

ростатическое давление существенно влияет на процесс разрушения грунта и при определенной величине изменяет характер разрушения и деформационные процессы. При работе в пульпообразующих средах на глубинах больше 10 м скалывание грунта прекращается. Поэтому в гидрофрезах рекомендуемое исполнение ножей с шириной дифференцировано глубине.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кравец С.В., Романовский А.Л., Никитин В.Г., Кирикович В.Д. Рабочий орган землеройной машины для добычи полезных ископаемых. Патент №62709 . Официальный бюллетень в делах изобретений и открытий, 2003 г., №6. С. 6.

2. Романовский А.Л., Кирикович В.Д. Исследование флотационных свойств янтаря. “Вестник” Украинского государственного университета водного хозяйства и природопользования. Зб.науч. р., выпуск 2 (26). Ровно 2004, С. 323-328.

3. Кравец С.В., Романовський А.Л., Никитин В.Г., Романовський А.В. Определение критической глубины резания при комбинированом ярусном разрушении грунта . “Вестник” Национального университета водного хозяйства и природопользования. Зб.науч. р., выпуск 2 (34). Ровно 2006, С. 77-83.

### УДК 624.132

**С.В. КРАВЕЦЬ** докт. техн. наук, **О.Л. РОМАНОВСЬКИЙ**, канд. техн. наук,  
**О.П. ЛУК’ЯНЧУК**, канд. техн. наук, **О.В. КОСЯК**, ас.

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне.*

## ВИЗНАЧЕННЯ ЗУСИЛЛЯ ДЕФОРМУВАННЯ ҐРУНТУ БАГАТОЯРУСНИМИ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ

**Постановка проблеми.** У процесі багатоярусного руйнування ґрунтового середовища ґрунтові потоки, які формуються у кожному ярусі багатоярусного робочого органа, направляються через деформуючі камери у напрямку прохідних вікон, при якому проходить переформатування і деформування ґрунтових потоків [1].

**Ціль статті.** Якщо розміри деформуючої камери і прохідних вікон підібрані інтуїтивно, то виникає суттєвий додатковий опір деформуванню ґрунтових потоків. Визначимо зусилля переформатування і деформування ґрунтових потоків у деформуючих камерах.

**Основний матеріал.** Припустимо, що щільність ґрунту у будь-якому поперечному

перерізі ґрунтового потоку, який деформується і направляється клиновидним ґрунторозсікачем у прохідні вікна, збільшується від  $p_{вх}$  до  $p_{вих}$ , а швидкість руху змінюється від  $v_r$  до  $v_в$  закономірно по всій довжині деформуючої камери розміром  $(B_z/2) \cdot \text{ctg}\beta$ .

При цьому початковий трапецієвидний поперечний переріз ґрунтового потоку розмірами  $B_z \times B_{z-1} \times h$  на вході у камеру деформується клиновидним розсікачем у два потоки з трапецеїдальними поперечними перерізами розмірами  $(B_{z-1} - B_z)/2 \times (B_{z-2} - B_z)/2 \times h/\sin\beta_{mp}$ , де  $\beta_{mp}$  – кут нахилу робочого органа до горизонту у напрямку руху (див. рис. 1, а, в, г).

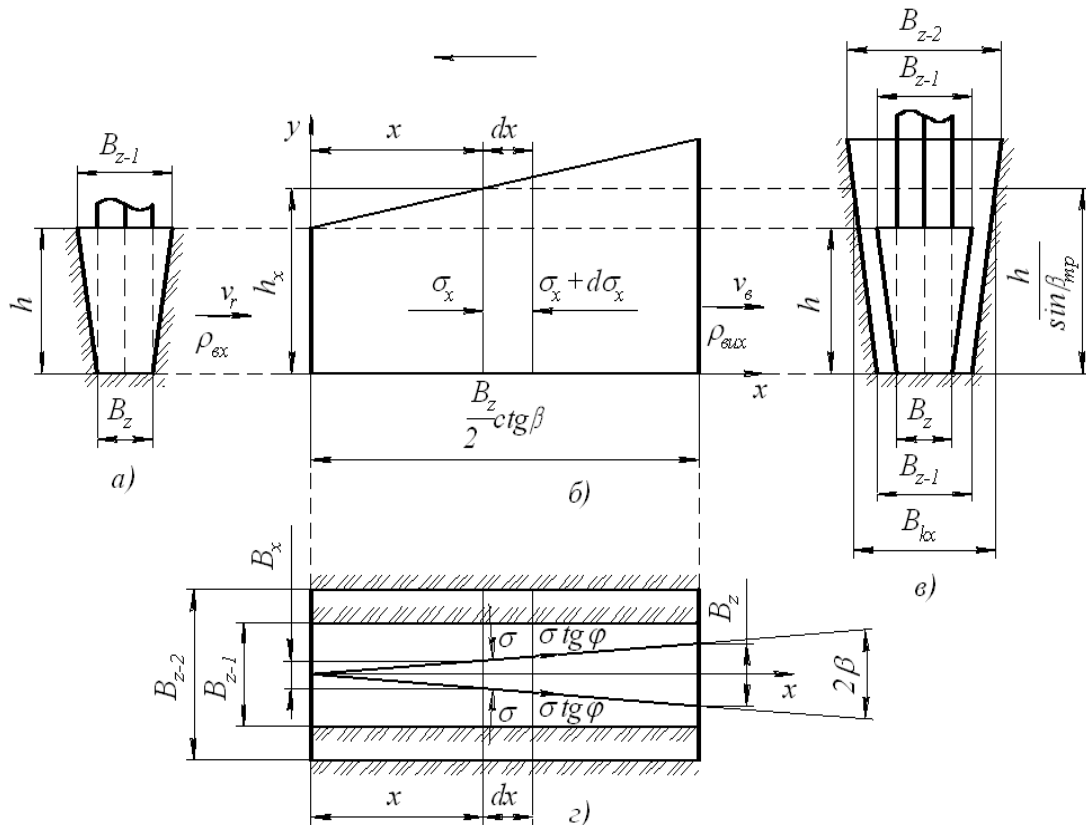


Рис. 1. Схема переформатування і деформування ґрунту у деформуючій камері а, в – відповідно, на вході і виході з деформуючої камери; б – повздовжній профіль ґрунтового потоку; г – вигляд деформуючої камери зверху.

На основі геометричних співвідношень, які випливають із рис. 1., маємо:

$$B_{kx} = B_{z-1} + \frac{B_{z-2} - B_{z-1}}{\frac{B_z}{2} \text{ctg}\beta} x ; \quad (1)$$

$$h_x = h \left( 1 + \frac{\frac{1}{\sin\beta_{\text{од}}} - 1}{\frac{B_z}{2} \text{ctg}\beta} x \right) ; \quad (2)$$

$$B_x = 2x \cdot \text{ctg}\beta, \quad (3)$$

де  $B_{kx}$  – закономірність зміни ширини деформуючої камери;  $B_{z-1}$ ,  $B_{z-2}$  – ширини другого і

третього ярусів, рахуючи знизу до верху,  $B_z$  – товщина ґрунторозсікача-деформатора (ширина нижнього ґрунторозробного органа);  $2\beta$  – кут загострення ґрунторозсікача;  $h$  – висота ярусів;  $h_x$ ,  $B_x$  – відповідно, закономірності зміни висоти ґрунтового потоку і товщини деформатора по довжині деформуючої камери.

Щільність ґрунту на вході у деформуючу камеру визначимо на основі закону збереження мас до моменту переформатування ґрунтового потоку ґрунторозсікачем, при умові, що ґрунт розподіляється рівномірно по звільненому об'єму суміжного верхнього ярусу і при якому  $B_x=0$ . У протилежному випадку  $p_{ex}=p_{np}/k_p$ , де  $k_p$  – коефіцієнт розпушення.

$$\frac{B_z + B_{z+1}}{2} h \rho_{np} v = \frac{B_{z-1} + B_{z-2}}{2} \frac{h}{\sin \beta_{mp}} \rho_{ex} v_r, \quad (4)$$

де  $p_{np}$  – щільність ґрунту у природному непорушеному стані;  $v$  – робоча швидкість переміщення робочого органа.

Звідки

$$\rho_{ex} = \frac{B_z + B_{z-1}}{B_{z-1} + B_{z-2}} \sin \beta_{mp} \frac{v}{v_r} \rho_{np}. \quad (5)$$

Швидкість ґрунту на виході із деформуючої камери визначимо на основі закону збереження витрат ґрунту на її вході та виході:

$$\frac{B_{z-1} + B_{z-2}}{2 \sin \beta_{mp}} h \rho_{ex} v_r = \left( \frac{B_{z-1} + B_{z-2}}{2} - B_z \right) \frac{h}{\sin \beta_{mp}} \rho_{ex} v_e. \quad (6)$$

Звідки, з урахуванням (5) маємо:

$$v_e = \frac{B_z + B_{z-1}}{B_{z-1} + B_{z-2} - 2B_z} \sin \beta_{mp} \frac{\rho_{np}}{\rho_{ex}} v. \quad (7)$$

Таким чином, швидкість ґрунту на виході залежить від співвідношення площ фронтальної проекції шару ґрунту, що знімається у нижньому ярусі і площі прохідних вікон деформуючої камери, яка утворюється у наступному суміжному верхньому ярусі у напрямку руху ґрунту між різальними кромками суміжних ґрунторозробних елементів, несучої рами і боковими стінками щілини, що нарізається, а також від відношення природної щільності до щільності ґрунту на виході із прохідних вікон. Щільність ґрунту на виході залежить від співвідношення розмірів (площ) шару ґрунту, що знімається у нижньому ярусі, і прохідних вікон деформуючої камери. Наприклад, якщо  $v_e/v=1,0$ ;

$$\frac{B_z + B_{z-1}}{B_{z-1} + B_{z-2} - 2B_z} \sin \beta_{mp} = 1,0; 0,9; 0,8; 0,7, \text{ то відповідно } p_{ex} = (1,0; 0,9; 0,8; 0,7) p_{np}.$$

Закон зміни напружень  $\sigma_x$  визначимо на основі компресійних кривих зруйнованих ґрунтів, які можна у першому наближенні представити у вигляді лінійної залежності [2]:

$$e_x = e_0 - C_\kappa \sigma_x, \quad (8)$$

де  $e_0$  – початковий коефіцієнт пористості;  $C_\kappa$  – коефіцієнт компресії ґрунту ( $C_\kappa = 0,009(\omega_m - 10)$  [2], де  $\omega_m$  – границя текучості ґрунту).

Коефіцієнт пористості  $e_x$  і  $e_0$  можна виразити через щільність ґрунту [2, 3]:

$$e_x = \frac{\rho_{m\theta}(1 + \omega)}{\rho_x} - 1, \quad (9)$$

де  $\rho_{m\theta}$  – щільність твердої фази ґрунту (щільність ґрунту при умові, що в ньому відсутні пори);  $\omega$  – вологість ґрунту;  $\rho_x$  – змінна щільність ґрунту по довжині деформуючої камери у залежності від тиску  $\sigma_x$ .

Визначимо закономірність зміни щільності ґрунту  $\rho_x$ . Щільність ґрунту в камері змінюється пропорційно зміні площі поперечного перерізу ґрунтового потоку або вільного об'єму деформуючої камери одиничної довжини. Для цього визначимо площу поперечного перерізу ґрунтового потоку:

$$F_x = \left( B_{z-1} + \frac{A}{B_z \operatorname{ctg} \beta} x + \frac{2D}{B_z^2 \operatorname{ctg}^2 \beta} x^2 \right) h, \quad (10)$$

де  $A = B_{z-2} - 3B_{z-1} - 2B_z + 2B_{z-1}/\sin\beta_{mp}$ ;  $D = (B_{z-2} - B_{z-1} - 2B_z)(1/\sin\beta_{mp} - 1)$ .

На основі рівності витрат ґрунту у кожному поперечному перерізі ґрунтового потоку маємо:

$$\frac{B_z + B_{z+1}}{2} h \rho_{np} v = F_x \rho_x v_r. \quad (11)$$

Звідки

$$\rho_x = \frac{(B_z + B_{z-1}) \frac{v}{v_r} \rho_{np}}{2 \left( B_{z-1} + \frac{Ax}{B_z \operatorname{ctg} \beta} + \frac{2Dx^2}{B_z^2 \operatorname{ctg}^2 \beta} \right)}. \quad (12)$$

З урахуванням закономірності (12) та залежностей (8) і (9), визначимо:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\rho_{m\theta}(1 + \omega)}{C_\kappa} \left( \frac{1}{\rho_{\theta x}} - \frac{1}{\rho_x} \right) = \\ &= \frac{\rho_{m\theta}(1 + \omega)}{\rho_{\theta x} C_\kappa} \left[ 1 - \frac{2 \left( B_{z-1} + \frac{Ax}{B_z \operatorname{ctg} \beta} + \frac{2Dx^2}{B_z^2 \operatorname{ctg}^2 \beta} \right) \frac{v_r}{v} \frac{\rho_{\theta x}}{\rho_{np}}}{B_z + B_{z-1}} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Визначимо силу деформування ґрунтового потоку у процесі його транспортування вздовж деформуючої камери у напрямку прохідних вікон.

На відстані  $x$  від початку деформуючої камери на ґрунтовий потік діє сила  $\sigma_x \cdot F_x$ , а на

відстані  $(x + dx)$  – сила  $(\sigma_x + d\sigma_x)(F_x + dF_x)$ , де  $d\sigma_x$ ,  $dF_x$  – приріст, відповідно, напруження і площі поперечного перерізу ґрунтового потоку на відстані  $dx$  (див. рис. 1).

Тоді

$$dP_{\partial\phi} = (\sigma_x + d\sigma_x)(F_x + dF_x) - \sigma_x \cdot F_x = \sigma_x \cdot F_x + \sigma_x \cdot dF_x + d\sigma_x \cdot F_x + d\sigma_x \cdot dF_x - \sigma_x \cdot F_x. \quad (14)$$

Якщо знехтувати величиною другого порядку малості, то будемо мати:

$$dP_{\partial\phi} = \sigma_x \cdot dF_x + d\sigma_x \cdot F_x = d(\sigma_x \cdot F_x). \quad (15)$$

Звідки сила деформування одного ґрунтового потоку дорівнює:

$$dP_{\partial\phi 1} = \sigma_x F_x = Eh \left[ 1 - \frac{2 \left( B_{z-1} + \frac{Ax}{B_z \operatorname{ctg} \beta} + \frac{2Dx^2}{B_z^2 \operatorname{ctg}^2 \beta} \right) \frac{v_r}{v} \frac{\rho_{\partial x}}{\rho_{np}}}{B_z + B_{z-1}} \right] \left( B_{z-1} + \frac{Ax}{B_z \operatorname{ctg} \beta} + \frac{2Dx^2}{B_z^2 \operatorname{ctg}^2 \beta} \right), \quad (16)$$

де  $E = \frac{\rho_{m\partial}(1 + \omega)}{\rho_{\partial x} C_k}$ .

Для  $x = \frac{B_z}{2} \operatorname{ctg} \beta$ :

$$P_{\partial\phi z} = Eh \left[ 1 - \frac{2 \left( B_{z-1} + \frac{A+D}{2} \right) \frac{v_r}{v} \frac{\rho_{\partial x}}{\rho_{np}}}{B_z + B_{z-1}} \right] \left( B_{z-1} + \frac{A+D}{2} \right) = \frac{Eh}{2 \sin \beta_{mp}} \left[ 1 - \frac{B_{z-1} + B_{z-2} - 2B_z}{B_z + B_{z-1}} \frac{v_r}{v \sin \beta_{mp}} \frac{\rho_{\partial x}}{\rho_{np}} \right] (B_{z-1} + B_{z-2} - 2B_z). \quad (17)$$

Для будь-якого  $k$ -го ярусу:

$$P_{\partial\phi k} = \frac{Eh}{2 \sin \beta_{mp}} \left[ 1 - \frac{B_{k-1} + B_{k-2} - 2B_z}{B_k + B_{k-1}} \frac{v_r}{v \sin \beta_{mp}} \frac{\rho_{\partial x}}{\rho_{np}} \right] (B_{k-1} + B_{k-2} - 2B_z). \quad (18)$$

де  $k$  – порядковий номер ярусу, рахуючи зверху вниз.

$$B_k = \left[ 1 + \frac{2(z-k)}{3\theta-1} \right] B_z, \quad (19)$$

де  $z$  – число ярусів;  $\theta = \frac{v_r}{v \sin \beta_{mp}} \frac{\rho_{\partial ux}}{\rho_{np}}$ .

Сумарна сила деформування ґрунтових потоків багатоярусним робочим органом дорівнює:

$$P_{\partial\phi} = \frac{h}{2 \sin \beta_{mp}} \frac{\rho_{m\partial}(1 + \omega)}{\rho_{\partial x} C_k} \sum_{k=2}^z \left[ \left( 1 - \frac{B_{k-1} + B_{k-2} - 2B_z}{B_k + B_{k-1}} \frac{v_r}{v \sin \beta_{mp}} \frac{\rho_{\partial x}}{\rho_{np}} \right) (B_{k-1} + B_{k-2} - 2B_z) \right]. \quad (20)$$

На рис. 2. приведені залежності сили деформування тугопластичної глини від щільності ґрунту на виході із прохідних вікон деформуючої камери передостаннього ярусу.

Із рисунка 2 видно, що найбільше зусилля виникає при деформуванні останнього (чет-

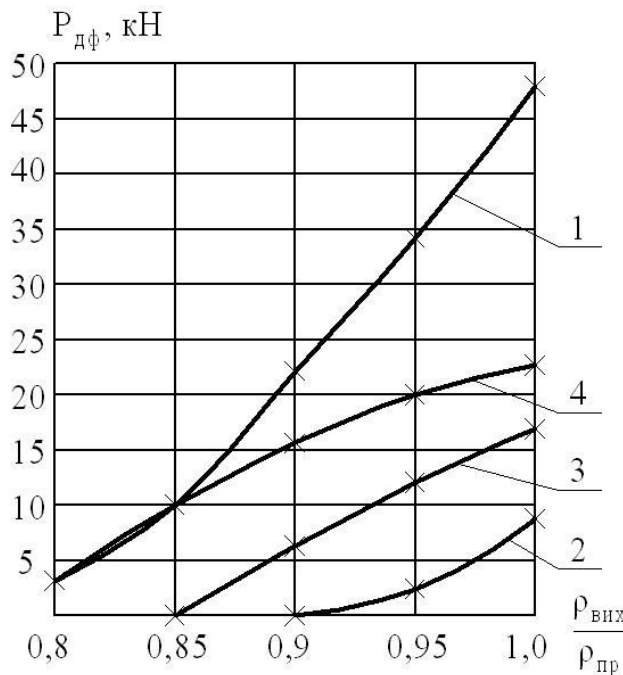


Рис. 2. Залежність сили деформування ґрунтового потоку від щільності ґрунту на виході із прохідних вікон передостаннього ярусу (ґрунт – тугопластична глина,  $z=4$ ):

1 – сумарна сила; 2 – для другого ярусу; 3 – для третього ярусу; 4 – для четвертого ярусу.

Визначимо опір переміщенню ґрунтового потоку від сил тертя, які виникають на поверхні клиновидного деформатора. Для цього виразимо нормальний тиск ґрунту на деформатор через закон зміни напруження  $\sigma_x$  [4, 5].

$$\sigma = \frac{\sigma_x}{\sin \beta (1 + f \operatorname{ctg} \beta)}. \quad (21)$$

Тоді елементарні сили тертя  $dF_{mp}$  і опір переміщенню  $dW_{mp}$  дорівнюють:

$$dF_{mp} = f \sigma h_x \frac{dx}{\cos \beta} = \frac{f \sigma_x h_x}{\sin \beta (1 + f \operatorname{ctg} \beta)} \frac{dx}{\cos \beta}, \quad (22)$$

$$dW_{mp} = 2dF_{mp} \cos \beta = \frac{2f \sigma_x h_x}{\sin \beta (1 + f \operatorname{ctg} \beta)} dx. \quad (23)$$

Сумарний опір переміщенню від сил тертя в одному  $k$ -му ярусі визначиться інтегруванням виразу (23):

$$\begin{aligned}
W_{mpk} &= \frac{2f}{\sin \beta(1+f \operatorname{ctg} \beta)} \int_0^{\frac{B_z \operatorname{ctg} \beta}{2}} \sigma_x h_x dx = \frac{2fEh}{\sin \beta(1+f \operatorname{ctg} \beta)} \times \\
&\times \int_0^{\frac{B_z \operatorname{ctg} \beta}{2}} \left[ 1 - \frac{2v_r}{v} \frac{\rho_{\text{ex}}}{\rho_{np}(B_k + B_{k-1})} \left( B_{k-1} + \frac{A_k x}{B_z \operatorname{ctg} \beta} + \frac{2D_k x^2}{B_z^2 \operatorname{ctg}^2 \beta} \right) \right] \left[ 1 + \frac{\frac{1}{\sin \beta_{mp}} - 1}{\frac{B_z \operatorname{ctg} \beta}{2}} x \right] dx = \\
&= \frac{fEhB_z \operatorname{ctg} \beta}{\sin \beta(1+f \operatorname{ctg} \beta)} \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\sin \beta_{mp}} \right) - \frac{2v_r \rho_{\text{ex}} \left( B_{k-1} + \frac{A_k}{4} + \frac{D_k}{6} \right)}{v \rho_{np} (B_k + B_{k-1})} - \right. \\
&\quad \left. - \frac{v_r \rho_{\text{ex}} \left( \frac{1}{\sin \beta_{mp}} - 1 \right) \left( B_{k-1} + \frac{A_k}{3} + \frac{D_k}{4} \right)}{v \rho_{np} (B_k + B_{k-1})} \right]. \tag{24}
\end{aligned}$$

Сумарний опір переміщенню від сил тертя у всіх деформуючих камерах, крім верхнього шару ( $k=1$ ):

$$\begin{aligned}
W_{mp} &= \frac{fEhB_z \operatorname{ctg} \beta}{\sin \beta(1+f \operatorname{ctg} \beta)} \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\sin \beta_{mp}} \right) - \frac{2v_r \rho_{\text{ex}}}{v \rho_{np}} \sum_{k=2}^z \frac{B_{k-1} + \frac{A_k}{4} + \frac{D_k}{6}}{B_k + B_{k-1}} - \right. \\
&\quad \left. - \frac{v_r \rho_{\text{ex}}}{v \rho_{np}} \left( \frac{1}{\sin \beta_{mp}} - 1 \right) \sum_{k=2}^z \frac{B_{k-1} + \frac{A_k}{3} + \frac{D_k}{4}}{B_k + B_{k-1}} \right]. \tag{25}
\end{aligned}$$

Необхідне тягове зусилля для подолання опорів транспортуванню шарів ґрунту вздовж деформуючих камер дорівнює:

$$T_{mp} = (P_{\text{деф}} + W_{mp}) \cos \alpha_p. \tag{26}$$

На рис. 3. приведені залежності опорів від сил тертя шарів ґрунту на поверхнях клиновидних деформаторів від щільності ґрунту на виході із прохідних вікон деформуючої камери передостаннього ярусу. Ґрунт – тугопластична глина.

Тягове зусилля, яке необхідне на переформатування шарів ґрунту і подолання сил тертя у деформуючих камерах, змінюється прямопропорційно зміні щільності ґрунту на виході із деформуючої камери передостаннього ярусу. Для тугопластичної глини це зусилля збільшується від 21 кН при щільності  $p_{\text{вих}} = 0,8\rho_{np}$  до 83,6 кН при щільності ґрунту на виході  $p_{\text{вих}} = \rho_{np}$ .

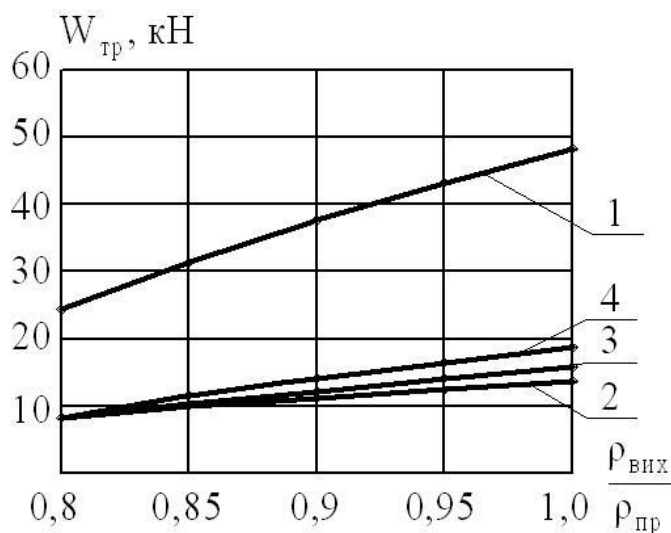


Рис. 3. Залежність сил тертя ґрунтових потоків від щільності ґрунту на виході із прохідних вікон передостаннього ярусу (ґрунт – тугопластична глина,  $z=4$ ): 1 – сумарна сила; 2 – для другого ярусу; 3 – для третього ярусу; 4 – для четвертого ярусу.

середовища.

**Висновки.** Таким чином, проведені дослідження дозволяють визначити темпи збільшення необхідного тягового зусилля від переформатування і ущільнення зруйнованих шарів ґрунту у деформуючих камерах за рахунок зменшення розмірів прохідних вікон і ширини ярусів, а також, як наслідок, визначити темпи зменшення сили різання багатоярусного робочого процесу. У результаті відкривається можливість оптимізації багатоярусної схеми руйнування ґрунтового

## ЛІТЕРАТУРА

1. Кравець С.В. Ґрунтозахисні та енергозберігаючі машини. Основи теорії, проектування та створення. – Рівне: РДТУ, 1999. – 277 с.
2. Гольдштейн М.Н. Механические свойства ґрунтов. – М.: Стройиздат, 1979. – 304 с.
3. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики ґрунтов. – М.: Высшая школа, 1982. – 51 с.
4. Кравець С.В., Кованько В.В. Вплив швидкості на форму та силу опору носової частини підземно-рухомих пристроїв // Вестник Харьковського національного автомобільно-дорожного університета: сб. науч. тр. – Харьков, 2007, вып. 38, С. 101–104.
5. Гене В.М., Тимошенко В.К. Влияние угла заострения конического наконечника на усилие прокола / Горные, строительные и дорожные машины: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – К.: Техника, 1970, вып. 9, С. 50-53.
6. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд., исправленное. – М.: Наука, 1986. – 544 с.