	Н		113 443	
66	Умова забезп. заглиблення відвала в ґрунт	$R_{ц.з.} > R_{ц.з.}'$			виконується
67	Умова забезпечення підймання відвала	$R_{ц.в.} > R_{ц.в.}'$			виконується

Рис. 8. Результати інженерних розрахунків

Розроблене прикладне програмне забезпечення дозволяє виконувати тяговий розрахунок, визначати об'єм призми волочіння та максимальну глибину різання ґрунту, опір переміщенню й продуктивність роботи землерійно-транспортувальної машини тощо. Є можливість проводити інженерні розрахунки для гусеничного чи колісного рушіїв, різних типів місцевого ґрунту (піску, супіску, суглинку, глини тощо), неповоротного та поворотного конструкцій відвалів. Також у процесі виконання обчислень варто

визначати навантаження, які діятимуть на технологічне обладнання під час зіткнення машини з різними типами перешкод (пнями дерев, мерзлим ґрунтом, гранітним масивом, валунами і глинами тощо).

Базовою методологічною основою для системи автоматизованого виконання інженерних розрахунків є основні положення теоретичної механіки ґрунтів, аналітичний метод визначення опору розроблення ґрунтів та експериментально-аналітичний метод визначення опору переміщенню землерийно-транспортувальних машин [2]. У процесі розроблення прикладного програмного забезпечення для пришвидшення процесу виконання обчислень виконано апроксимацію значень таблично заданих функцій низки параметрів й емпіричних коефіцієнтів (рис. 9–10).

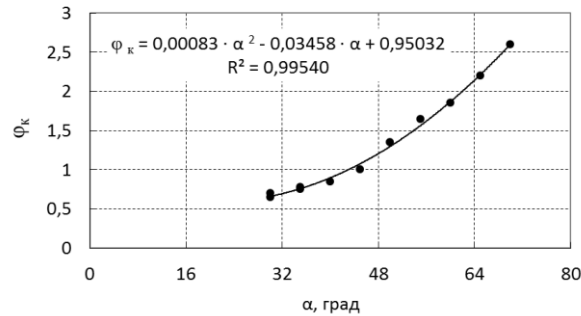


Рис. 9. Залежність коефіцієнта φ_k (усереднене значення), який враховує вплив кута різання α на питомий опір розроблення ґрунту

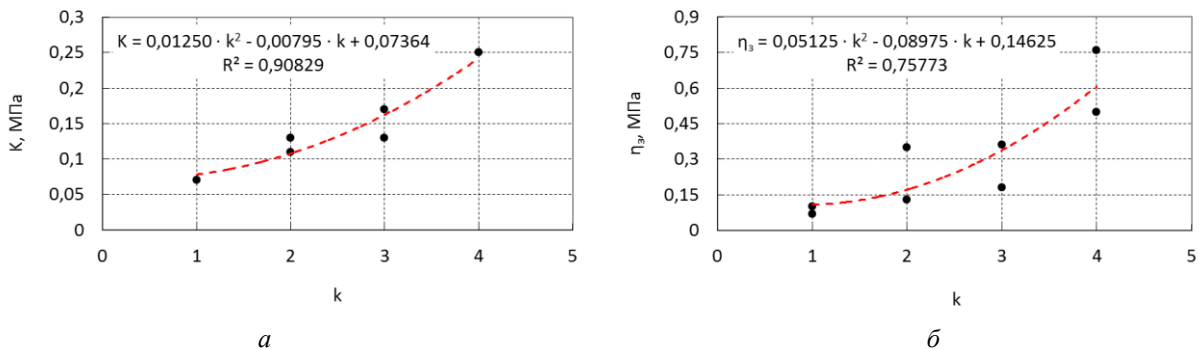


Рис. 10. Залежності питомого опору різанню ґрунту незношеним ножем K (а) та коефіцієнта опору η_z (б) від категорії ґрунту за складністю розроблення k (усереднені значення з урахуванням відповідних діапазонів зміни зазначених показників)

Висновки та перспективи подальших досліджень. У теперішніх складних економічних та виробничо-експлуатаційних умовах, які є характерними для лісогосподарських підприємств України, основними тенденціями зі збільшення продуктивності бульдозерного технологічного обладнання й зменшення питомої собівартості виконання дорожніх земляних робіт є:

- незначне зростання потужності базових гусеничних і колісних машин, а також потужності гідроприводу та робочого тиску в гідравлічній системі, що забезпечить можливим чином заглиблювати відвал й розробляти наявні кам'яністі ґрунти, ґрунтово-рослинні прошарки та щільні гірські породи шарами більшої товщини (особливо для лісоексплуатаційних умов Карпатського регіону);
- використання відвалів раціональної довжини, висоти і форми; застосування ножів відвалів, виготовлених зі зносостійких сплавів, призначених для роботи у складних лісоексплуатаційних умовах;
- ефективне використання обладнання у процесі виконання земляних робіт (раціональне використання природних ухилів місцевості, скорочення тривалості виконання операцій, зменшення технологічних втрат швидкостей, скорочення тривалості зупинки тощо);
- своєчасне й якісне технічне обслуговування машин у виробничих умовах, що призводить до зменшення відмов у процесі роботи (з огляду на погіршення технічного забезпечення і якісного складу технічних фахівців все більшого значення упродовж останніх років набуває якість сервісного обслуговування складної спеціалізованої техніки лісогосподарських підприємств).

Статистико-економічний аналіз роботи різних моделей бульдозерного технологічного обладнання показує, що за тривалої роботи машин на об'єктах дорожньої інфраструктури господарських та промислових підприємств їх виробіток суттєво різниться (у зв'язку з простоями під час ремонту). Однак на лісгосподарських об'єктах інженерно-транспортної інфраструктури навантаження на машини є значно меншим, ніж, скажімо, на виробничих об'єктах добувної промисловості, тому статистика напрацювань і простоїв тут є більш сприятливою для інших марок машин, порівняно з обладнанням провідних світових компаній-виробників (наприклад, Komatsu, Caterpillar чи Liebherr). Також у лісовому господарстві, наприклад, на відміну від гірничої промисловості, зведення інженерних споруд зазвичай є сезонним (упродовж 6–9 місяців) і тому, напевно, немає сенсу надавати перевагу обладнанню, яке перебуває у верхньому ціновому діапазоні й розраховане на десятиліття системної інтенсивної експлуатації. У кількісному вимірі щорічно в лісоексплуатаційних умовах споруджують, реконструюють і ремонтують біля 500–700 км земляного полотна лісових доріг з переміщенням близько 1,5–2,5 млн м³ ґрунтових мас (в середньому для спорудження 1 км земляного полотна лісової дороги переміщують 1–4 тис. м³ ґрунту на відстань до 20 м). З урахуванням теперішніх лісоексплуатаційних умов й прогнозованих обсягів робіт, виконуваних за допомогою бульдозерного обладнання, можна стверджувати, що раціональне застосування бульдозерної техніки для виконання земляних робіт здатне заощаджувати лісовій галузі до 10 млн грн щорічно. Для середньостатистичного державного лісгосподарського підприємства, яке щорічно споруджує не більш як 4 км земляного полотна лісових доріг із застосуванням бульдозерної техніки, можлива економія коштів унаслідок тривалого раціонального застосування бульдозерного обладнання на земляних роботах може становити близько 25–35 тис. грн/рік.

Список використаної літератури:

1. Максименко А.Н. Производственная эксплуатация строительных и дорожных машин / А.Н. Максименко, Д.Ю. Макария. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 390 с.
2. Проектирование машин для земляных работ / А.М. Холодов и др.; под ред. А.М. Холодова. – Х. : Вища школа, Изд-во при Харьковском университете, 1986. – 272 с.
3. Ісаєв А.М. Дослідження та реалізація системи моніторингу стану автошляхів / А.М. Ісаєв, О.В. Кузьменко, І.І. Сугоняк // Технічна інженерія. – Житомир : ДУ «Житомирська політехніка», 2020. – Вип. 1 (85). – С. 121–127. DOI: 10.26642/ten-2020-1(85)-121-127.
4. Хмара Л.А. Выбор экскаваторов, скреперов, бульдозеров для эффективного ведения строительства / Л.А. Хмара, С.И. Кононов // Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : ПНТУ ім. Ю.Кондратюка, 2010. – Вип. 26. – С. 121–130 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2010_26_20.
5. Проведення ефективного прогнозування роботи машин для земляних робіт / Л.Пелевін, А.Фомін, С.Горбатюк, В.Шаленко // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – К. : КНУБА, 2019. – Вип. 93. – С. 12–18. DOI: 10.32347/gbdmm2019.93.0102.
6. Ozturk T. Environmental damages of forest road construction by bulldozer on steep terrain / T.Ozturk, M.Inan, M.Akgul // African Journal of Biotechnology. – 2009. – Vol. 8 (18). – P. 4547–4552 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/62416>.
7. Serin H. Noise Level Analysis of a Bulldozer Used in Constructing a Forest Road in Mediterranean Region of Turkey / H.Serin, A.E. Akay // African Journal of Agricultural Research. – 2010. – Vol. 5 (19). – P. 2624–2628 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-text-pdf/78843D038197>.
8. Сиротинський О.А. Екологічні аспекти облаштування автомобільних лісових доріг / О.А. Сиротинський, М.Д. Дмишук // Сільськогосподарські машини. – Луцьк : Луцький НТУ, 2018. – Вип. 40. – С. 101–107 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/silmah_2018_40_15.
9. Rudko I. Rational use of bulldozers for road earthworks in a forestry enterprise / I.Rudko, I.Karatnyk, V.Baryliak // Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали V міжнар. наук.-практ. конф., 5–7 квітня 2021 р. / Академія технічних наук України. – Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г.М., 2021. – С. 322–325.
10. Recent Developments of Soil Mechanics and Geotechnics in Theory and Practice / Theodoros Triantafyllidis (Ed.) // LNACM. – Karlsruhe : Institute of Soil Mechanics and Rock Mechanics (IBF), 2020. – 409 p. – Vol. 91. DOI: 10.1007/978-3-030-28516-6.
11. Klanfar M. Calculation analysis of bulldozer's productivity in gravitational transport on open pits / M.Klanfar, T.Kujundžić, D.Vrkljan // Tehnicki Vjesnik. – 2014. – Vol. 21 (3). – P. 517–523 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=182138.
12. Ramesh Kumar A. A Study of Bulldozers in Reliability Analysis / A.Ramesh Kumar, V.Krishnan // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – September 2016. – Vol. 5, Issue 9 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.researchgate.net/publication/308171791_A_Study_of_Bulldozers_in_Reliability_Analysis.

References:

1. Maksimenko, A.N. and Makacariya, D.Yu. (2015), *Proizvodstvennaya ekspluatatsiya stroitel'nykh i dorozhnykh mashin*, Vysheishaya shkola, Minsk, 390 p.

2. Kholodov, A.M. et al. (1986); *Proektirovanie mashin dlya zemlyanykh robot*, in Kholodov, A.M. (ed.), Vyshha shkola, zd-vo pri Khar'kovskom universitete, Har'kov, 272 p.
3. Isajev, A.M., Kuz'menko, O.V. and Sugonjak, I.I. (2020), «Doslidzhennja ta realizacija systemy monitoryngu stanu avtoshljahiv», *Tehnichna inzhenerija*, DU «Zhytomyr'ska politehnika», Zhytomyr, Vol. 1 (85), pp. 121–127, doi: 10.26642/ten-2020-1(85)-121-127.
4. Khmara, L.A. and Kononov, S.Y. (2010), «Vybor ekskavatorov, skreperov, bul'dozerov dlya effektivnogo vedeniya stroitel'stva», *Zbirnyk naukovykh prac'. Galuzeve mashynobuduvannja, budivnyctvo*. –: PNTU im. Ju.Kondratjuka, Poltava, Vol. 26, pp. 121–130, [Online], available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2010_26_20.
5. Pelevin, L., Fomin, A., Gorbatjuk, Je. and Shalenko, V. (2019), «Provedennja efektyvnogo prognozuvannja roboty mashyn dlja zemljanyh robot», *Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*, Vol. 93, pp. 12–18, doi: 10.32347/gbmm2019.93.0102.
6. Ozturk, T., Inan, M. and Akgul, M. (2009), «Environmental damages of forest road construction by bulldozer on steep terrain», *African Journal of Biotechnology*, Vol. 8 (18), pp. 4547–4552, [Online], available at: <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/62416>
7. Serin, H. and Akay, A.E. (2010), «Noise Level Analysis of a Bulldozer Used in Constructing a Forest Road in Mediterranean Region of Turkey», *African Journal of Agricultural Research*, Vol. 5 (19), pp. 2624–2628, [Online], available at: <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-text-pdf/78843D038197>
8. Syrotyns'kyj, O.A. and Dmyshuk, M.D. (2018), «Ekologichni aspekty oblashtuvannja avtomobil'nyh lisovyh dorog», *Sil'skogospodars'ki mashyny*, Vol. 40, pp. 101–107, [Online], available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/silmah_2018_40_15
9. Rudko, I., Karatnyk, I. and Baryliak, V. (2021), «Rational use of bulldozers for road earthworks in a forestry enterprise», *Prykladni naukovo-tehnicni doslidzhennja*, Materialy V mizhnar. nauk.-prak. konf., 5–7 kvitnja 2021 r., Akademija tehnicnyh nauk Ukraїny, Ivano-Frankivs'k, Vydavec' Kushnir G.M, pp. 322–325.
10. Triantafyllidis, T. (ed.). (2020), «Recent Developments of Soil Mechanics and Geotechnics in Theory and Practice», *LNACM*, Vol. 91, Institute of Soil Mechanics and Rock Mechanics (IBF), Karlsruhe, 409 p., doi: 10.1007/978-3-030-28516-6.
11. Klanfar, M., Kujundžić, T. and Vrkljan, D. (2014), «Calculation analysis of bulldozer's productivity in gravitational transport on open pits», *Tehnicki Vjesnik*, Vol. 21 (3), pp. 517–523, [Online], available at: https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=182138
12. Ramesh Kumar, A. and Krishnan, V. (2016), «A Study of Bulldozers in Reliability Analysis», *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 5, Issue 9, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/308171791_A_Study_of_Bulldozers_in_Reliability_Analysis

Рудько Ігор Михайлович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри лісопромислового виробництва та лісових доріг Національного лісотехнічного університету України.

<https://orcid.org/0000-0002-5754-002X>.

Наукові інтереси:

– інженерія транспортних систем.

E-mail: ihor.rudko@nltu.edu.ua.

Бакай Борис Ярославович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри лісопромислового виробництва та лісових доріг Національного лісотехнічного університету України.

<https://orcid.org/0000-0002-8707-9895>.

Наукові інтереси:

– лісова та промислова інженерія.

E-mail: bakay@nltu.edu.ua.

Цимбалюк Юрій Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри лісопромислового виробництва та лісових доріг Національного лісотехнічного університету України.

<https://orcid.org/0000-0003-4839-0944>.

Наукові інтереси:

– ресурсоефективне та чисте виробництво.

E-mail: yu.tsymbalyuk@nltu.edu.ua.

Гобела Володимир Миколайович – старший викладач кафедри лісопромислового виробництва та лісових доріг Національного лісотехнічного університету України.

<https://orcid.org/0000-0001-8267-3257>.

Наукові інтереси:

– машини та обладнання лісопромислового виробництва.

E-mail: v.gobela@nltu.edu.ua.

Стаття надійшла до редакції 11.05.2021.