

# Землерийні, дорожні та меліоративні машини

УДК 624.132.3

М.К. Сукач, д.т.н., проф.;  
С.І. Лисак, аспірант (КНУБА, Київ)

## РІЗАННЯ ГРУНТУ ДВОСЕКЦІЙНИМ ПОХИЛИМ ЛАНЦЮГОВИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

**АНОТАЦІЯ.** Виконано аналіз процесу різання ґрунту двосекційним ланцюговим траншеєкопачем, запропоновано його математичну модель. Розглянуто основні схеми встановлення різців на ланцюговому робочому органі.

**Ключові слова:** ґрунт, землерийна машина, різець, математична модель.

**АННОТАЦИЯ.** Выполнен анализ процесса резания ґрунта двухсекционным цепным траншеєкопачем, предложена его математическая модель. Рассмотрены основные схемы установки резцов на цепном рабочем органе.

**Ключевые слова:** ґрунт, землеройная машина, резец, математическая модель.

**SUMMARY.** It is analysed process of cutting of a ground two-section chain a dredge, its mathematical model is offered. The charts of setting of chisels are considered on a chain working organ.

**Key words:** soil, earth-moving machine, cutter, mathematical model.

### Вступ

Проектування та розробка землерийних машин, зокрема екскаваторів безперервної дії (ланцюгових траншеєкопачів), базується на врахуванні силових навантажень, що діють на елементи робочого органа.

Тому встановлення величини зусиль, які виникають під час руйнування ґрунтового середовища з якомога меншою похибкою, веде до раціоналізації конструктивних та вагових параметрів робочого обладнання.

Найбільш точні значення сили різання можна отримати шляхом врахування параметрів процесу, отриманих експериментальним шляхом.

Процес руйнування ґрунтового середовища робочими органами землерийних машин у різних умовах описано аналітичними моделями Ю.О. Ветрова, М.Г. Домбровського, А.М. Зеленіна, В.Л. Баладінського, М.К. Сукача та ін. Різання ґрунту інструментом, закріпленим на нескінченному ланцюгу досліджувалось О.М. Школьнім, В.А. Рум'янцевим, О.В. Биковим, І.Г. Басовим, Ф.Ф. Кириловим, В.А. Слепченко.

В моделях згаданих авторів не враховувалось те, що, окрім деформування ріжучої кромки, зношуються також і бокові грані

різального інструменту. Недостатньо розглянуто різні схеми встановлення різців на ланцюговому робочому органі.

Метою роботи є дослідження та аналіз процесу розробки ґрунту двохсекційним похилим ланцюговим робочим органом для вибору оптимальної схеми розміщення різців відповідно до певних ґрунтових умов.

### Виклад основного матеріалу

Робота двохсекційного ланцюгового траншеєкопача (зокрема при розкриванні підземних трубопроводів) [1] може відбуватись у ґрунтах різних категорій складності розробки, тому інтенсивне абразивне зношування робочого обладнання цілком імовірно.

Таким чином, в процесі експлуатації машини її різальний інструмент втрачає початкові геометричні параметри, які забезпечують мінімальну енергоємність різання ґрунту. Як наслідок, з часом контур гострого різця змінюється і приймає іншу конфігурацію, тому під час розрахунку зусиль, які виникають при взаємодії різця та ґрунтового середовища, необхідно враховувати цю обставину.

Очевидно, що під час експлуатації різця зношується ріжуча кромка та бокові грані ножа, які утворюють площадку розміщену під певним кутом до напрямку різання. Виходячи з цього необхідно розглядати чотири зони взаємодії ґрунту з різцем: лобову поверхню, зону абразивного стирання ріжучої кромки (площадку зношування) та дві зони, що утворюються на бічних гранях.

Розглянемо взаємодію різця із ґрунтом на його лобовій поверхні (рис. 1). Під час руху різця зі швидкістю  $v_p$  з боку робочого середовища (ґрунту) на передню поверхню передається нормальна реакція  $F_{гр1}$  та сила тертя по ній ґрунту [2]

$$F_{тр} = F_{гр1}f = F_{гр1}tg\varphi, \quad (1)$$

де  $f$  і  $\varphi$  – відповідно коефіцієнт і кут тертя по поверхні різця.

Цей вираз свідчить, що рівнодіюча реакція  $F_1$  нормальної сили  $F_{гр1}$  і сила тертя  $F_{тр1}$  відхиляються від перпендикуляра (нормалі) до передньої поверхні різця на кут тертя  $\varphi$  між поверхнею ґрунту і поверхнею різального інструменту.

Розкладемо силу  $F_1$  на дві складові: дотичну  $F_{\tau1}$  та нормальну  $F_{n1}$  до напрямку руху різця:

$$F_{\tau1} = F_1 \sin(\alpha + \varphi); \quad F_{n1} = F_1 \cos(\alpha + \varphi); \\ F_{n1} = F_{\tau1}ctg(\alpha + \varphi).$$

Дотична сила різання на лобовій поверхні різця

$$F_{\tau1} = F_{пит}SK_{\alpha}K_vK_{\phi}K_HK_{пр},$$

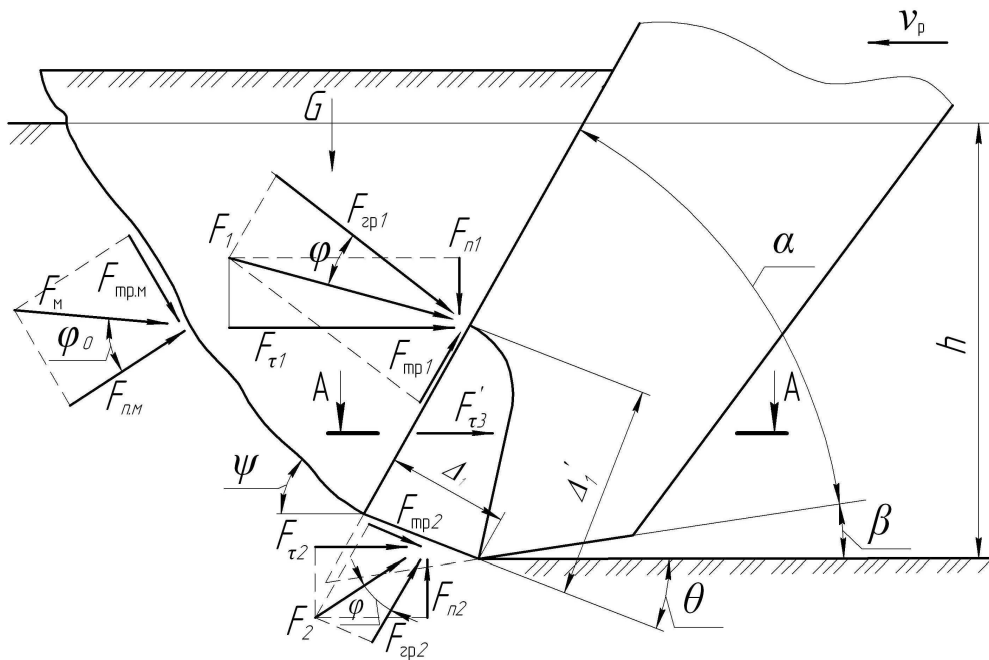


Рис. 1. Схема взаємодії ґрунту з різцем робочого органа

Склавши паралелограм цих сил, отримаємо їх рівнодіючу  $F_1$

$$F_1 = \sqrt{F_{гр1}^2 + F_{тр1}^2} = F_{гр1} \sqrt{1 + tg^2\varphi} = \frac{F_{гр1}}{\cos\varphi}.$$

де  $F_{пит}$  – питомий опір різанню ґрунту, МПа;  $S$  – площа зрізаної стружки,  $S = bh$  (тут  $b$ ,  $h$  – ширина та товщина зрізу, м);  $K_{\alpha}$  – коефіцієнт впливу кута різання на величину  $F_{\tau1}$  (при  $\alpha = 45^\circ$  коефіцієнт  $K_{\alpha} = 1$ , в інших випадках

$K_\alpha = 0,6...2,05$ );  $K_v$  – коефіцієнт впливу швидкості різання (при швидкості різання  $1...10$  м/с:  $K_v = 1,01...1,7$  [6]);  $K_\phi$  – коефіцієнт впливу форми передньої поверхні різця;  $K_H$  – коефіцієнт завантаженості різця залежно від схеми їх розташування на робочому органі;  $K_{пр}$  – коефіцієнт, який враховує просторовість процесу різання (залежить від співвідношення  $h/b$ ).

Значення  $F_{\tau 1}$  залежить від величини площі стружки  $S$  (що зрізується), виду і стану ґрунтового середовища, його фізико-механічних властивостей та геометричних параметрів робочого органа. Навіть при  $S = \text{const}$  опір ґрунту різанню має випадковий характер і може описуватись за законом Гауса (нормального розподілу) [3, 4].

Нормальна складова сили опору ґрунту руйнуванню на лобовій поверхні різця

$$F_{n1} = F_{\text{пит}} bh K_\alpha K_v K_\phi K_H K_{\text{пр}} \text{ctg}(\alpha + \varphi).$$

Розглянемо взаємодію різця із ґрунтом в зоні абразивного зношування ріжучої кромки. На площадці зношування виникає нормальна реакція  $F_{\tau 2}$  та сила тертя  $F_{\text{тр} 2}$  по ній ґрунту.

Подібно до схеми взаємодії ґрунту з лобовою поверхнею різця, діє сила різання на площадці зношування ріжучої кромки  $F_2$  (дотична  $F_{\tau 2}$  та нормальна  $F_{n2}$  складові). Дотична складова –  $F_{\tau 2} = F_2 \sin(\Theta + \varphi)$ , нормальна складова –  $F_{n2} = F_2 \cos(\Theta + \varphi)$  або  $F_{n2} = F_{\tau 2} \text{ctg}(\Theta + \varphi)$ . Будемо вважати, що площадка зношування знаходиться під кутом  $\Theta$  до денної поверхні ґрунту.

Дотичне зусилля різання на площадці зношування визначається залежністю

$$F_{\tau 2} = pb \Delta_1 K_v K_\phi K_o,$$

де  $p$  – тиск на площадці зношування, МПа;  $\Delta_1$  – довжина площадки зношування;  $K_o$  – коефіцієнт, який враховує опір переміщенню площадки зношування в напрямі руху різця.

Нормальне зусилля різання

$$F_{n2} = pb \Delta_1 K_v K_\phi K_o \text{ctg}(\Theta + \varphi).$$

Силу ваги ґрунту  $G$  можна вважати рівною вазі стружки на лобовій поверхні різця, що зрізується. Її напрям співпадає з напрямом нормальної сили  $F_{n1}$ . Значення сили ваги  $G$  в розрахунках враховується не завжди, оскільки для ґрунтів зі зчепленням  $50...200$  кПа вона складає  $5...7$  % від нормального опору ґрунту руйнуванню [3]. Але при роботі у ґрунтах зі зчепленням  $3...50$  кПа силою ваги нехтувати не можна, оскільки виникає поява значних похибок вимірювання значень сили опору ґрунту руйнуванню в цілому.

Розглянемо взаємодію різця із середовищем в зоні абразивного зношування бокових поверхонь (рис. 2). Вони утворюють площадки, які розміщено під кутами  $\gamma'$  та  $\gamma''$  до напрямку руху ножа  $v_p$ .

На площадках зношування з боку ґрунту виникають нормальні реакції  $F'_{\text{тр} 3}$ ,  $F''_{\text{тр} 3}$  та сили тертя  $F'_{\text{тр} 3}$ ,  $F''_{\text{тр} 3}$ . Розклавши сили різання  $F'_3$ ,  $F''_3$ , отримуємо їх дотичні та нормальні складові.

Для площадки зношування правої бокової грані:

– дотична складова

$$F'_{\tau 3} = F'_3 \sin(\gamma' + \varphi);$$

– нормальна складова

$$F'_{n3} = F'_3 \cos(\gamma' + \varphi);$$

$$F'_{n3} = F'_{\tau 3} \text{ctg}(\gamma' + \varphi).$$

Дотична складова зусилля різання на площадці зносу правої бокової грані

$$F'_{\tau 3} = p \Delta'_1 \Delta''_1 K_v K_\phi K_o,$$

де  $\Delta'_1$  – висота площадки зношування;  $\Delta''_1$  – довжина площадки зношування правої бокової грані.

Нормальна складова зусилля різання

$$F'_{n3} = p\Delta'_1\Delta''_2K_\phi K_\phi K_o \operatorname{ctg}(\gamma' + \phi).$$

Для площадки зношування лівої бокової грані:

– дотична складова сили

$$F''_{\tau3} = F''_3 \sin(\gamma'' + \phi);$$

– нормальна складова

$$F''_{n3} = F''_3 \cos(\gamma'' + \phi);$$

$$F''_{n3} = F''_{\tau3} \operatorname{ctg}(\gamma'' + \phi).$$

Дотична складова зусилля різання на площадці зношування лівої бокової грані

$$F''_{\tau3} = p\Delta'_1\Delta''_2K_v K_\phi K_o,$$

де  $\Delta''_2$  – довжина площадки зношування лівої бокової грані.

Тоді нормальна складова  $F''_{n3}$  буде дорівнювати

$$F''_{n3} = p\Delta'_1\Delta''_2K_v K_\phi K_o \operatorname{ctg}(\gamma' + \phi).$$

Якщо припустити, що кути нахилу площадок зношування бокових граней різця  $\gamma' = \gamma''$  та довжини площадок зношування  $\Delta'_1 = \Delta''_2$  (тобто рівні), матимемо рівність дотичних та нормальних зусиль різання на бокових гранях різця:

$$F'_{\tau3} = F''_{\tau3}; \quad F'_{n3} = F''_{n3}.$$

Таким чином, розглянувши механізм взаємодії різця з ґрунтом, отримуємо загальне дотичне зусилля різання одним різцем

$$F_\tau = F_{\tau1} + F_{\tau2} + F'_{\tau3} + F''_{\tau3}.$$

Складова  $F_{\tau1}$  утворюється під час взаємодії передньої поверхні різця з ґрунтом, а три інші обумовлені наявністю

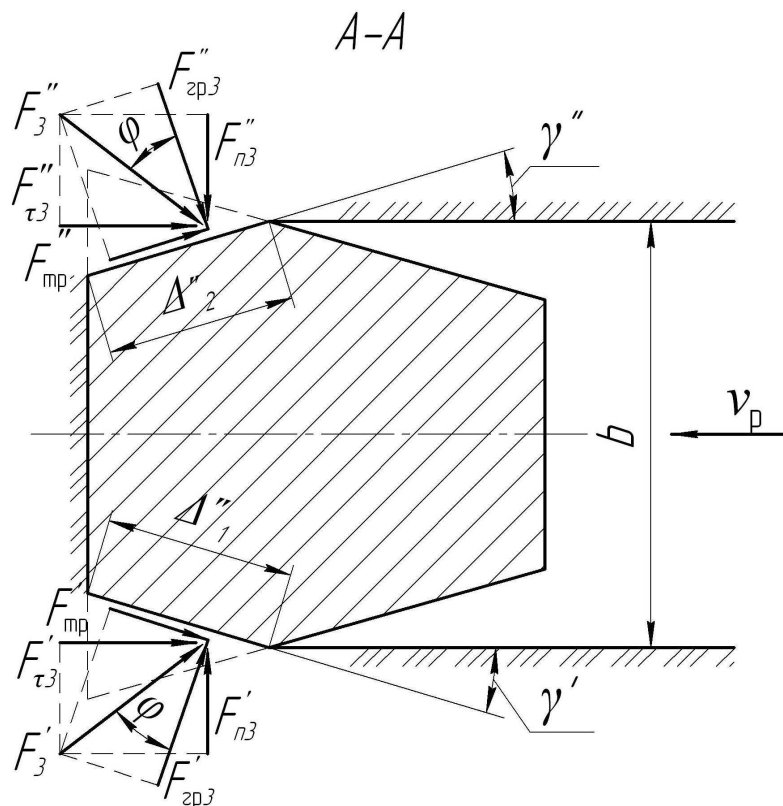


Рис. 2. Схема взаємодії ґрунту з різцем на площадках зношування бокових граней

площадок зношування в різних зонах.

Загальне нормальне зусилля різання одним різцем складає

$$F_n = F_{n1} + F_{n2} = F_{\tau 1} \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi) + F_{\tau 2} \operatorname{ctg}(\Theta + \varphi).$$

У цьому випадку нормальні зусилля на площадках зношування бокових граней  $F'_{n3}$  та  $F''_{n3}$  не враховуються, оскільки вони діють в площині, перпендикулярній напрямку різання  $v_p$ , і створюють стискуючий (блокуючий) вплив на переміщення різця. Цей вплив враховують поправковим коефіцієнтом.

При наростанні нормальних та дотичних напружень в масиві відбувається відділення та переміщення частин ґрунту поверхнею ковзання під кутом  $\psi$ . При цьому на шар ґрунту, який відокремився, діє нормальна реакція з боку масиву  $F_{n.m}$ . При переміщенні відокремленої частини ґрунту по поверхні ковзання виникає сила тертя  $F_{\tau.p.m}$ . Результуючою цих сил є опір переміщенню ґрунту з боку масиву

$$F_M = F_{n.m} / \cos \varphi_0,$$

де  $\varphi_0$  – кут зовнішнього тертя ґрунту.

Таким чином, сумарне дотичне зусилля різання різцями (рис. 3), що знаходяться в забої траншеї, для однієї ланцюгової секції дорівнює [5]

$$F_{\Sigma \tau} = z F_{\tau},$$

де  $z$  – кількість різців, закріплених на ґрунтовиносних балочках відповідної ланцюгової секції.

Враховуючи те, що різальний інструмент встановлюється за певною схемою розташування, значення  $z$  представимо у вигляді

$$z = z_0 + z_{н.в} + z_в,$$

де  $z_0, z_{н.в}, z_в$  – кількість різців, які діють, відповідно:  $z_0$  – за схемою блокованого

різання;  $z_{н.в}$  – за схемою напівблокованого різання;  $z_в$  – за схемою вільного різання.

Тому вираз для  $F_{\Sigma \tau}$  можна записати у вигляді

$$F_{\Sigma \tau} = F_{\tau} z_0 + F'_{\tau} \cdot z_{н.в} + F''_{\tau} z_в.$$

Позначивши  $F'_{\tau} = \lambda' F_{\tau}$ ,  $F''_{\tau} = \lambda'' F_{\tau}$ , отримаємо

$$F_{\Sigma \tau} = F_{\tau} (z_0 + \lambda' z_{н.в} + \lambda'' z_в),$$

де  $\lambda', \lambda''$  – коефіцієнти, що враховують спосіб різання ґрунту.

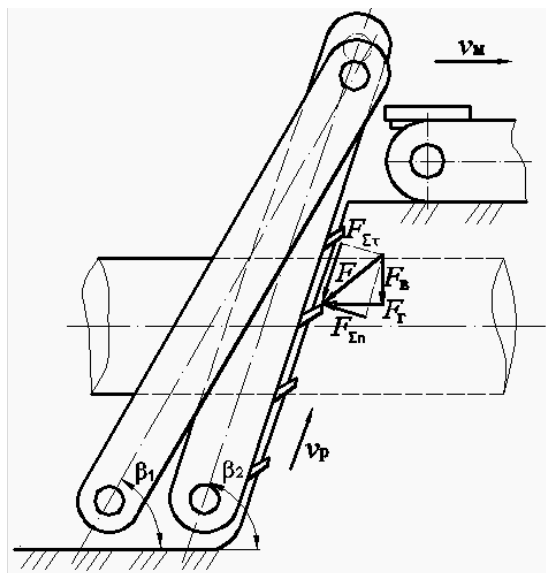


Рис. 3. Схема визначення складових реакції ґрунту на робочий орган

Аналогічним чином можна записати вираз для визначення нормальної складової різання  $F_{\Sigma n}$

$$F_{\Sigma n} = F_n (z_0 + \lambda' z_{н.в} + \lambda'' z_в).$$

Загальне зусилля на кожній секції

$$F = F_{\Sigma \tau} + F_{\Sigma n}.$$

Тоді вертикальна складова реакції ґрунту  $F_B$  на робочий орган з двома ла-

нцюговими секціями та горизонтальна складова  $F_r$  (зусилля подачі), згідно з рис. 3, буде

$$F_B = (F_{\Sigma\tau} \sin \beta_1 - F_{\Sigma n} \cos \beta_1) + (F_{\Sigma\tau} \sin \beta_2 - F_{\Sigma n} \cos \beta_2);$$

$$F_r = (F_{\Sigma\tau} \cos \beta_1 - \Sigma F_{\Sigma n} \sin \beta_1) + (F_{\Sigma\tau} \cos \beta_2 - \Sigma F_{\Sigma n} \sin \beta_2),$$

де  $\beta_1, \beta_2$  – відповідні кути встановлення ланцюгових секцій до горизонту.

Конструкція різального інструменту та його розміщення на ланцюгових секціях робочого органа значно впливає на продуктивність, надійність та довговічність машини в цілому та на сприйняття динамічних навантажень на робочому обладнанні.

Робочий орган ланцюгового траншеєкопача, що оснащений комплектом змінних різців, повинен забезпечувати: мінімальну енергоємність процесу копання ґрунту, максимальну надійність та довговічність усіх елементів робочого органа, здатність швидкої заміни різального інструменту, що вийшов з ладу внаслідок поламки або абразивного зношування.

Зазвичай, ланцюгові траншейні екскаватори створюються для різних ґрунтових середовищ із застосуванням таких основних схем розташування різців на робочому органі: симетричне розташування («ялинка», рис. 4, а); несиметричне розташування (розріджена «ялинка», рис. 4, б); ступінчатошахове розташування (рис. 4, в); змішане розташування 1 (рис. 4, з); змішане розташування 2 (рис. 4, д). Різці встановлюють у карманах ґрунтоносіх балочок, які, у свою чергу, прикріплюються до ланцюгів.

Для наведених схем розташування різців характерні такі параметри:

- кількість ліній різання  $n_L$ ;
- крок розташування різців вздовж ліній різання  $t_p$  (поперечний крок різання в площині, перпендикулярній напрямку різання ґрунту  $v_p$ );
- $m$  – кількість різних варіантів встановлення різців в поперечній площині за напрямом різання.

Ширину розробки ґрунту ланцюговими секціями вибирають відповідно до схеми різання (рис. 4) таким чином, щоб кожен різець здійснював руйнування конкретно визначеної тільки для нього зони забою. У цьому разі число ліній різання визначається залежно від фізико-механічних властивостей масиву, параметрів траншеї та конструктивно-кінематичних параметрів робочого органа (ширини ріжучого інструменту, кутів встановлення робочого органа).

Слід зазначити, що ґрунторуйнуючий інструмент працює за різними схемами розташування різців на робочому органі і виконує блоковане, напівблоковане, вільне різання, тому кожен різець сприймає різні навантаження з боку середовища. Таким чином, стан кожного різця необхідно оцінювати за ступенем (коефіцієнтом) завантаженості (блокованості процесу різання).

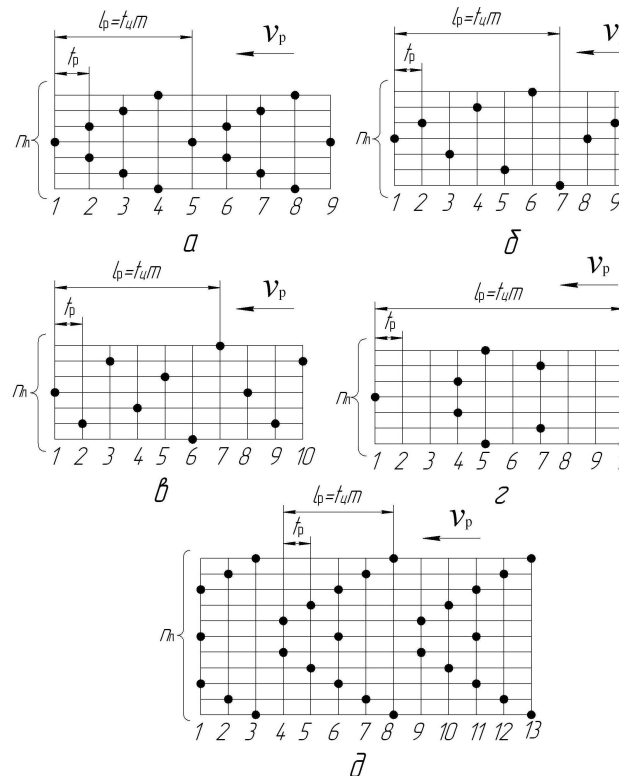


Рис. 4. Конструктивні схеми встановлення різців на ланцюговому робочому органі

Під час роботи траншеєкопача зі змішаними схемами розташування (див. рис. 4, з, д), в забої знаходиться більша кількість різців, завдяки чому частина загального зусилля різання, яка припадає на кожен різець, – незначна, що не дає можливості йому руйнувати міцні ґрунти. Крім того, процес різання характеризується значними втратами потужності на тертя контактних поверхонь різців із розроблюваним середовищем.

Зменшення числа різців, які одночасно знаходяться в забої, веде до підвищення зусилля, яке припадає на один різець. Тому, реалізуючи більші зусилля на інструменті, можна виконувати руйнування міцніших ґрунтів. Зведення загального числа різального інструменту до мінімального значення забезпечує зниження втрат на тертя та підвищує роботу ланцюгового траншейного екскаватора у важких ґрунтових середовищах (наприклад, при роботі у мерзлих ґрунтах). Оскільки зусилля на кожному окремому різці зростають, необхідно забезпечувати міцність конструкції різця. Враховуючи те, що різці працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування, необхідно армувати їх ріжучі частини пластинками металокерамічних сплавів.

Сплави типу ВК (В – вольфрам, К – кобальт) мають високу зносостійкість та міцність (наприклад, сплави для пластинок ВК6В, ВК8В, ВК15). Однак, застосування таких різців в ґрунтах із твердими вкрапленнями обмежене, оскільки вони мають недостатню ударну міцність.

Перспективними напрямками подальших досліджень є вивчення процесу взаємодії робочого органа двосекційного траншеєкопача з ґрунтом із урахуванням його напружено-деформованого стану (НДС).

Для оптимізації конструктивного виконання робочого органа необхідно встановити:

- коефіцієнт блокованості різця в залежності від схеми різання та числа ліній різання;

- необхідну кількість ліній різання  $n_d$  в залежності від параметрів ґрунтового середовища та параметрів робочого органа;

- оптимальний крок розташування різців  $t_p$  в лінії різання  $l_p$ .

## Висновки

1. На основі проведених досліджень процесу руйнування ґрунту двосекційним похилим ланцюговим робочим органом визначено зусилля, які діють на робочий орган машини. Це дає можливість точніше встановити необхідні параметри робочого обладнання за раціональною матеріаломісткістю.

2. Проаналізовано основні схеми встановлення різців на ланцюговому робочому органі, що дозволить здійснювати раціональну їх комплектацію залежно від категорії складності розробки ґрунту.

## Література

1. Патент України №37784, E02 F5/00. Землерийне обладнання траншеєкопача для розкривання-заглиблення трубопроводів / Сукач М.К., Лисак С.І. (Україна). – и 2008 08334; Заявл. 20.06.2008; Опубл. 10.12.2008, Бюл. № 23.
2. *Строительные* машины: учеб. для вузов по спец. С86 ПГС / Д.П. Волков и др.; Под ред. Д.П. Волкова. – М.: Высш. шк., 1988. – 319 с.
3. *Ветров Ю.А.* Резание ґрунтов землерийными машинами. – М.: Машиностроение, 1971. – 357 с.
4. *Гальперин А.И.* Строительно-монтажные машины: учеб. для техникумов. М.: Недра, 1982. – 214 с.
5. *Домбровский Н.Г., Гальперин М.И.* Строительные машины (в 2-х ч.). Ч. II: учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Строит. и дор. машины и обор.» – М.: Высш. шк., 1985. – 224 с.
6. *Мусійко В.Д.* Екскаватори поздовжнього копання: навч. посібник. – К.: НТУ, 2008. – 240 с.

Рецензент: В.П. Ковбаса, д.т.н., проф.  
(НУБіП, Київ)

Отримано: 04.11.2010 р.