

ГІДРОТЕХНІЧНЕ БУДІВНИЦТВО, ВОДНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 624.132.3:631.312.5

<https://doi.org/10.31713/vt120241>

Лук'янчук О. П., к.т.н., доцент, Степанюк Б. І., магістр (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО КОМПОНУВАННЯ ГРУНТОРОЗРОБНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА ПОБУДОВОЮ 3D-МОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ТІЛ СКОЛУ ҐРУНТУ

Описано теоретичний спосіб визначення зусиль різання в різних умовах розробки. Отримано аналітичні залежності для визначення зусиль різання при блокованому, асиметрично блокованому, напівблокованому та вільному способі різання. Отримано залежності співвідношень зусиль, об'ємів тіл сколу та площ контакту бокових стінок елементів тіл сколу від співвідношення ширини ножа до глибини різання, за допомогою яких можна визначити значення зусиль для різних умов різання та раціональне розташування робочих органів, знаючи лише одне зусилля і параметри 3d-моделей елементів тіл сколу ґрунту

Ключові слова: ґрунт; зусилля різання; спосіб різання; 3d-модель; об'єм тіла сколу; площа контакту.

Постановка проблеми. На сьогодні існує достатньо багато конструкцій робочого обладнання для будівельних, гірничих та сільськогосподарських машин, яке використовується для розробки ґрунтового середовища. Залежно від умов та задач для розробки ґрунту використовують обладнання з робочими органами різного типу: пасивними, активними і пасивно-активними. Досить розповсюдженими є багатоелементні пасивні робочі органи, які комбіновано розробляють ґрунт на до- та закритичних глибинах [1].

Загалом усі ґрунторозробні робочі органи, хоч і різні за конструкцією, але мають одну спільну функцію, яка полягає у відділенні елементів ґрунту від загального масиву. Конструкція робочих органів повинна забезпечувати здійснення робочого процесу з найменшою енергоємністю [2].

Найбільш значущою складовою енергоємності робочого

процесу розробки ґрунту багатоелементними робочими органами є їх компонування (рис. 1) та умови різання ґрунту робочими органами (різцями, зубами, скребками тощо).

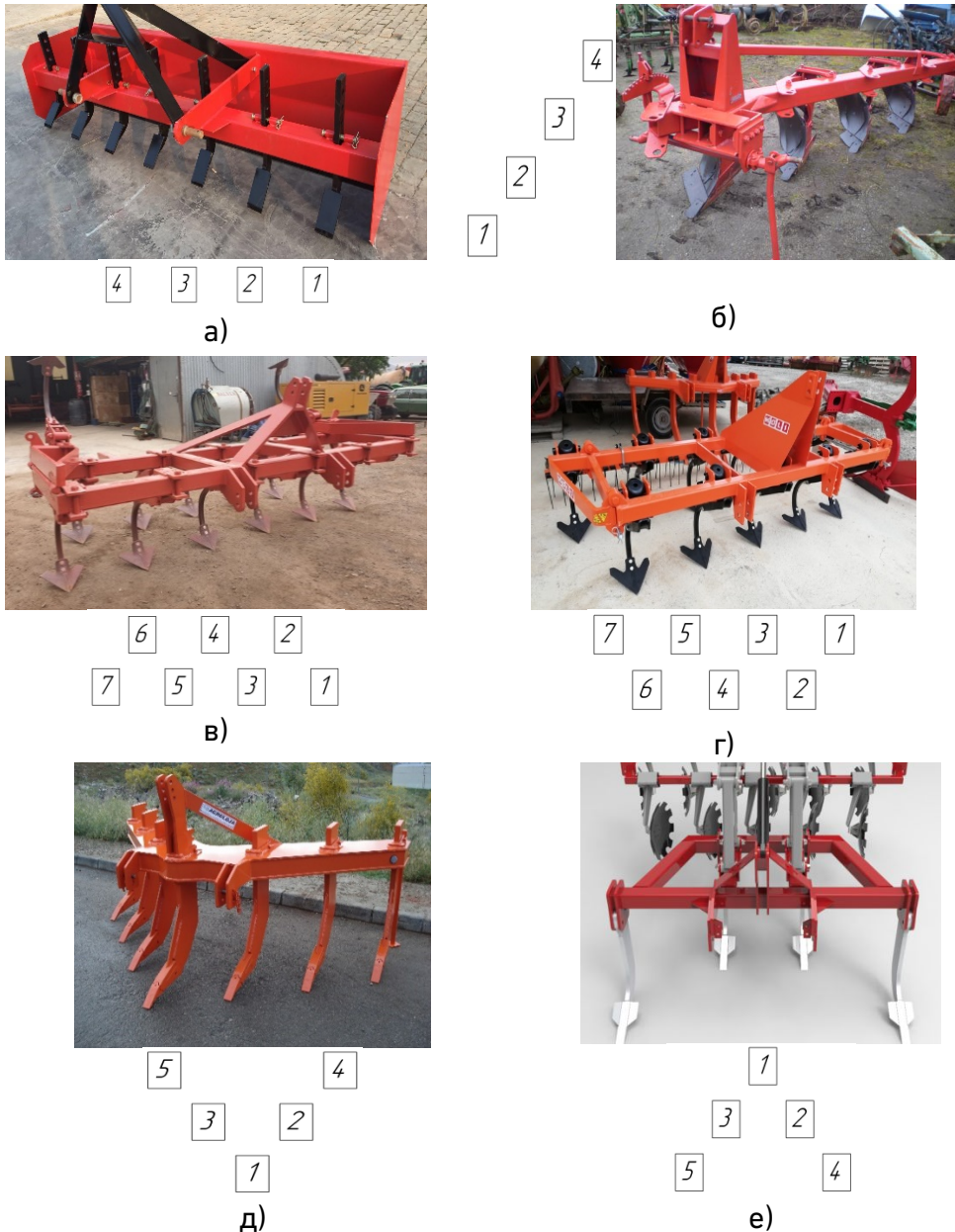


Рис. 1. Способи розміщення робочих органів (ріжучих елементів) в ґрунторозробному обладнанні: а) – рядне; б) – лінійне під кутом в плані; в) – шахове; г) – дзеркально шахове; д) – V-подібне; е) – Δ -подібне

Відділення стружки ґрунту від масиву може здійснюватися в умовах блокованого, асиметричного блокованого, напівблокованого та вільного різання ґрунту [3].

Аналіз основних досліджень і публікацій. Конструкція багатоелементних робочих органів з розташуванням ріжучих елементів в один ряд вимагає великих затрат енергії для розробки ґрунту, кожен ґрунторозробний орган працює при блокованому різанні ґрунту. Перевагою таких типів є відносно невеликі розміри.

Розміщення ріжучих елементів під кутом у плані призводить до збільшення габаритів, однак така конструкція вимагає менших енерговитрат на робочий процес, оскільки при блокованому руйнуванні ґрунту працює лише передній ґрунторозробний орган. Наступні робочі органи, що розміщені під кутом до переднього ґрунторозробного органа, працюють при напівблокованому різанні ґрунту.

При V-подібному розташуванні ріжучих елементів зменшення енергоємності процесу розробки ґрунту відбувається за рахунок того, що передній ґрунторозробний орган працює при блокованому різанні, а два наступних, які розташовуються позаду, – при напівблокованому різанні ґрунту.

Робочі органи з дельтоподібним розташуванням ріжучих елементів вимагають дещо більших енерговитрат для розробки ґрунту у порівнянні із V-подібним розташуванням, оскільки при блокованому різанні працює вже два ґрунторозробних органи, а задній ґрунторозробний орган працює при вільному різанні ґрунту [2].

Для знаходження інших варіантів раціонального компонування робочих органів необхідно здійснити визначення співвідношення зусиль за різними видами різання ґрунту.

Відомо, що збільшення глибини різання робочим органом до критичної глибини призводить до зменшення питомої енергоємності робочого процесу через те, що інтенсивність зростання опору різанню менша, ніж зростання площі поперечного перерізу щілини. При закритичних глибинах інтенсивність зростання опору різанню робочим органом значно збільшується за рахунок ущільнення ґрунту в бічних стінках щілини, а інтенсивність зростання площі руйнування зменшується. В результаті питома енергоємність робочого процесу підвищується. Тому розрахунок параметрів ґрунторозробних органів необхідно здійснювати на основі критичноглибинного різання ґрунтів [2–7].

Метою роботи є визначення зусиль різання ґрунторозробних

органів на критичній глибині при різних способах різання (блоковане, асиметрично блоковане, напівблоковане та вільне). Отримання залежностей значень відносних зусиль різання ΔP від співвідношення ширини ножа до глибини різання b/h . Побудува 3d-моделей об'ємів тіл сколу з подальшим аналізом співвідношення їх відносних об'ємів та площ контакту бокових стінок ґрунтових тіл сколу.

Виклад основного матеріалу. Для виконання поставленої мети необхідно розглянути відомі розрахункові схеми взаємодії ножа з ґрунтовим середовищем в умовах блокованого, асиметричного блокованого, напівблокованого та вільного різання ґрунту [8–11].

Для блокованого способу різання зусилля описуються таким чином: на елементарний об'єм елемента сколу висотою dh в момент попереднього сколювання діють такі сили, які приведені у вертикальну площину ОАД (рис. 2); активна сила dN' , направлена під кутом зовнішнього тертя ґрунту φ до нормалі лобової площини ножа; нормальна реакція dN_c і дотичні сили dT_c і $2 \cdot dT_{бок} \cdot \cos(\delta)$ у площині зсуву ґрунту [5].

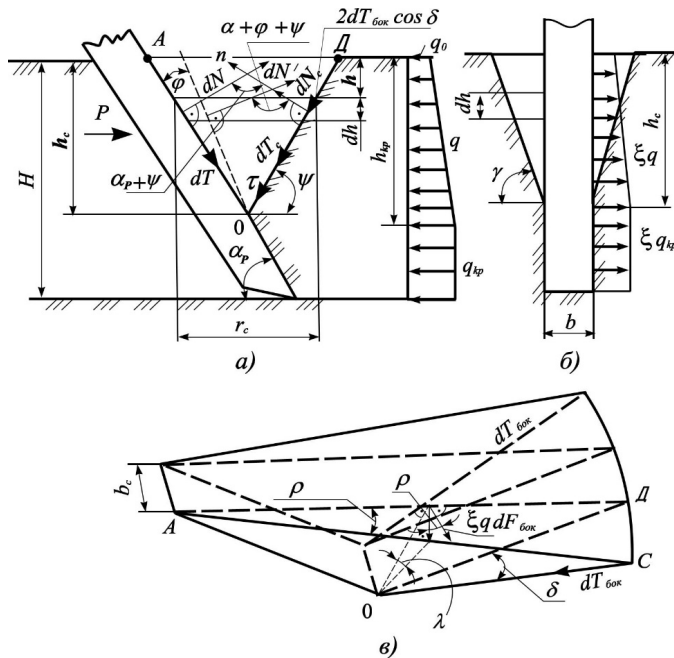


Рис. 2. Схема взаємодії ножа із ґрунтовим середовищем для блокованого різання: а) у поздовжній площині; б) у поперечній площині; в) форма елемента стружки у процесі заглиблення ножа

Тоді система рівнянь рівноваги всіх сил на нормальну (n) і

дотичну (τ) осі до лобової площини сколювання мають вигляд (1).

$$\begin{cases} \sum P_n = dN_c + dN' \cdot \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0; \\ \sum P_\tau = dT_c + 2dT_{бок} \cdot \cos(\delta) - dN' \cdot \sin(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де q – закон розподілення нормального тиску на лобову площину різця по глибині; b_p – ширина різця; φ – кут зовнішнього тертя ґрунту; α_p – кут різання різця; ψ – кут зсуву ґрунту різцем в поздовжній площині; dh – елементарна глибина різання.

З першого рівняння системи (1) маємо (2)

$$dN_c = \frac{-dN}{\cos(\varphi)} \cdot \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = \frac{-q \cdot b_c}{\cos(\varphi) \cdot \sin(\alpha_p)} \cdot \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) \cdot dh, \quad (2)$$

де dh – елементарна глибина різання. Закон розподілення нормального тиску на ніж по глибині обґрунтовано у літературі і представлено у вигляді (3).

$$q = q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{h_c} \cdot k_{пер} \cdot h, \quad (3)$$

де q_0 , $q_{кр}$ – відповідно мінімальний тиск на денній поверхні та максимальний тиск по несучій спроможності ґрунту (критичний тиск) визначається по відомих залежностях; $k_{пер}$ – відношення глибини гарантованого сколювання ґрунту h_c до критичної глибини різання $h_{кр}$ ($k_{пер}=0,9\dots0,95$); h – поточне значення глибини.

Елементарні дотичні сили, які діють у лобовій dT_c і боковій $dT_{бок}$ площині сколювання, визначаються за законом Кулона для ґрунтів (4, 5)

$$dT_c = \tan(\varphi_0) \cdot dN_c + c \cdot dF_c; \quad (4)$$

$$dT_{бок} = (\xi \cdot q \cdot \cos(\rho) \cdot \cos(\lambda) \cdot \tan(\varphi_0) + c) \cdot dF_{бок}, \quad (5)$$

де dF_c , $dF_{бок}$ – елементарні площі відповідно лобової та бокової площин сколювання; ξ – коефіцієнт бокового тиску; ρ , δ , λ – кути, які утворюються боковою площиною сколювання з вертикальною площиною (рис. 1). Елементарні площі відповідно дорівнюють (6, 7):

$$dF_c = (b_c + 2 \cdot \rho \cdot r_c) \frac{dh}{\sin(\psi)} = \quad (6)$$

$$= [b_c + 2 \cdot \rho (\cot(\alpha_p) + \cot(\psi)) \cdot (h_c - h)] \cdot \frac{dh}{\sin(\psi)};$$

$$dF_{бок} = r_c \cdot \frac{dh}{\cos(\lambda)} = (\cot(\alpha_p) + \cot(\psi)) \cdot (h_c - h) \frac{dh}{\cos(\lambda)}, \quad (7)$$

де r_c – поточне значення радіуса сколювання ґрунту.

Якщо підставити вирази (4) і (5) у друге рівняння системи (1) з урахуванням залежностей, (6) і (7), отримаємо (8):

$$\begin{aligned} & \tan(\varphi_0) \cdot \int_0^{h_c} \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos(\varphi) \cdot \sin(\alpha_p)} \cdot q_h \cdot b \cdot dh \cdot \cos(\psi) + \int_0^{h_c} \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos(\varphi) \cdot \sin(\alpha_p)} \cdot \\ & \cdot q_h \cdot b \cdot dh \cdot \sin(\psi) + c \int_0^{h_c} \left[2 \cdot \rho \cdot (\cot(\alpha_p) + \cot(\psi)) \cdot (h_c - h) + b \right] \cdot \frac{dh}{\sin(\psi)} \cdot \\ & \cdot \cos(\psi) + 2 \cdot \cos(\delta) \cdot c \cdot \int_0^{h_c} (\cot(\alpha_p) + \cot(\psi)) \cdot (h_c - h) \cdot \frac{dh}{\cos(\lambda)} \cdot \cos(\psi). \end{aligned} \quad (8)$$

h_c – глибина сколу; q – тиск ґрунту на ніж по глибині.

Кути ρ , δ , λ визначаються із геометричних співвідношень (9, 10, 11):

$$\cos(\rho) = \sqrt{1 - \left(\frac{\cot(\gamma)}{\cot(\alpha_p) + \cot(\psi)} \right)^2}; \quad (9)$$

$$\cos(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\cot(\gamma)}{\cot(\alpha_p) + \cot(\psi)} \right)^2}}; \quad (10)$$

$$\cos(\delta) = 1 - 2 \cdot (\cot(\alpha_p) + \cot(\psi))^2 \cdot \sin(\psi)^2 \cdot \sin\left(\frac{\rho}{2}\right)^2, \quad (11)$$

де γ – кут нахилу бокових площин елемента стружки до горизонту (12).

$$\gamma = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}. \quad (12)$$

Провівши інтегрування від 0 до h_c , та після проміжних математичних перетворень отримаємо зусилля при блокованому способі різання $P_{\text{блок}}$ (13):

$$\begin{aligned} P_{\text{блок}} = & \frac{c \cdot h \cdot \cos(\psi) \cdot (b + \rho \cdot h \cdot \cot(\psi) + \rho \cdot h \cdot \cot(\alpha_p))}{\sin(\psi)} + \\ & + \frac{c \cdot h^2 \cdot \cos(\psi) \cdot \cos(\delta) \cdot (\cot(\psi) + \cot(\alpha_p))}{\cos(\lambda)} - \\ & - \frac{b \cdot h \cdot q_h \cdot \cos(\varphi + \psi + \alpha_p) \cdot (\sin(\psi) + \cos(\psi) \cdot \tan(\varphi_0))}{\cos(\varphi) \cdot \sin(\alpha_p)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для асиметрично блокованого, напівблокованого та вільного способу різання залежності для розрахунку зусиль виводяться аналогічним чином з врахуванням змін в розрахункових схемах, які

характерні кожному з способів різання [5]. Тоді отримуємо наступні формули зусиль для асиметрично блокованого (14), напівблокованого (15) та вільного (16) способів різання.

$$\begin{aligned}
 P_{асблок} = & \frac{c \cdot h^2 \cdot \cos(\psi) \cdot (\cot(\psi) + \cot(\alpha_p))}{2} + \\
 & + \frac{c \cdot h \cdot \cos(\psi) \cdot (2 \cdot b + \rho \cdot h \cdot \cot(\psi) + \rho \cdot h \cdot \cot(\alpha_p))}{2 \cdot \sin(\psi)} + \\
 & + \frac{c \cdot h^2 \cdot \cos(\psi) \cdot \cos(\delta) \cdot (\cot(\psi) + \cot(\alpha_p))}{2 \cdot \cos(\lambda)} - \\
 & - \frac{b \cdot h \cdot q_h \cdot \cos(\varphi + \psi + \alpha_p) \cdot (\sin(\psi) + \cos(\psi) \cdot \tan(\varphi_0))}{\cos(\varphi) \cdot \sin(\alpha_p)};
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 P_{нблок} = & \frac{c \cdot h^2 \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\psi)}{2} + \frac{c \cdot h \cdot \cos(\psi) \cdot (2 \cdot b + \rho \cdot h \cdot \cot(\psi) + \rho \cdot h \cdot \cot(\alpha_p))}{2 \cdot \sin(\psi)} + \\
 & + \frac{c \cdot h^2 \cdot \cos(\psi) \cdot \cos(\delta) \cdot (\cot(\psi) + \cot(\alpha_p))}{2 \cdot \cos(\lambda)} -
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\frac{h \cdot \cos(\varphi + \psi + \alpha_p) \cdot (2 \cdot b \cdot q_0 \cdot \sin(\psi) + h \cdot q_0 \cdot \cot(\gamma) \cdot \sin(\psi) + 2 \cdot b \cdot q_h \cdot \cos(\psi) \cdot \tan(\varphi_0))}{2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\alpha_p)};$$

$$\begin{aligned}
 P_{вил} = & \frac{c \cdot h \cdot \cos(\psi) \cdot (b + h \cdot \cot(\gamma))}{\sin(\psi)} - \\
 & - \frac{h \cdot q_0 \cdot \cos(\varphi + \psi + \alpha_p) \cdot (\sin(\psi) + \cos(\psi) \cdot \tan(\varphi_0)) \cdot (2 \cdot b + h \cdot \cot(\gamma))}{2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\alpha_p)}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

За розрахунковими даними в програмі САПР побудовано 3D-моделі елементів тіл сколу ґрунтової стружки (рис. 3) з подальшим обчисленням об'єму і площі за допомогою можливостей САПР, які закладені в меню «діагностика», а саме: для вимірювання площі граней використано команду «Площа», а для розрахунку масоінерційних характеристик (ваги, об'єму, центру мас, загальної площі) існуючої моделі (деталі або вузла) використано команду «МСС моделі».

Для порівняльних розрахунків, з метою дотримання докритичноглибинних умов роботи для всіх способів різання, глибину різання приймаємо рівною найменшій з сукупності критичних глибин при найменшому співвідношенні $b/h=0,25$ у визначених ґрунтах.

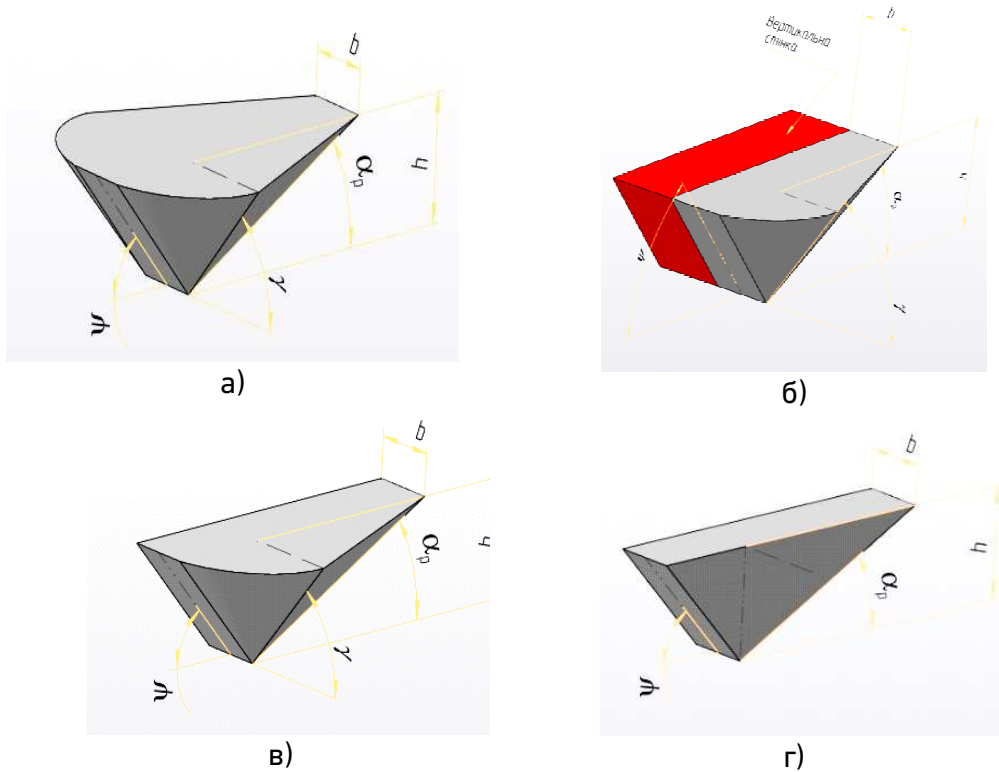
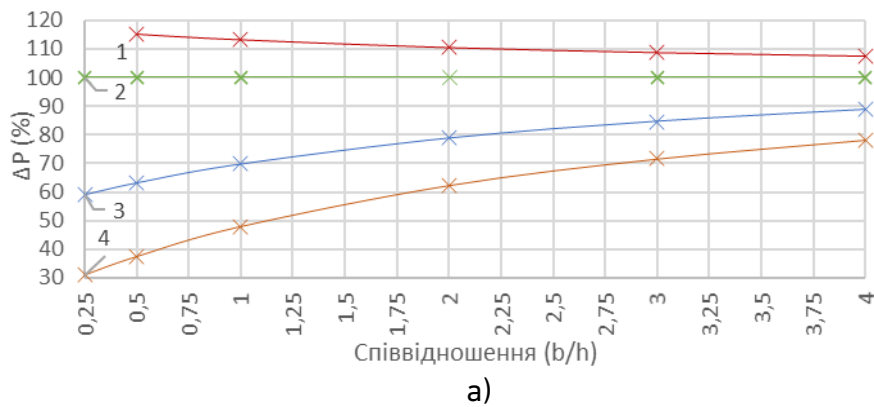


Рис. 3. 3D-моделі об'ємів тіл сколу для різних способів різання в ґрунтовому середовищі: а) блокованого; б) асиметрично блокованого; в) напівблокованого; г) вільного

Скориставшись формулами (13, 14, 15, 16) отримано графіки залежності відносного зусилля ΔP від співвідношення b/h (рис. 4).



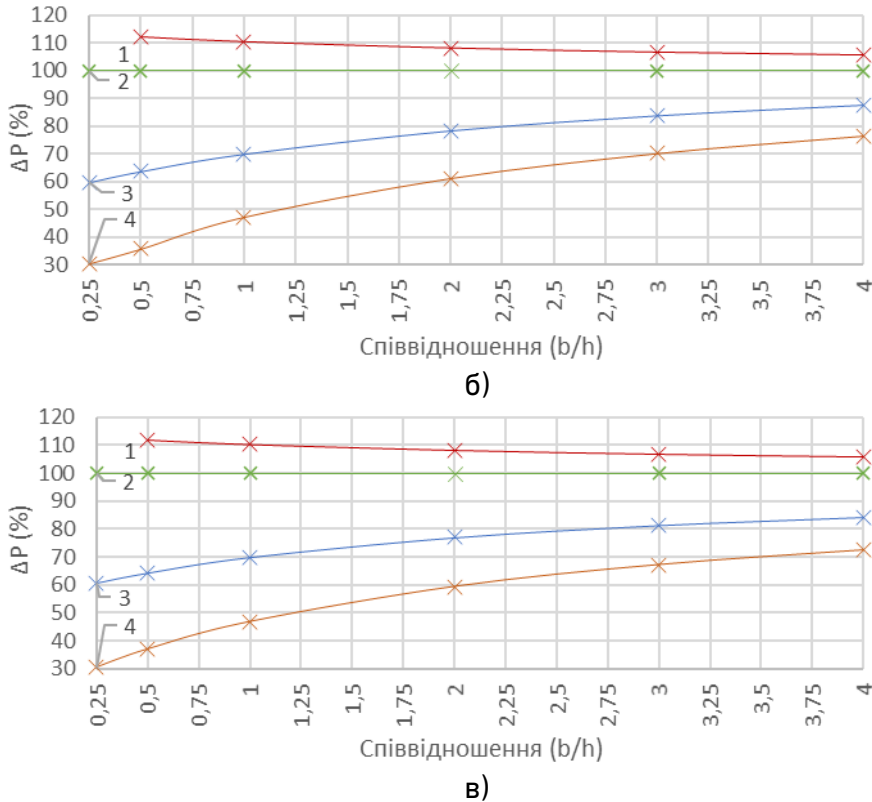


Рис. 4. Залежності відносного зусилля різними способами різання:
 а) тверда глина; б) твердий суглинок; в) твердий супісок;
 1 – асиметрично блоковане; 2 – блоковане; 3 – напівблоковане;
 4 – вільне

Згідно з рис. 4 при збільшенні ширини різання вплив глибини на загальне зусилля поступово зменшується. При блокуваному різанні твердого суглинка на глибині $h=0,1$ м при співвідношенні $b/h=0,25$ загальне зусилля різання, що виникає при блокуваних умовах на 30,1% складається з лобового зусилля $P_{\text{лоб.}}=P_{\text{віл}}$ і 69,9% з опору ґрунту до руйнування в бічних розширеннях щілини $P_{\text{біч.}}=P_{\text{блок.}}-P_{\text{віл.}}$. Якщо співвідношення b/h збільшити у 2 рази до $b/h=0,5$ то зусилля лобового опору ножа від загального зусилля складатиме 36,3% а при $b/h=1$ в загальному зусиллі 45,9% становитиме зусилля лобового опору ножа ($P_{\text{лоб.}}$) і 54,1% опір ґрунту руйнуванню в бічних розширеннях щілини ($P_{\text{біч.}}$), а при $b/h=4$ зусилля лобового опору ножа ($P_{\text{лоб.}}$) зростає до 72,1%. Для інших типів ґрунтів прослідковується та ж сама залежність.

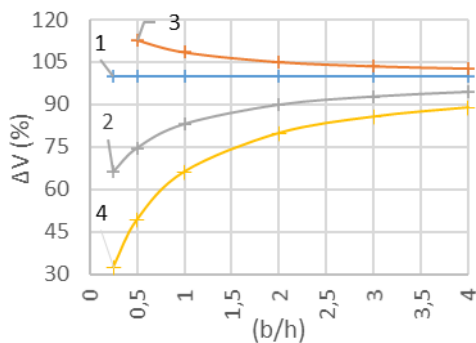
За даними САПР отримано співвідношення об'ємів і площі контакту тіл сколу (за різними способами) до об'єму і площі контакту тіл сколу при блокованому різанні для $h=0,1$ м (табл. 1, рис. 5).

Таблиця 1

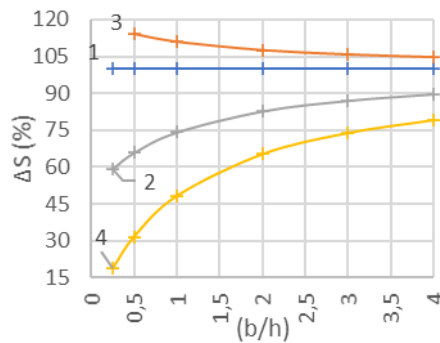
Зусилля різання від співвідношення ширини різання до глибини (b/h) в різних типах ґрунтів при $h=0,1$ м

b/h	Блок.	Асиметрично блоков.			Напівблоковане			Вільне		
	$P_{\text{блок}}$ (кН)	$\Delta P_{a,b}$ (%)	ΔV (%)	ΔS (%)	$\Delta P_{н,б}$ (%)	ΔV (%)	ΔS (%)	$\Delta P_{в.}$ (%)	ΔV (%)	ΔS (%)
Тверда глина										
0,25	3,071	----	----	----	59,2	66,25	59,34	30,9	32,50	18,69
0,5	3,326	115,3	141,21	114,12	63,3	74,65	65,80	37,4	49,29	31,61
1	3,835	113,3	127,90	110,92	69,8	83,15	74,09	47,9	66,29	48,19
2	4,852	110,5	116,97	107,50	78,8	89,98	82,59	62,3	79,93	65,18
3	5,870	108,7	112,18	105,69	84,6	92,88	86,89	71,6	85,74	73,79
4	6,888	107,4	109,52	104,59	88,7	94,50	89,50	78,2	88,98	79,00
Твердий суглинок										
0,25	1,808	----	----	----	59,8	66,85	59,52	30,4	33,71	19,03
0,5	1,965	112,0	139,88	115,39	63,7	75,33	66,05	35,7	50,66	32,10
1	2,279	110,3	126,76	111,85	69,9	83,75	74,38	47,2	67,50	48,75
2	2,907	108,1	116,16	108,09	78,3	90,42	82,85	61,2	80,81	65,69
3	3,535	106,7	111,57	106,13	83,7	93,22	87,11	70,2	86,41	74,22
4	4,163	105,7	109,01	104,93	87,5	94,76	89,68	76,5	89,49	79,36
Твердий супісок										
0,25	0,657	----	----	----	60,7	67,39	59,59	30,6	34,77	19,18
0,5	0,725	111,3	138,26	116,87	64,3	75,93	66,16	37,1	51,87	32,32
1	0,860	109,7	125,48	112,96	69,9	84,28	74,50	46,9	68,57	49,01
2	1,131	107,3	115,26	108,81	77,0	90,77	82,95	59,4	81,53	65,90
3	1,402	105,8	110,92	106,67	81,4	93,50	87,21	67,2	86,98	74,42
4	1,673	104,9	108,49	105,36	84,3	94,98	89,76	72,4	89,95	79,53

* (----) – робочий орган працює на закритичній глибині



а)



б)

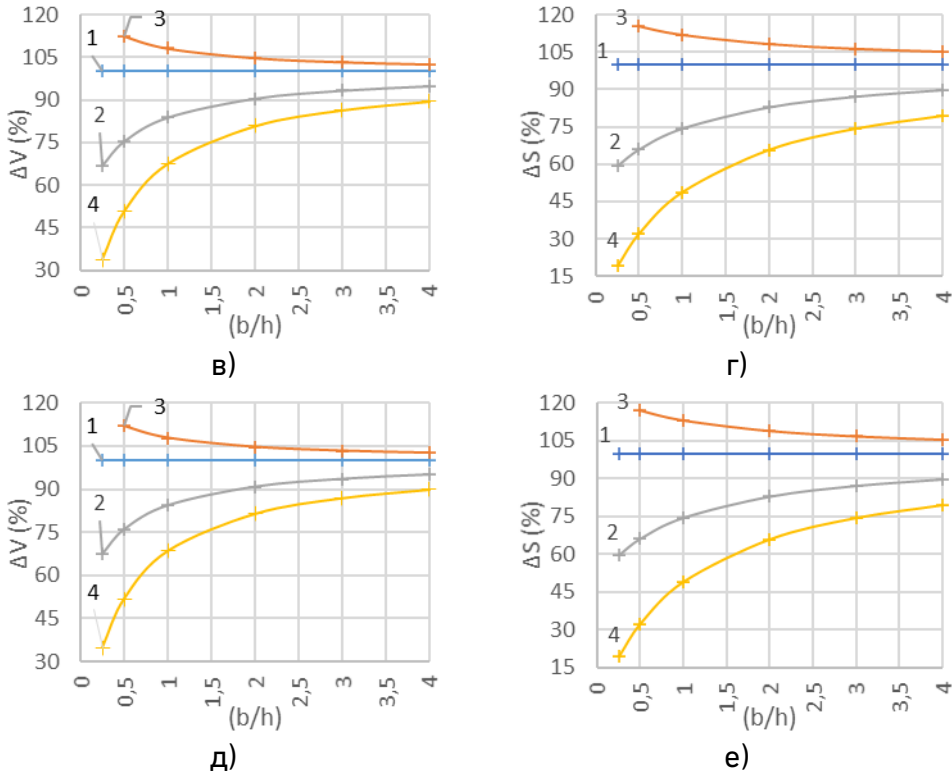


Рис. 5. Графіки співвідношення об'ємів і площі контакту тіл сколу (за різними способами) до об'єму і площі контакту тіл сколу при блокованому різанні (%): а), б) для твердої глини; в), г) для твердого суглинок; д), е) для твердого супіску; 1 – у блокованих умовах різання; 2 – у напівблокованих умовах різання; 3 – в асиметрично блокованих умовах різання; 4 – у вільних умовах різання

При розрахунку площі контакту бокових стінок для асиметрично блокованого різання до загального значення площі додатково додається значення бокової стінки, яка контактує з вертикальною блокуючою стінкою. А при розрахунку об'єму тіла сколу при асиметрично блокованому різанні до загального значення об'єму додатково враховується 1,5 значення об'єму тіла сколу бокового розширення. Такі припущення для асиметрично блокованого різання прийняті з конструктивних міркувань для полегшення розрахунків значень відносних об'ємів і площі.

Порівняння енергоємності робочого процесу при зміні умов різання робочих органів (ріжучих елементів) здійснено відносно розміщення ріжучих елементів в ряд, тому що при такому розміщенні

ріжучі елементи працюють в однакових (блокованих) умовах різання.

Вихідні дані для порівняння компоновання бралися з залежності відносного зусилля різання до співвідношення b/h для умов твердої глини при $h=0,1$ м.

За результатами аналізу для кількості ножів ($N=3; 5; 9$) найменш енерговитратним в роботі буде робоче обладнання з розміщенням ножів під кутом або V-подібно, тому що при такому розміщенні перший ріжучий елемент працює в блокованих умовах а кожен наступний в напівблокованих умовах різання. Для кількості робочих органів ($N= 4; 6; 8; 10$) найменш енерговитратним в роботі буде робоче обладнання з розміщенням робочих органів лінійно під кутом в плані, тому що при такому розміщенні перший ріжучий елемент працює в блокованих умовах, а кожен наступний в напівблокованих умовах різання. Для кількості робочих органів ($N=7$) найменш енерговитратною в роботі буде робоче обладнання з розміщенням робочих органів Δ -подібно, тому що при такому розміщенні два робочі органи, які розміщенні в першій лінії (ріжучі елементи 6, 7) працюють в блокованих умовах різання, робочі органи, які знаходяться в другій та третій лінії (ріжучі елементи 5, 4, 3, 2) працюють в напівблокованих умовах різання, а робочий орган в четвертій лінії працює у вільних умовах.

Висновок. Для знаходження раціонального способу компоновання робочих органів та зусиль різання для різних способів достатньо провести розрахунок для блокованого різання і скористатись співвідношенням відносної площі контакту бокових стінок (ΔS) до співвідношення b/h (при $b/h > 0,5$) з достатньою точністю, але виключенням відносно вузьких робочих органів ($b/h < 0,5$). Використання співвідношень відносних об'ємів (ΔV) можливе для відносно вузьких робочих органів ($b/h < 0,5$), а для інших випадків отримуються дещо завищені результати, особливо для відносно широких робочих органів ($b/h > 1,0$).

Найбільш раціональним способом розміщення для робочих органів у кількості 4; 6; 8; 10 шт. є розташування лінійно під кутом в плані, V-подібне розташування – для 3; 5; 9 робочих органів, а Δ -подібне – для 7 робочих органів.

Зі збільшенням відношення ширини різання до глибини різання (b/h) робочих органів вплив способу їх компоновання і умов різання на зміну енергоємності робочого процесу зменшується.

1. *Машини для земляних робіт : навч. посіб. / Л. А. Хмара, С. В. Кравець, В. В. Нічке та ін. ; під заг. ред. проф. Л. А. Хмари та проф. С. В. Кравця. Рівне ; Дніпропетровськ ; Харків, 2010. 575 с.* **2.** Кравець С. В., Супонев В. М., Гапонов О. О. *Визначення критично глибинних сил різання ґрунтів та енергоємності ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету : зб. наук. пр. 2021. Харків : ХНАДУ, 2021. Вип. 92. Т. 1. С. 192–199.* **3.** Кравець С. В., Стіньо О. В. *Визначення кута нахилу бічних стінок прорізу до горизонту. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету : зб. наук. пр. 2014. Харків : ХНАДУ, 2014. Вип. С. 65–66, 55–59.* **4.** Кравець С. В., Лук'янчук О. П., Косяк О. В., Гапонов О. О., Янчик Т. О. *Визначення критичної глибини різання ґрунту боковими різцями (зубами) траншейних екскаваторів. Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування : зб. наук. пр. 2019. Дніпро : ДВНЗ, 2019. Вип. 107. С. 75–84.* **5.** Kravets S. V., Lukianchuk O. P., Nechydyuk A. A. *Determination of the critical depth of soil cutting for earthmoving machines. Perspective trajectory of scientific research in technical sciences : collective monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2021. P. 235–270. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-085-8-12>* **6.** Кравець С. В., Супонев В. М., Гапонов О. О., Рагулін В. М., Щукін О. В., Дмитренко О. А. *Експериментальне визначення критичної глибини блокованого різання ґрунтів різцями та довжини лемеша ланцюгових екскаваторів. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету : зб. наук. пр. 2021. Харків : ХНАДУ, 2021. Вип. 95, Т. 1. С. 43–53. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.43>* **7.** Демішкан В. Ф. *Експлуатаційні дослідження процесів взаємодії робочих органів землерийно-транспортних машин із ґрунтом. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету : зб. наук. пр. 2009. Харків : ХНАДУ, 2009. Вип. 24.* **8.** Кравець С. В. *Теорія руйнування робочих середовищ : навч. посіб. Рівне, 2008. 124 с.* **9.** Кравець С. В., Бундза О. З., Супонев В. М., Гапонов О. О. *Визначення довжини лемеша та сили різання ґрунту різцями (зубами) траншейних екскаваторів. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету: зб. наук. пр. 2020. Харків : ХНАДУ, 2020. Вип. 88, Т. 2. С. 78–85. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.2.78>.* **10.** Кравець С. В., Нечидюк А. А., Косяк О. В. *Машини для прокладання підземних комунікацій (наукові основи створення) : підручник ; за заг. ред. С. В. Кравця. Рівне : НУВГП, 2018. 270 с.* **11.** Степанюк Б. І., Лук'янчук О. П. *Визначення співвідношення зусиль за різними видами різання ґрунту в багатоелементних робочих органах. Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем : четверта всеукраїнська наук.-тех. інтернет-конференція, 26–27 квіт. 2023 р. Рівне : НУВГП, 2023. С. 43–46.*

REFERENCES:

1. Mashyny dlia zemlianykh robot : navch. posib. / L. A. Khmara, S. V. Kravets, V. V. Nichke ta in. ; pid zah. red. prof. L. A. Khmary ta prof. S. V. Kravtsia. Rivne ; Dnipropetrovsk ; Kharkiv, 2010. 575 s. **2.** Kravets S. V., Suponiev V. M., Haponov O. O. Vyznachennia krytychno hlybynnykh syl rizannia gruntiv ta enerhoiemnosti lantsiuhovo-skrebkovykh transheinykh ekskavatoriv. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu* : zb. nauk. pr. 2021. Kharkiv : KhNADU, 2021. Vyp. 92. T. 1. S. 192–199. **3.** Kravets S. V., Stino O. V. Vyznachennia kuta nakhylu bichnykh stinok prorizu do horizontu. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu* : zb. nauk. pr. 2014. Kharkiv : KhNADU, 2014. Vyp. S. 65–66, 55–59. **4.** Kravets S. V., Lukianchuk O. P., Kosiak O. V., Haponov O. O., Yanchyk T. O. Vyznachennia krytychnoi hlybiny rizannia igruntiv bokovymy rizsiamy (zubamy) transheinykh ekskavatoriv. *Budivnytstvo. Materialoznavstvo. Mashynobuduvannia* : zb. nauk. pr. 2019. Dnipro : DVNZ, 2019. Vyp. 107. S. 75–84. **5.** Kravets S. V., Lukianchuk O. P., Nechydyuk A. A. *Determination of the critical depth of soil cutting for earthmoving machines*. Perspective trajectory of scientific research in technical sciences : collective monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2021. P. 235–270. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-085-8-12> **6.** Kravets S. V., Suponiev V. M., Haponov O. O., Rahulin V. M., Shchukin O. V., Dmytrenko O. A. Eksperymentalne vyznachennia krytychnoi hlybiny blokovanoho rizannia igruntiv rizsiamy ta dovezhyny lemesha lantsiuhovykh ekskavatoriv. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu* : zb. nauk. pr. 2021. Kharkiv : KhNADU, 2021. Vyp. 95, T. 1. S. 43–53. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.43> **7.** Demishkan V. F. Ekspluatatsiini doslidzhennia protsesiv vzaiemodii robochykh orhaniv zemleryino-transportnykh mashyn iz igruntom. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu* : zb. nauk. pr. 2009. Kharkiv : KhNADU, 2009. Vyp. 24. **8.** Kravets S. V. Teoriia ruinuвання robochykh seredovysch : navch. posib. Rivne, 2008. 124 s. **9.** Kravets S. V., Bundza O. Z., Suponiev V. M., Haponov O. O. Vyznachennia dovezhyny lemesha ta syly rizannia igruntiv rizsiamy (zubamy) transheinykh ekskavatoriv. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu* : zb. nauk. pr. 2020. Kharkiv : KhNADU, 2020. Vyp. 88, T. 2. S. 78–85. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.2.78> **10.** Kravets S. V., Nechydiuk A. A., Kosiak O. V. Mashyny dlia prokladannia pidzemnykh komunikatsii (naukovi osnovy stvorennia) : pidruchnyk ; za zah. red. S. V. Kravtsia. Rivne : NUVHP, 2018. 270 s. **11.** Stepaniuk B. I., Lukianchuk O. P. Vyznachennia spivvidnoshennia zusyly za riznymy vydamy rizannia igruntiv v bahatoelementnykh robochykh orhanakh. *Innovatsiini tekhnologii rozvytku mashynobuduvannia ta efektyvnoho funktsionuvannia transportnykh system* :

Lukianchuk O. P., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Stepaniuk B. I., Master (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

DETERMINATION OF THE RATIONAL COMPOSITION OF SOIL DEVELOPMENT EQUIPMENT ACCORDING TO THE CONSTRUCTION OF 3D-MODELS OF SOIL CHIP ELEMENTS

A theoretical method of determining cutting forces in various development conditions is described. Analytical dependences for determination of cutting forces in blocked, asymmetric-blocked, semi-blocked and free cutting methods are obtained. The dependences of the force ratio, the volume of the chipping bodies and the contact area of the side walls of the elements of the chipping bodies on the ratio of the width of the knife to the depth of cutting were obtained, with the help of which it is possible to determine the value of the forces for various cutting conditions and the rational arrangement of the working organs knowing only one force and parameters of 3d-models of soil chip elements.

***Keywords:* soil; cutting force; cutting method; 3d-model; chip body volume; contact area.**