

Техніка для земляних та дорожніх робіт

УДК 624.132

В.М.Смірнов, канд. техн. наук, професор КНУБА,

В.П.Головань, канд. техн. наук, доцент КНУБА,

О.Ю.Вольтерс, доцент КНУБА

ВПЛИВ ФОРМИ БУРОВИХ РІЗЦІВ НА СИЛИ РІЗАННЯ

У сучасному будівельному виробництві при зведенні споруджень на пільових фундаментах, у дорожньому і електромережевому будівництві широке поширення одержала технологія з застосуванням бурових робіт. Більшість серійно випущених будівельних бурильних і бурильно-кранових машин засновано на принципі обертального буріння з руйнуванням ґрунту різцевими робочими органами. Найбільше поширення одержали різці трьох видів: із прямокутним, трикутним і напівкруглим контуром ріжучої крайки [1]. Крім того, кожний з перерахованих видів різців може мати лобову поверхню різної форми – випуклу, плоску, двох- і багатогранну.

Опис процесу різання ґрунту плоским прямокутним різцем (ножем) досить відомий [2, 3], однак вплив форми різця на процес буріння вивчений ще недостатньо. З точки зору авторів, опис сил різання, викладений у [3], можна поширити на різці з трикутним і напівкруглим контуром ріжучої крайки. Дотримуючись основних положень взаємодії плоского прямокутного різця з ґрунтом, можна описати процес різання при руйнуванні ґрунту різцями з трикутним і напівкруглим контуром ріжучої крайки.

В однорідному ґрунтовому масиві переміщається клиноподібний різець. Механічні властивості масиву (межі міцності на стиск σ_c і розтягування σ_p , кути зовнішнього ρ і внутрішнього ρ тертя відомі. Ґрунт розробляється в умовах блокованого різання на глибину h_{max} (рис. 1). Ширина різання ($b = 2h_{max} \operatorname{tg} \theta$ – для різців із трикутним контуром і $b = 2R \sin \varphi$ – для різців з напівкруглим контуром ріжучої крайки) – величина змінна і залежить від глибини різання, а також кута нахилу θ бокових ребер до вертикалі і радіуса R ріжучої крайки різця. Різець встановлений під кутом різання δ до напрямку руху.

При переміщенні різця в кожний довільний момент часу елемент стружки може створитися в будь-якій частині лобової поверхні різця (ліворуч, праворуч, у середині). Причому в кожний момент створиться лише один елемент. Довільний елемент стружки в плані має контур, який близький до прямокутного з випадковими і незалежними розмірами: шириною S_i і довжиною T_i (рис. 2). Просторова форма елемента – клин. З усіх боків він обмежений площинами. Навантаження від різця до ґрунту передається в межах прямокутної площадки АООА. Площини АВ і ВС – поверхні руйнування зсуву; CD – відриву. Бічні грані клина ОАЕ містять сліди зсуву до відриву. Нижня пластична

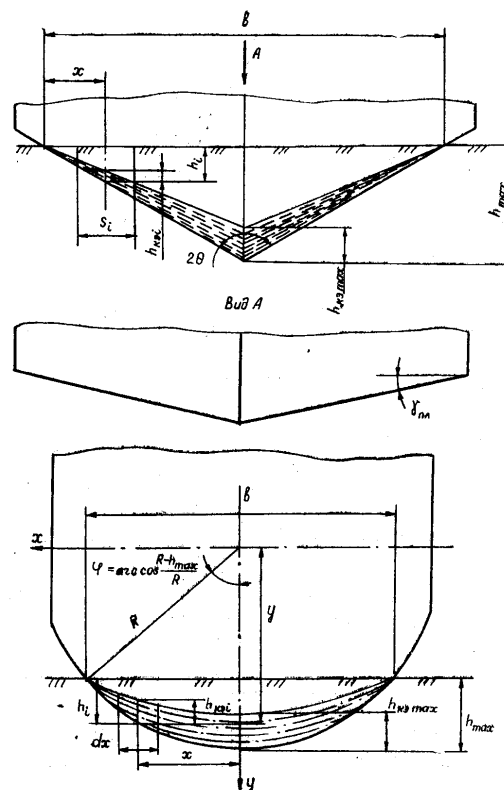


Рис. 1. Схема взаємодії різців з ґрунтом, що розробляється

(зруйнована) частина елемента розмежована з пружною (недоторканою) горизонтальною площиною CO .

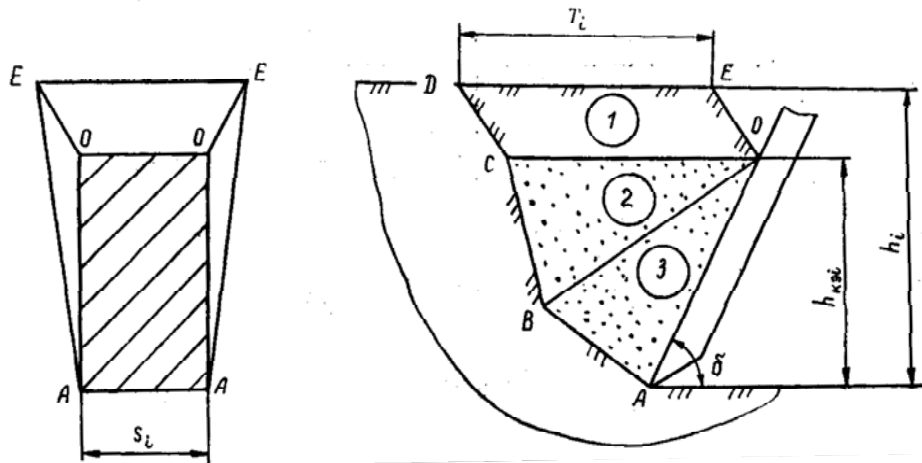


Рис. 2. Форма елемента стружки, що відокремився і його повздовжній розріз

Розріз елемента стружки уздовж траєкторії різання має складний контур. За ступенем деформації і характеру відносного руху часток ґрунту при формуванні елемента в його перерізі виділені три області: пружна 1, пластична 2 і однорідна (ядро ущільнення) 3 у виді чотиригранної піраміди з рівнонахиленими гранями. В пружній області зв'язки між частками ґрунту не порушені, деформації оборотні. В пластичній області первісні зв'язки між частками ґрунту порушені. Частки по лініях ковзання переміщуються одна відносно іншої. В однорідній області зв'язки між частками ґрунту порушені і напруги досягають свого найбільшого значення. У процесі розробки ґрунту однорідної області як тверде тіло скочає по лобовій поверхні різця і поверхні ковзання AB . Він руйнує зв'язки в пластичній області, змушуючи частки ґрунту рухатися по лініях ковзання. В міру просування різця обсяг пластично деформованого ґрунту збільшується за рахунок пружного. Настає момент, коли на межі розділу пластичної і пружної областей у точці C зароджується тріщина відриву, що просувається до денної поверхні.

Сила різання, що діє на різець, при відділенні 3-го елемента змінюється від свого максимального значення $P_{\max i}$ до мінімального $P_{\min i}$ і представляє суму двох доданків:

$$P_{\max i} = P'_{ели} + P_{ми}; \quad P_{\min i} = P''_{ели} + P_{ми} \quad (1)$$

Тут $P'_{а\hat{e}3}$ - частина сили, необхідна для відділення 3-го елемента; $P''_{а\hat{e}3}$ - вплив на різець елемента після його відділення; D_{i3} - частина сили різання, що створює напружений стан в незруйнованій частині масиву.

У свою чергу

$$P'_{ели} = p'_{ели} S_i h_{кеі}; \quad P''_{ели} = 0,2 P'_{ели} = 0,2 p'_{ели} S_i h_{кеі}; \quad P_{ми} = 0,5 p_{ми} F_{осм}^{\kappa},$$

де $p'_{ели}$, $p_{ми}$ - питомі контактні сили в різних частинах масиву, що руйнується;

S_i , $h_{кеі}$ - відповідно ширина і контактна висота елемента; $F_{ін\hat{o}}$ - площа взаємодії різця з масивом, за винятком площі елемента, що відокремлюється в даний момент.

Тоді

$$P_{\max i} = p'_{ели} S_i h_{кеі} + 0,5 p_{ми} F_{осм}^{\kappa}; \quad P_{\min i} = 0,2 p'_{ели} S_i h_{кеі} + 0,5 p_{ми} F_{осм}^{\kappa}. \quad (2)$$

Коефіцієнт 0,5 у другому доданку формул (2) враховує змінний характер фактичної контактної висоти цілого масиву з різцем (вона змінюється від 0 до $h_{е\hat{a}max}$). Коефіцієнт 0,2 враховує експериментально встановлений факт, що полягає в тому, що в дійсності елемент стружки, що відокремився, по своїй висоті не дорівнює дійсній глибині прорізу, а приблизно складає 20% останньої [2].



Миттєві питомі контактні сили різання – величини випадкові, незалежні, а їхні середні значення будуть $\delta'_{\dot{a}\dot{e}^3} = \delta_{i^3} = \bar{\delta}_3$. Контактна висота довільного i^3 -го елемента зв'язана лінійно з глибиною різання h_3 (відповідні висоти елементів і глибини частин прорізи дорівнюють $h_{\dot{e}\dot{a}^3} = \varphi_{\dot{e}\dot{a}} h_3$), де $\varphi_{\dot{e}\dot{a}}$ – відносна контактна висота елемента, що залежить від параметрів ґрунту і кута різання δ .

Від $P_{\min i}$ до $P_{\max i}$ миттєва сила міняється лінійно, тому середня сила в межах i^3 -го елемента

$$D_3 = (D_{\max i} + P_{\min i})0,5. \quad (3)$$

Площа взаємодії різця з масивом ґрунту (рис. 1) при різанні на глибині $h = h_{\max}$:

для різця з трикутним контуром ріжучої крайки

$$F = h_{\max} b / 2; \quad (4a)$$

для різця з напівкруглим контуром

$$F = \int_F h_i dx = \frac{1}{2} [bh_{\max} + R(l - b)], \quad (4b)$$

де $l = 2\varphi R$ – довжина крайки різця з напівкруглим контуром.

Глибина різання h_3 для різців з напівкруглим контуром визначається в такий спосіб:

$$h_i = y - (R - h_{\max}) = \sqrt{R^2 - x^2} - (R - h_{\max}).$$

Площа контакту різця з масивом (на рис. 1 заштрихована) із трикутним контуром ріжучої крайки

$$F^{\dot{e}} = h_{\dot{e}\dot{a}\max} b / 2 = h_{\dot{e}\dot{a}\max} h_{\max} \operatorname{tg} \theta = \varphi_{\dot{e}\dot{a}} h_{\max}^2 \operatorname{tg} \theta, \quad (5a)$$

а для різця з напівкруглим контуром

$$F^{\dot{e}} = \int_{(F)} h_{\dot{e}\dot{a}^3} dx = \int_{(F)} \varphi_{\dot{e}\dot{a}} h_3 dx = \varphi_{\dot{e}\dot{a}} \int_{(F)} h_i dx = \varphi_{\dot{e}\dot{a}} F = \frac{\varphi_{\dot{e}\dot{a}}}{2} [bh_{\max} + R(l - b)]. \quad (5b)$$

Площа контакту різця з елементом не залежить від виду контуру ріжучої крайки і визначається за формулою:

$$F_{\dot{n}\dot{e}}^{\dot{e}} = h_{\dot{e}\dot{a}^3} S_3 = \varphi_{\dot{e}\dot{a}} h_i 2\varphi_{\dot{e}\dot{a}} \varphi_s h_i = 2\varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 \varphi_s h_i^2, \quad (6)$$

де $\varphi_s = S_i / 2h_{\dot{e}\dot{a}i}$ – коефіцієнт ширини елемента.

У свою чергу

$$F_{\dot{i}\dot{n}\dot{o}}^{\dot{e}} = F^{\dot{e}} - F_{\dot{n}\dot{e}}^{\dot{e}} \quad (7)$$

і для різця з трикутним контуром ріжучої крайки

$$F_{\dot{i}\dot{n}\dot{o}}^{\dot{e}} = \varphi_{\dot{e}\dot{a}} h_{\max}^2 \operatorname{tg} \theta - 2\varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 h_i^2 \varphi_s, \quad (8a)$$

а для різця з напівкруглим контуром

$$F_{\dot{i}\dot{n}\dot{o}}^{\dot{e}} = \frac{\varphi_{\dot{e}\dot{a}}}{2} [bh_{\max} + R(l - b)] - 2\varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 h_i^2 \varphi_s. \quad (8b)$$

Підставимо значення $F_{\dot{i}\dot{n}\dot{o}}^{\dot{e}}$ у формулу (2), одержимо

$$P_{\max i} = 2\varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 h_i^2 p_i + 0,5 \bar{p}_i F_{\dot{i}\dot{n}\dot{o}}^{\dot{e}}. \quad (9)$$

Для різця з трикутним контуром ріжучої крайки вираз (9) приймає вид

$$P_{\max i} = \bar{p}_i \{ 2\varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 (2\operatorname{ctg} \theta)^2 + 0,5 [\varphi_{\dot{e}\dot{a}} h_{\max}^2 \operatorname{tg} \theta - 2\varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 \varphi_s (x \operatorname{ctg} \theta)^2] \}, \quad (10a)$$

для різця з напівкруглим контуром

$$P_{\max i} = \bar{p}_i \left\{ \frac{\varphi_{\dot{e}\dot{a}}}{4} [bh_{\max} + R(l - b)] + \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 h_i^2 \right\} = \bar{p}_i \left\{ \frac{\varphi_{\dot{e}\dot{a}}}{4} [bh_{\max} + R(l - b)] + \right.$$



$$+ \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 [R^2 + (R - h_{\max})^2] - x^2 \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 - 2\varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 (R - h_{\max}) \sqrt{R^2 - x^2} \}. \quad (10\text{б})$$

Аналогічно можна визначити і мінімальну силу різання:

$$P_{\min i} = 0,2 \bar{p}_i S_i h_{\dot{e}\dot{a}i} + 0,5 \bar{p}_i F_{i\dot{m}\dot{o}}^{\dot{e}} \quad (11)$$

для різця з трикутним контуром ріжучої окрайки

$$P_{\min i} = \bar{p}_i [0,4 \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 x^2 \text{ctg} \theta + 0,5 (\varphi_{\dot{e}\dot{a}} h_{\max}^2 \text{tg} \theta - 2 \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 \varphi_s x^2 \text{ctg}^2 \theta)], \quad (12\text{a})$$

для різця з напівкруглим контуром

$$P_{\min i} = \bar{p}_i \left\{ \left[\frac{\varphi_{\dot{e}\dot{a}}}{4} (b h_{\max} + R(l - b)) \right] - 0,6 \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 [R^2 + (R - h_{\max})^2] + 0,6 x^2 \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 + \right. \\ \left. + 1,2 \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 \varphi_s (R - h_{\max}) \sqrt{R^2 - x^2} \right\}. \quad (12\text{б})$$

У різців з напівкруглим контуром ріжучої окрайки глибина різання h_i змінюється по ширині різця від 0 по краях ріжучої окрайки, до h_{\max} в її центрі, тому

$$\int_0^{b/2} \sqrt{R^2 - x^2} dx = R^2 \int_0^{b/2} \cos^2 z dz = R^2 \left[\frac{b}{2R} + 0,5 \left(\cos \frac{b}{R} - 1 \right) \right], \quad (13)$$

де $z = x/R$.

Середньомаксимальна сила різання визначається для різця з трикутним контуром ріжучої окрайки

$$\bar{P}_{\max} = \frac{1}{h_{\max} \text{tg} \theta} \int_0^{h_{\max} \text{tg} \theta} P_{\max i} dx = \frac{1}{h_{\max} \text{tg} \theta} \int_0^{h_{\max} \text{tg} \theta} \bar{p}_i [2 \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 x^2 \text{ctg}^2 \theta^2 + \\ + 0,5 (\varphi_{\dot{e}\dot{a}} h_{\max}^2 \text{tg} \theta - 2 \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 x^2 \text{ctg}^2 \theta)] dx = \bar{p}_i h_{\max}^2 \varphi_{\dot{e}\dot{a}} \text{tg} \theta \left(0,5 + \frac{1}{3} \varphi_{\dot{e}\dot{a}} \varphi_s \right), \quad (14\text{a})$$

а для різця з напівкруглим контуром

$$\bar{P}_{\max} = \frac{2}{b} \int_0^{b/2} P_{\max i} = \bar{p}_i \left\{ \frac{\varphi_{\dot{e}\dot{a}}}{4} (b h_{\max} + R(l - b)) + \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 [R^2 + (R - h_{\max})^2] - \right. \\ \left. - \frac{b^2}{12} \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 - 2 \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 \frac{(R - h_{\max}) R^2}{b} \left(\frac{b}{R} + \cos \frac{b}{R} - 1 \right) \right\}. \quad (14\text{б})$$

У свою чергу середньомінімальна сила для різця з трикутним контуром ріжучої окрайки

$$\bar{P}_{\min} = \frac{1}{h_{\max} \text{tg} \theta} \int_0^{h_{\max} \text{tg} \theta} P_{\min i} dx = \bar{p}_i h_{\max}^2 \varphi_{\dot{e}\dot{a}} \text{tg} \theta (0,5 - 0,2 \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}), \quad (15\text{a})$$

а для різця з напівкруглим контуром

$$\bar{P}_{\min} = \frac{2}{b} \int_0^{b/2} P_{\min i} dx = \bar{p}_i \left\{ \frac{\varphi_{\dot{e}\dot{a}}}{4} [b h_{\max} + R(l - b)] - 0,6 \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 [R^2 + \right. \\ \left. + (R - h_{\max})^2] + \frac{b^2}{20} \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 - \frac{6}{5} \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}}^2 \frac{(R - h_{\max}) R^2}{b} \left(\frac{b}{R} + \cos \frac{b}{R} - 1 \right) \right\}. \quad (15\text{б})$$

Тоді середня сила різання

$$\bar{P} = 0,5 (\bar{P}_{\max} + \bar{P}_{\min}). \quad (16)$$

Для різця з трикутним контуром ріжучої окрайки

$$\bar{P} = \bar{p} h_{\max}^2 \varphi_{\dot{e}\dot{a}} \text{tg} \theta \left(0,5 + \frac{2}{15} \varphi_s \varphi_{\dot{e}\dot{a}} \right). \quad (17\text{a})$$

Для різця з напівкруглим контуром

$$\begin{aligned} \bar{P} = \bar{p}_i \left\{ \left(\frac{\varphi_{\hat{e}\hat{a}}}{4} (bh_{\max} + R(l - b)) + 0,1\varphi_s\varphi_{\hat{e}\hat{a}}^2 [R^2 + (R - h_{\max})^2] + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{b^2}{30} \varphi_s\varphi_{\hat{e}\hat{a}}^2 - \frac{8}{5} \varphi_s\varphi_{\hat{e}\hat{a}}^2 \frac{(R - h_{\max})}{b} R^2 \left(\frac{b}{R} + \cos \frac{b}{R} - 1 \right) \right\}. \end{aligned} \quad (176)$$

Запропоновані залежності для визначення сил різання справедливі лише для різців із плоскою лобовою поверхнею. Для обліку впливу форми лобової поверхні різця з трикутним контуром ріжучої крайки, розглянута двохгранна форма лобової поверхні, а для різця з напівкруглим контуром – радіально-опукла. На думку авторів, ці форми лобової поверхні можуть з достатньою точністю апроксимувати поверхню будь-якої кривизни.

Облік впливу двохгранної форми лобової поверхні різця можна зробити, використавши методику, викладену в [4]. У ній показано, що цей вплив може бути враховано введенням коефіцієнта $\varphi_{\hat{n}\hat{a}}$:

$$\varphi_{\hat{n}\hat{a}} = 1 - 0,07 \frac{h}{b} (\operatorname{ctg} \delta + \operatorname{ctg} 35^\circ) \sin 2\gamma_{i\hat{e}}, \quad (18)$$

де $\gamma_{i\hat{e}}$ - кут повороту лобової грані ножа в плані (рис. 1).

У нашому випадку $h = h_{\max}$, а $b = 2h_{\max} \operatorname{tg} \theta$.

Тоді

$$\bar{P}_{\Delta} = \varphi_{\hat{n}\hat{a}\Delta} \bar{P}, \quad (19)$$

де \bar{P}_{Δ} - середня сила різання з врахуванням впливу двохгранної форми лобової поверхні.

Для обліку радіально-опуклої форми лобової грані різця з напівкруглим контуром ріжучої крайки його поверхня апроксимується двома симетричними плоскими гранями й аналітичним описом виконується по формулах для різця з двохгранною лобовою поверхнею, описаною вище.

Таким чином, вдалося вивести залежності для аналітичного визначення сил різання, що виникають при бурінні міцних ґрунтів найбільш розповсюдженими різцями. Результати теоретичного дослідження використані при проектуванні бурових головок. Останні виготовлені і випробувані [5]. Прогнозований крутний момент від сил різання досить точно відбиває характер зміни експериментальних спостережень.

Література

1. *Свешников И.А., Мишинаевский Л.Д.* Расчёт рациональной конструкции горнобурового инструмента // Синтетические сверхтвердые материалы в буровом инструменте. – К.: ИСМ АН УССР. – 1988. – С. 112-119.
2. *Ветров Ю.А.* Резание грунтов землеройными машинами – М.:Машиностроение, 1971. – 357 с.
3. *Крупко В.А.* Аналитическая теория резания плоским широким ножом // Горные, строительные и дорожные машины. – Вып. 16. – К.: Техніка, 1973. – С. 13-17.
4. *Смирнов В.Н.* Особенности процесса разрушения грунтов двугранными ножами // Горные, строительные и дорожные машины. – Вып. 42. – Киев: Техніка, 1989. – С. 50-54
5. *Кособродов Ю.А., Крупко В.А., Вольтерс А.Ю., Дворниченко А.П.* Породоразрушающий инструмент бурильных и бурильно-крановых машин // Строительные и дорожные машины. – 1990. – № 3. – С. 19-22.