

Міністерство освіти та науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування
Навчально-науковий механічний інститут
Кафедра будівельних, дорожніх і меліоративних машин

02-01-547М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни
«Розробка нових алгоритмів для розрахунків та конструювання
машин і обладнання» для здобувачів вищої освіти другого
(магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою
«Іжиніринг машин і обладнання» спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування» денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою
з якості ННМІ
протокол № 1 від 26.09.2023 р.

Рівне – 2023

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Розробка нових алгоритмів для розрахунків та конструювання машин і обладнання» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Іжиніринг машин і обладнання» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Кравець С. В. – Рівне : НУВГП, 2023. – 38с.

Укладач: Кравець С. В., д.т.н., професор кафедри будівельних, дорожніх і меліоративних машин.

Відповідальний за випуск: Тхорук Є. І., к.т.н., професор, в.о. завідувача кафедри будівельних, дорожніх і меліоративних машин.

Керівник групи забезпечення спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
Кравець С. В.

Мета практичних занять – провести особисті контрольні та машинні алгоритмічні розрахунки при створенні приципопово нових машин і обладнання (на прикладі машин і обладнання для прокладання підземних комунікацій).

Практичне заняття 1.

Блок-схема алгоритму визначення основних параметрів двоярусних ножів з плоскими різальними частинами (блок-схема 1)

Визначити питомий опір i і оптимальний кут різання наступного (у нижньому ярусі) ножа, кут зеуву ґрунту у нижньому ярусі, критичні глибини різання у верхньому та нижньому ярусах, а також сумарний опір різанню.

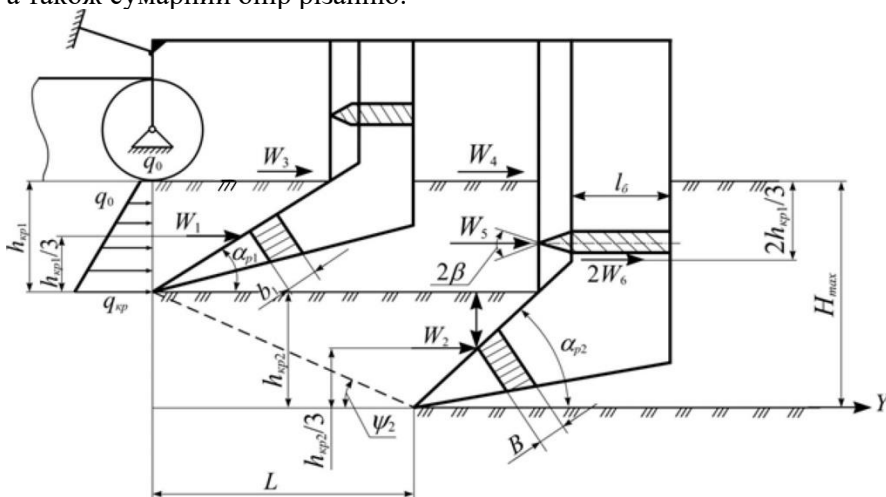


Рис.1. Схема двох'ярусної розробки щілини

Умовні позначення та одиниці вимірювання вхідних і вихідних даних:

Якщо тип ґрунту не заданий, то вибір його типу, консистенції та вихідних даних здійснюється по вологості ґрунту відповідно([2],с.3...5).

c – коефіцієнт зчеплення ґрунту, МПа([1],табл.1.2);
 φ, φ_0 – кути зовнішнього та внутрішнього тертя ґрунту, град
 m ([1],табл.1.2);
 $\gamma_{гр}$ – питома сила тяжіння ґрунту, МН/м³([1],табл.1.2);
 a_1, n_1 – коефіцієнти апроксимації критичної глибини різання
для верхнього ярусу([1],табл.1.1);
 ψ_2 – кут поздовжнього зсуву ґрунту у нижньому ярусі, град;
 a_2, n_2 – коефіцієнти апроксимації критичної глибини різання
для нижніх ярусів([1],табл.1.1);
 $a_{\psi 2}, k_{\psi 2}$ – коефіцієнти інтерполяції для кута зсуву ґрунту в
нижніх ярусах([1],табл.2.3);
 $f_{оп}$ – коефіцієнт опору переміщення опор робочого
обладнання ($f_{оп}=0,1 \dots 0,15$);
 K_y – коефіцієнт питомого опору розрізання ґрунту порушеної
структури ($K_y=0,02 \dots 0,04$ МПа);
 $d_{п.к}$ – максимальний діаметр підземних комунікацій, що
прокладаються, м ([1], табл.2.1);
 H_{max} – максимальна глибина прокладання підземних
комунікацій, м([1], табл.2.1);
 t – товщина бокових стінок ножа ($t=0,02 \dots 0,025$ м), м;
 δ – зазор між боковими стінками ножа та лінійно-протяжним
елементом (комунікацією) ($\delta=0,01 \dots 0,02$ м), м;
 $k_{пер}$ – відношення глибини гарантованого сколювання ґрунту
 h_c до критичної глибини різання $h_{кр}$ ($k_{пер}=0,9 \dots 0,95$);
 α_{p2} – кут різання ножа в нижньому ярусі (вибирається в
залежності від типу ґрунту та відношення H_{max} / b , град; ([4],
рис.1.16, [1], рис.2.2),
 l_6 – довжина бокових стінок ножа в напрямку руху (задається
конструктивно), м;
 k_2 – питомий опір різанню в нижньому ярусі, МПа;
 α_{p1}^{opt} – оптимальний кут різання ножа у верхньому ярусі,
град;
 $h_{кр1}, h_{кр2}$ – критичні глибини різання у верхньому та нижньому
ярусах, м;
 W_{Σ} – сумарний опір переміщенню робочого обладнання,
МН.

1.

Початок

2.

Введення вхідних даних:
 тип ґрунту ($c \rightarrow$ МПа, $(\varphi_0, \varphi) \rightarrow$ град, $\gamma_{сп} \rightarrow \frac{МН}{М^3}$)
 $(a_1, n_1, a_2, n_2, k_{неп}, a_{\varphi 2}, k_{\varphi 2}, f_{он}), K_y \rightarrow$ МПа), $(a_{н,к}, H_{max}, l,$
 $\delta, l_{\delta}) \rightarrow$ М, $\alpha_{p_2} \rightarrow$ град

3.

$$b_1 = b_2 = b = d_{н,к} + 2t + 2\delta$$

4.

$$h_{сп,2} = \frac{a_2 \cdot b}{(\operatorname{tg} \alpha_{p_2})^{n_2} k_{неп}}$$

5.

$$\varphi_{\alpha_2} = 180^\circ - \alpha_{p_2} - \frac{\varphi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0},$$

$$A_2 = \frac{\cos \varphi (\cos \varphi + \sqrt{\sin^2 \varphi_0 - \sin^2 \varphi}) (\sin \varphi_0 \cos \varphi_{\alpha_2} + \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_0 \sin^2 \varphi})^2}{\cos^2 \varphi_0 (1 - \sin \varphi)}$$

$$q_{0,2} = c(A_2 - 1) \operatorname{ctg} \varphi_0, \quad q_{сп,2} = (\gamma_{сп} h_{сп,2} + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi_0}) \operatorname{tg}^2 (45^\circ + \frac{\varphi_0}{2}),$$

$$q_{ср,2} = \frac{q_{0,2} + q_{сп,2}}{2}$$

6.

$$k_2 = [(1 - f_{он} \operatorname{tg} \varphi) + (f_{он} + \operatorname{tg} \varphi) \operatorname{ctg} \alpha_{p_2}] q_{ср,2} + \frac{H_{max}}{b} \cdot \frac{K_y}{k_{неп}}$$

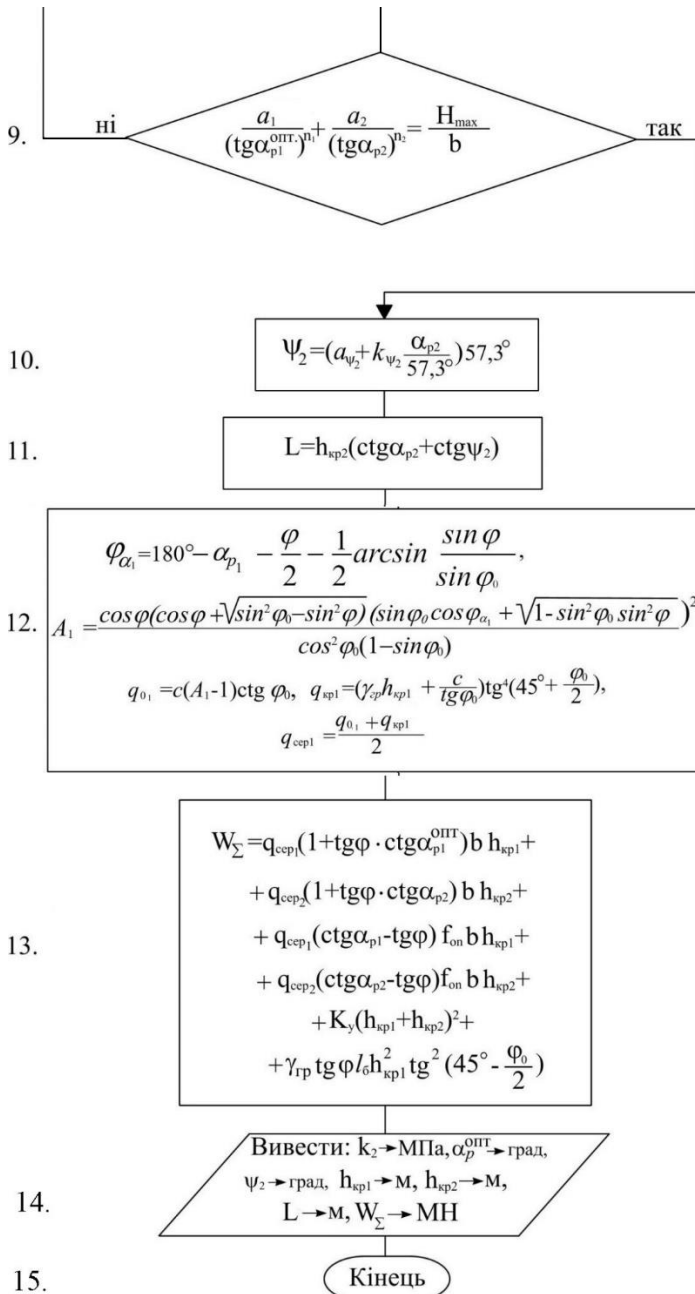
7.

$$\alpha_{p_1}^{опт.} = \operatorname{arctg} \left[\frac{1 + n_1}{n_1} \cdot \frac{f_{он} + \operatorname{tg} \varphi}{\frac{k_2}{q_{ср,2}} - (1 - f_{он} \operatorname{tg} \varphi)} \right]$$

8.

$$\alpha_{p_2} \pm \Delta \alpha_{p_2}$$

$$h_{сп,1} = \frac{a_1 \cdot b}{(\operatorname{tg} \alpha_{p_1}^{опт.})^{n_1} k_{неп}}$$



Практичне заняття 2.
Блок-схема алгоритму визначення форми та параметрів
двох'ярусного безвідвального ЗРО
(блок-схема 2)

Визначити питомий опір різанню у нижньому ярусі, ординату точки Z_k та похідну криволінійного профіля \dot{Z}_k , критичні глибини у верхньому та нижньому ярусах, побудови криволінійні профілі у верхньому та нижньому ярусах, а також визначити зміщення ґрунторозробних органів по горизонталі та сумарну силу різання.

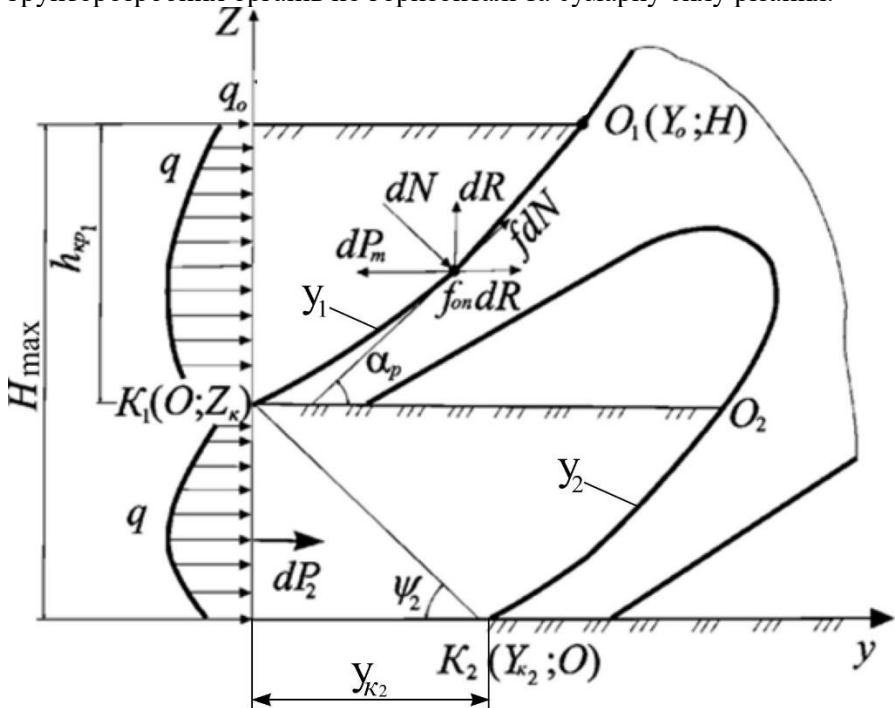


Схема взаємодії двух'ярусного землерийного
робочого органа з ґрунтом

Умовні позначення та одиниці вимірювання
вхідних і вихідних даних:

$c, \varphi, \varphi_0, \gamma_{\text{гр}}, a_1, n_1, a_2, n_2, K_y, f_{\text{он}}, k_{\text{пер}}, k_2, H_{\max}, h_{\text{сп}1}, h_{\text{сп}2}, \psi_2$ (див. БЛОК-

схему 1)

η_1, m_1 – коефіцієнти апроксимації поздовжнього профіля ножа у верхньому ярусі([1],табл.1.3);

η_2, m_2 – коефіцієнти апроксимації поздовжнього профіля ножа у нижньому ярусі([1],табл.1.3)і;

$\varphi_{зч}$ – коефіцієнт зчеплення ходового обладнання з опорною поверхнею ($\varphi_{зч}=0,6\dots0,9$);

d – максимальний діаметр лінійно-протяжного об'єкту (ЛПО), що укладається, м([1], табл.1.4);

$t_{ст}$ – товщина бокових стінок ножа, м([1], табл.1.4);

δ_3 – зазор між боковими стінками ножа та ЛПО ($\delta_3=0,01\dots0,02$ м), м;

α_{p1}, α_{p2} – кути різання ножів відповідно у верхньому та нижньому ярусах

($\alpha_{p1}=25^\circ\dots45^\circ$; $\alpha_{p2}=20^\circ\dots30^\circ$), град;

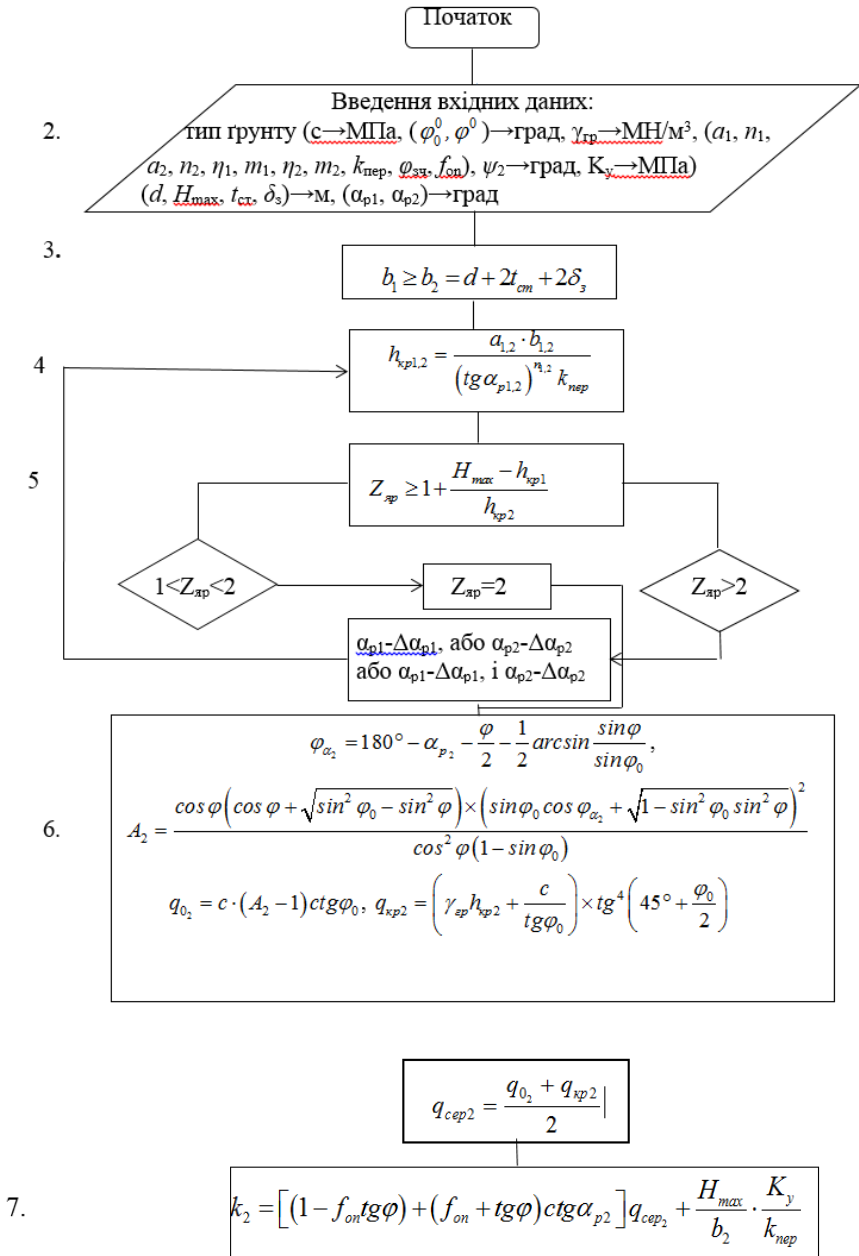
\dot{Z}_k - похідна функції верхнього профіля в точці К;

Z_k – ордината зміщення верхнього ЗРО відносно нижнього по вертикалі, м;

y_1, y_2 – функціональні залежності для визначення профілів ЗРО у верхньому та нижньому ярусах, м;

$y_{к2}$ – величина зміщення верхнього ЗРО відносно нижнього по горизонталі, м;

P – сумарна сила різання двоярусним ЗРО, МН.



8.

$$A = (f_{on} + tg\varphi - \varphi_{34})n_1, \quad B = (1 + \eta_1)[1 + (\varphi_{34} - f_{on})tg\varphi],$$

$$D = \frac{\eta_1 a_1}{(q_{\kappa p_2} - q_0)k_{nep}} [k_2 - q_0(1 + (\varphi_{34} - f_{on})tg\varphi)],$$

$$A + B\dot{Z}_\kappa = D\dot{Z}_\kappa^{(m_1 - \eta_1 + 1)} \quad \text{Визначаємо } \dot{Z}_{\kappa, \text{омт}}$$

9.

$$h_{\kappa p 1} = \frac{a_1 b_1}{\dot{Z}_{\kappa, \text{омт}}^{m_1} k_{nep}}$$

10.

$$Z_\kappa = \underline{H}_{\max} - h_{\kappa p 1}$$

11.

$$y_2 = \frac{m_2}{m_2 + 1} \left(\frac{\eta_2}{b_2} \right)^{\frac{1}{m_2}} \left[Z_\kappa^{\frac{m_2 + 1}{m_2}} - (Z_\kappa - Z)^{\frac{m_2 + 1}{m_2}} \right]$$

$$Z = Z_k = \Delta Z \cdot k, \quad k = 0, 1, 2, 3 \dots$$

12.

$$h_{\kappa p 2} = \frac{a_2 b_2}{(tg\alpha_{p2})^{m_2} k_{nep}} \geq Z_\kappa$$

13.

$$y_1 = \frac{m_1}{m_1 + 1} \left(\frac{\eta_1}{b_1} \right)^{\frac{1}{m_1}} \left[(H_{\max} - Z_\kappa)^{\frac{m_1 + 1}{m_1}} - (H - Z)^{\frac{m_1 + 1}{m_1}} \right]$$

14.

$$y_{\kappa 2} = (H_{\max} - h_{\kappa p 1})(ctg\alpha_{p2} + ctg\psi_2)$$

15.

$$\varphi_{\alpha_1} = 180^\circ - \alpha_{p_1} - \frac{\varphi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0},$$

$$A_1 = \frac{\cos \varphi (\cos \varphi + \sqrt{\sin^2 \varphi_0 - \sin^2 \varphi}) \times (\sin \varphi_0 \cos \varphi_{\alpha_1} + \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_0 \sin^2 \varphi})^2}{\cos^2 \varphi (1 - \sin \varphi_0)}$$

$$q_{0_1} = c \cdot (A_2 - 1) \operatorname{ctg} \varphi_0, \quad q_{\text{кп1}} = \left(\gamma_{\text{сп}} h_{\text{кп1}} + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi_0} \right) \times \operatorname{tg}^4 \left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} \right)$$

$$q_{\text{сеп1}} = \frac{q_{0_1} + q_{\text{кп1}}}{2}$$

16.

$$\varphi_{2\text{в}} = 0$$

$$P = q_{0,1} (1 - f_{\text{он}} \operatorname{tg} \varphi) b_1 (H_{\text{max}} - Z_{\kappa}) + \frac{m_1 q_{0,1} (f_{\text{он}} + \operatorname{tg} \varphi)}{m_1 + 1} \left(\frac{\eta_1}{b_1} \right)^{\frac{1}{m_1}} \times$$

$$\times b_1 (H_{\text{max}} - Z_{\kappa})^{\frac{m_1+1}{m_1}} + \frac{m_1 (f_{\text{он}} + \operatorname{tg} \varphi) (q_{\text{кп1}} - q_{0,1})}{(2m_1 - n_1 + 1) a_1} k_{\text{неп}} \left(\frac{\eta_1}{b_1} \right)^{\frac{1-n_1}{m_1}} \times$$

$$\times (H_{\text{max}} - Z_{\kappa})^{\frac{2m_1-n_1+1}{m_1}} + \frac{m_1 (1 - f_{\text{он}} \cdot \operatorname{tg} \varphi) (q_{\text{кп1}} - q_{0,1})}{(2m_1 - n_1) a_1} k_{\text{неп}} \left(\frac{b_1}{\eta_1} \right)^{\frac{n_1}{m_1}} \times$$

$$\times (H_{\text{max}} - Z_{\kappa})^{\frac{2m_1-n_1}{m_1}} + k_2 b_2 Z_{\kappa}$$

17.

Вивести: $k_2 \rightarrow \text{МПa}$, \dot{Z}_{κ} , $(Z_{\kappa}, h_{\text{кп1}}, h_{\text{кп2}},$
 $y_1, y_2, y_{\kappa 2}) \rightarrow \text{м, P} \rightarrow \text{МН}$

18.

Кінець

Практичне заняття 3.

Блок-схема алгоритму визначення параметрів багатоярусних безвідвальних ЗРО, що працюють за принципом рівності об'ємних витрат ґрунту (блок-схема 3)

Визначити висоту ярусів, ширини та опір різання в кожному ярусі, а також сумарний опір для три- та чотириярусного землерийного робочого органу (ЗРО), що працюють на принципі об'ємних витрат ґрунту.

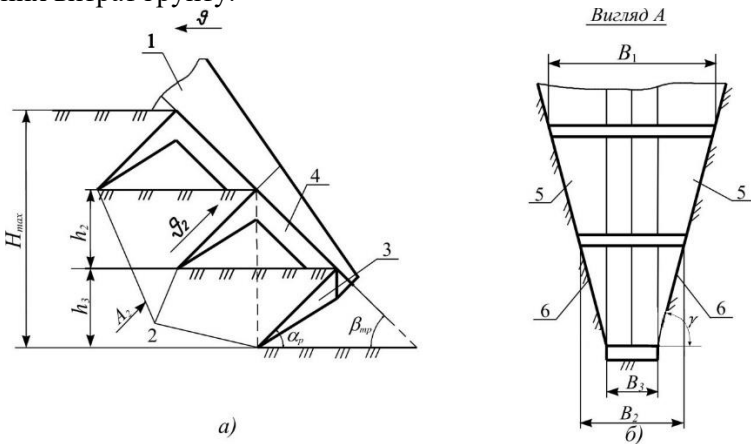


Рис.3.Принципова схема трриярусного ЗРО
а – профільна проекція; б – фронтальна проекція (вигляд по стрілці А)

Умовні позначення та одиниці вимірювання вхідних і вихідних даних:

- c – коефіцієнт зчеплення ґрунту, МПа([1],табл.1.2);
- φ, φ_0 – кути зовнішнього та внутрішнього тертя ґрунту, град([1],табл.1.2);
- $\gamma_{гр}$ – питома сила тяжіння ґрунту, МН/м³([1],табл.1.2);
- a_1, n_1, a_2, n_2 – коефіцієнти апроксимації критичної глибини різання з індексом «1» для верхнього ярусу, з індексом «2» для нижніх ярусів([1],табл.2.3);
- $a_{\psi 2}, k_{\psi 2}$ – коефіцієнти інтерполяції для кута сколювання

грунту в нижніх ярусах([1],табл.1.2);

ψ_2 – кут сколювання ґрунту в нижніх ярусах, рад;

B_3, B_4 – ширина третього (рахуючи зверху вниз) для триярусного та четвертого для чотириярусного ЗРО, м;

d – діаметр лінійно-протяжного об'єкта (ЛПО), що укладається, м ([1], табл.3.1);

δ_3 – зазор між бічними стінками ЗРО і ЛПО, м($\delta_3 = 0.01 \dots 0.02$ м);

$t_{ст}$ – товщина бічних стінок ЗРО, м ([1], табл.3.1);

H_{max} – максимальна глибина укладання ЛПО, м; ([1], табл.3.1);

$h_{кр3(4)}$ – критична глибина різання для третього та четвертого ґрунторозробного органу відповідно для триярусного та чотириярусного ЗРО ($h_{кр3(4)} = h_{3(4)}$)

α_p – кут різання ґрунторозробних органів, ($\alpha_p = 20 \dots 30^\circ$) град;

$K_{пер}$ – відношення глибини зони гарантованого сколювання ґрунту h_c до критичної глибини різання $h_{кр}$ ($K_{пер} = 0,90 \dots 0,95$);

$\beta_{тр}$ – кут нахилу несучої рами до горизонту ($\beta_{тр} = \alpha_p$), град;

γ – кут розвалу щілини у фронтальній площині ($\gamma = 80 \dots 90^\circ$), град;

$h_1, h_{3(4)}$ – глибина верхнього та середніх ярусів триярусного та чотириярусного ЗРО, м;

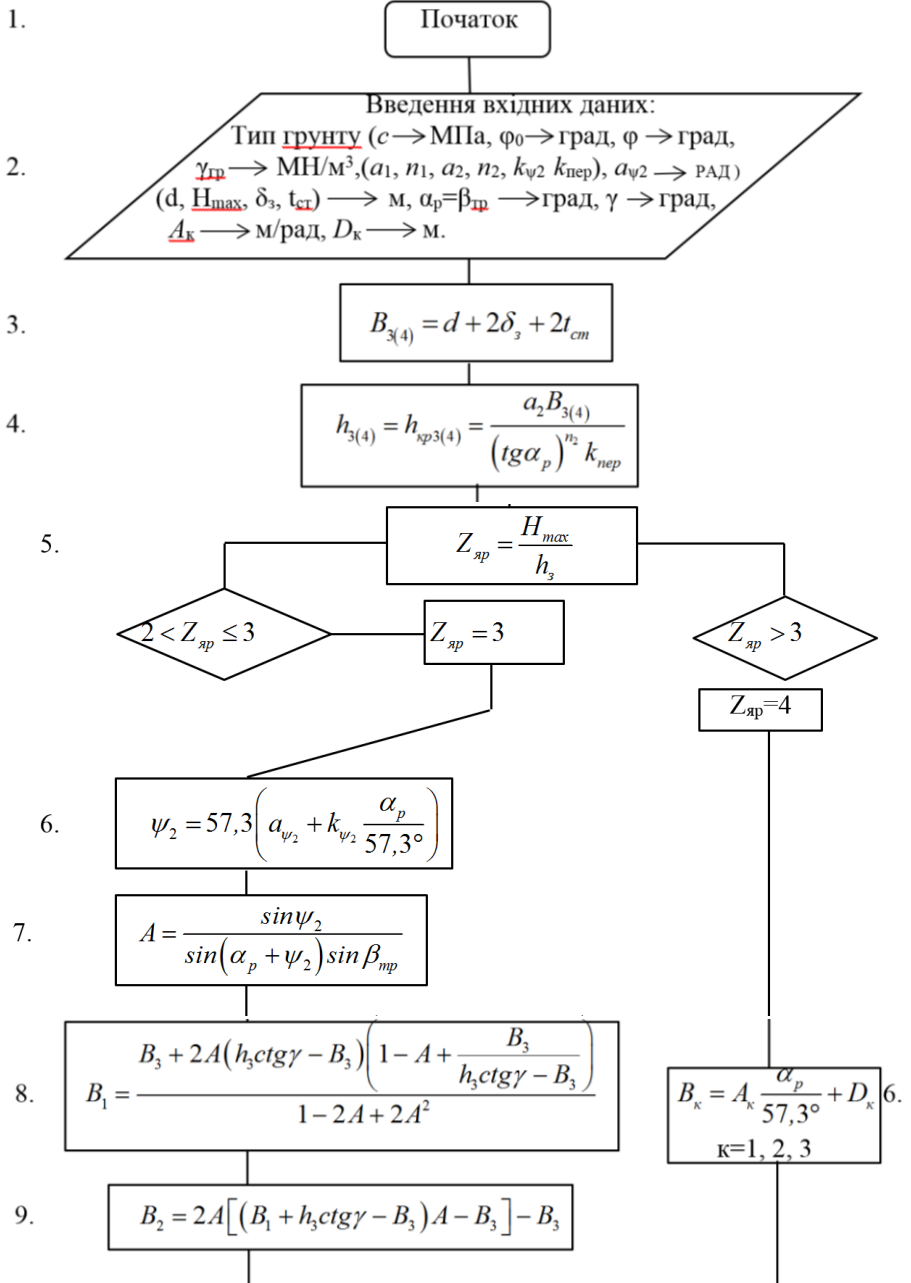
B_1, B_2, B_3 – ширини ґрунторозробних органів триярусного ЗРО, м;

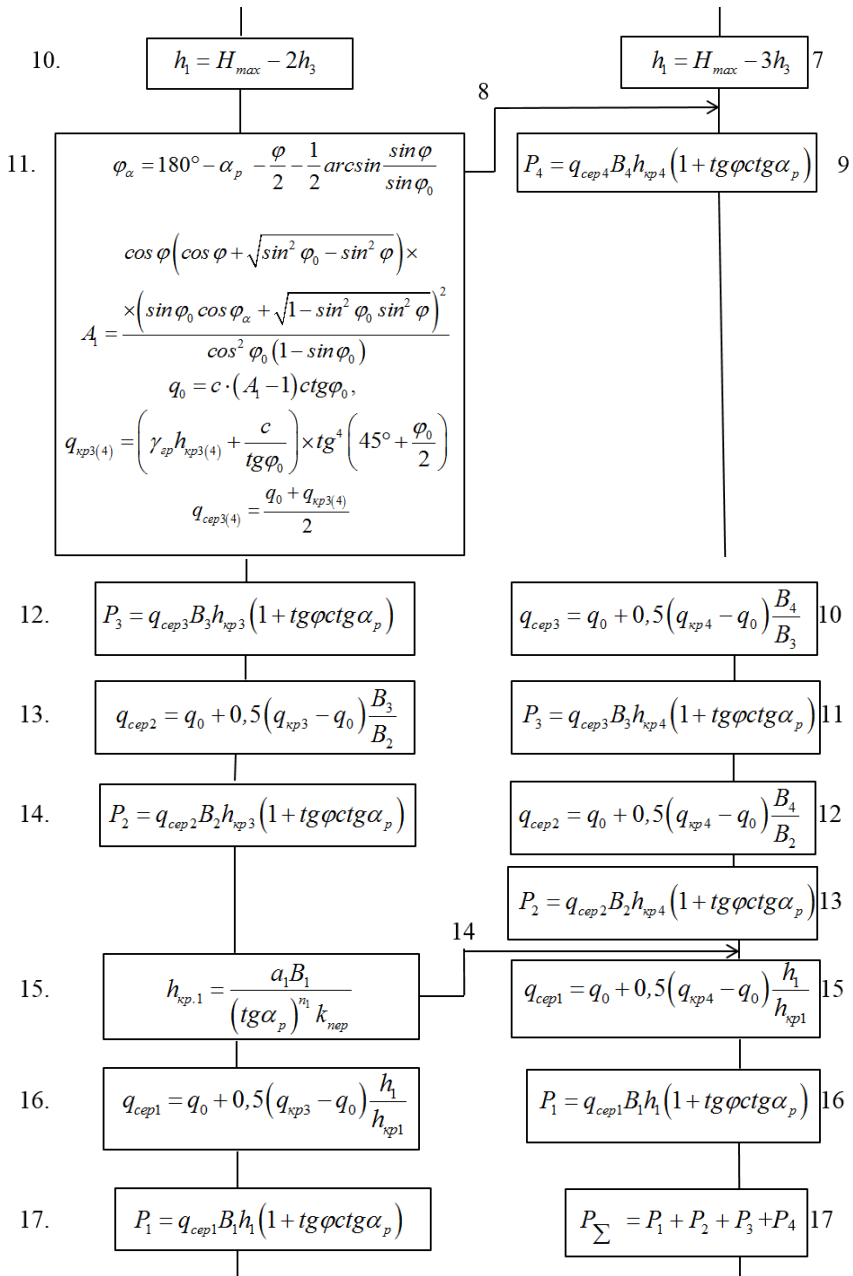
A_k, D_k – коефіцієнти інтерполяції для чотириярусного ЗРО, м/рад, м([1], табл.3.2);

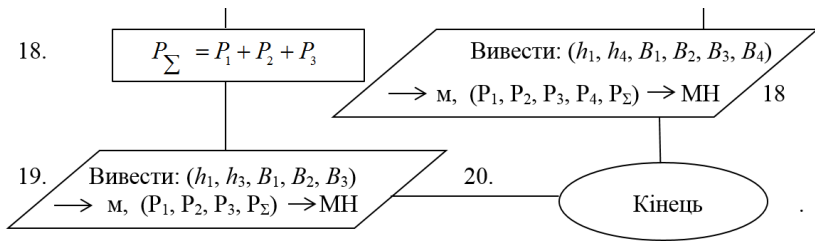
B_1, B_2, B_3, B_4 – ширини ґрунторозробних органів чотириярусного ЗРО, м;

$P_1, P_2, P_3, P_{\Sigma}$ - сила різання у відповідному ярусі та сумарна сила різання триярусного ЗРО, МН;

$P_1, P_2, P_3, P_4, P_{\Sigma}$ - сила різання у відповідному ярусі та сумарна сила різання чотириярусного ЗРО, МН.







Практичне заняття 4.
Блок-схема алгоритму визначення параметрів
багоярусних безвідвальних ЗРО, що працюють за
принципом рівності масових витрат ґрунту
(Блок-схема 4)

Визначити оптимальну висоту ярусів, кількість ярусів, ширину різання ґрунторозробних органів у кожному ярусі, питомі опори різання у верхньому та нижніх ярусах, а також сумарний опір переміщенню багоярусного ЗРО, що працює на принципі рівності масових витрат ґрунту.

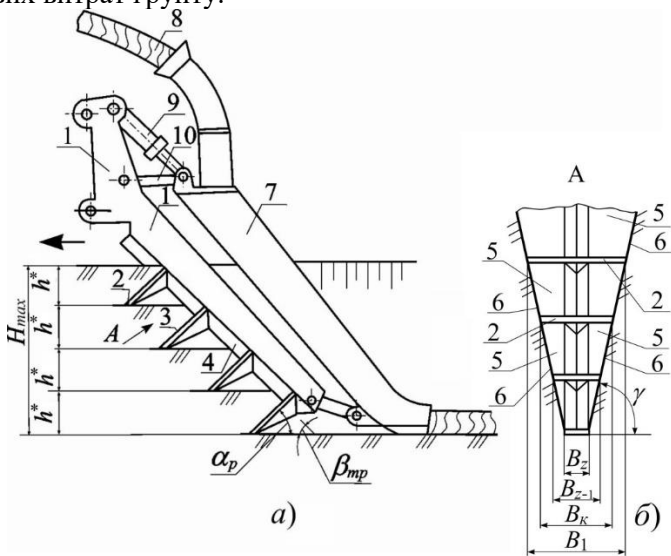


Рис.4.Принципова схема чотириярусного безвідвального ЗРО: а) у профільній площині; б) у фронтальній площині:

**Умовні позначення та одиниці вимірювання
вхідних і вихідних даних**

$c, \varphi, \gamma_{\text{гр}}, a_{\psi 2}, k_{\psi 2}, a_1, n_1, a_2, n_2, H_{\text{max}}, d, \delta_3, t_{\text{ст}}, \alpha_p, k_{\text{пер}}$ - (див. блок-схему 3)

$\rho_{\text{нр}}, \rho_{\text{зр}}$ - щільність ґрунту в природньому та зруйнованому стані, T/M^3 ([1], табл.1.2.);

a_{k2}, b_{k2} - коефіцієнти інтерполяції питомого зусилля деформування ґрунтів багатоярусним ЗРО, МПа;

α_p - кут різання ($\alpha_p=20\dots30^\circ$), град;

$\beta_{\text{гр}}$ - кут нахилу несучої рами ЗРО до горизонту ($\beta_{\text{гр}}=\alpha_p$), град;

Z - кількість ярусів $\left(Z = \frac{H_{\text{max}}}{h} \right)$;

h - змінна висота ярусів, м;

h^* - оптимальна висота ярусів, м;

B_z - ширина нижнього ярусу, м;

B_k - ширина інших ярусів, м;

K_1 - питомий опір багатоярусному різанню, МПа;

K_2 - питомий опір деформуванню ґрунту багатоярусним ЗРО, МПа;

$\delta_{\text{зт}}$ - висота затушення різальних кромek, м ($\delta_{\text{зт}}=0,005\dots0,01$ м);

K - порядковий номер ярусу, рахуючи зверху вниз ($K=1, 2, 3, 4$)

R_Σ - сумарне зусилля переміщення багатоярусного ЗРО, МН.

1.

Початок

2.

Введення вхідних даних:

тип ґрунту (c, a_{k2}, b_{k2}) → МПа; φ → град; γ_{np} → МН/М³;
 (ρ_{np}, ρ_{zp}) → Т/М³, $(a_1, n_1, a_2, n_2, k_{пер}, k_{\psi 2}), a_{\psi 2}$ → рад;
 $(H_{max}, h, d, \delta_3, \delta_{ст}, t_{cm})$ → м; $\alpha_p = \beta_{np}$ → град.

3.

$$B_z = d + 2\delta_3 + 2t_{cm}$$

4.

$$h_{кп1,2} = \frac{a_{1,2} B_z}{(tg \alpha_p)^{n_{1,2}} k_{пер}}$$

5.

$$\psi_2 = 53,7^\circ \left(a_{\psi_2} + k_{\psi_2} \cdot \frac{\alpha_p}{57,3^\circ} \right)$$

6.

$$\Theta = \frac{\rho_{zp} \sin \psi_2}{\rho_{np} \sin \beta_{np} \sin(\alpha_p + \psi_2)}$$

7.

$$Z = \frac{H_{max}}{h} \rightarrow \text{цїле число}$$

8.

$$B_k = \left[1 + \frac{2(Z - K)}{3\Theta - 1} \right] B_z$$

9.

$$\varphi_\alpha = 180^\circ - \alpha_p - \frac{\varphi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0}$$

$$A_1 = \frac{\cos \varphi \left(\cos \varphi + \sqrt{\sin^2 \varphi_0 - \sin^2 \varphi} \right) \times \left(\sin \varphi_0 \cos \varphi_\alpha + \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_0 \sin^2 \varphi} \right)^2}{\cos^2 \varphi (1 - \sin \varphi_0)}$$

$$q_0 = c \cdot (A_1 - 1) \operatorname{ctg} \varphi_0, q_{кп1,2} = \left(\gamma_{zp} h_{кп1,2} + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi_0} \right) \times \operatorname{tg}^4 \left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} \right)$$

10.
$$P_{\Sigma} = (1 + fctg\alpha_p) B_1 \left[q_0 h + \frac{q_{xp1} - q_0}{2a_1 B_1} (tg\alpha_p)^{n_1} k_{nep} \cdot \frac{h^2}{2} \right] +$$

$$+ (1 + fctg\alpha_p) \sum_{\kappa=2}^{H_{max}/h} B_{\kappa} \left[q_0 h + \frac{q_{xp2} - q_0}{2a_2 B_{\kappa}} (tg\alpha_p)^{n_2} k_{nep} \frac{h^2}{2} \right] + \delta_{3m} q_{xp2} \sum_{\kappa=2}^{H_{max}/h} B_{\kappa}$$

$$P_{\Sigma} = f(h); h^* \rightarrow P_{\Sigma}^{min}$$

11.
$$Z \geq \frac{H_{max}}{h^*} \rightarrow \text{цїле число}$$

12.
$$B_{\kappa}^* = \left[1 + \frac{2(Z - K)}{3\Theta - 1} \right] B_Z$$

13.
$$\gamma = \text{arccctg} \frac{B_{Z-1} - B_Z}{2h^*}$$

14.
$$B_0 = B_Z + 2H_{max} ctg\gamma$$

15.
$$K_1 = \left\{ (1 + tg\varphi ctg\alpha_p) \left[q_0 h^* + \frac{q_{xp1} - q_0}{2a_1 B_1} (tg\alpha_p)^{n_1} k_{nep} \frac{(h^*)^2}{2} \right] B_1 + \right.$$

$$+ (1 + tg\varphi ctg\alpha_p) \left[q_0 h^* + \frac{q_{xp2} - q_0}{2a_2 B_{\kappa}} (tg\alpha_p)^{n_2} k_{nep} \frac{(h^*)^2}{2} \right] \sum_{\kappa=2}^Z B_{\kappa} +$$

$$\left. + \delta_{3m} q_{xp2} \sum_{\kappa=1}^Z B_{\kappa} \right\} / \frac{B_Z + B_0}{2} H_{max}$$

16.
$$K_2 = a_{k_2} + b_{k_2} \cdot \frac{\rho_{3p}}{\rho_{yp}}$$

17.
$$P_{\Sigma} = K_1 \frac{B_Z + B_0}{2} \cdot H_{max} + K_2 \frac{B_Z + B_1}{2} (H_{max} - h^*)$$

18.

Вивести: $(h^*, B_k) \rightarrow M$,
 $Z, (K_1, K_2) \rightarrow \text{МПа}; P_\Sigma \rightarrow \text{МН}$

19.

Кінець

Практичне заняття 5.

Блок-схема алгоритму визначення основних параметрів і форми відвалів багатоярусних ЗРО відвального типу (блок-схема 5)

Визначити кут захвату ґрунторозробних органів, оптимальну висоту і кількість ярусів, ширину захвату, побудувати криволінійну направляючу для побудови відвалів і визначити сумарний опір переміщенню багатоярусного ЗРО відвального типу, що працює на принципі рівності площ поперечного перерізу зрізаємих шарів ґрунту та прохідних вікон у кожному ярусі.

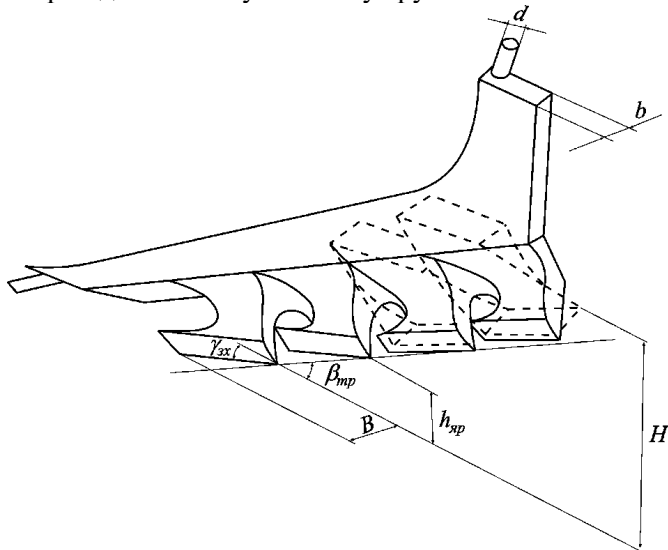


Рис.5. Схема багатоярусного робочого органу відвального типу і його основні параметри.

Умовні позначення та одиниці вимірювання вхідних і вихідних даних:

- c – коефіцієнт зчеплення ґрунту, МПа([1],табл.1.2);
 φ, φ_0 – кути зовнішнього та внутрішнього тертя ґрунту, град([1],табл.1.2);
 $\gamma_{гр}$ – питома сила тяжіння ґрунту, МН/м³([1],табл.1.2);
 a_2, n_2 – коефіцієнти апроксимації критичної глибини різання для нижніх ярусів([1],табл.1.1);
 $a_{\psi 2}, k_{\psi 2}$ – коефіцієнти інтерполяції для кута зсуву ґрунту в нижніх ярусах; ([1],табл.2.3)
 d – діаметр лінійно-протяжного об'єкта (ЛПО), що укладається, м([1], табл.5.1);
 δ_3 – зазор між бічними стінками ЗРО і ЛПО, м;
 $t_{ст}$ – товщина бічних стінок ЗРО, м([1], табл.5.1);
 H_{max} – максимальна глибина укладання ЛПО, м([1], табл.5.1);
 $\beta_{тр}$ – кут нахилу несучої рами ЗРО до горизонту, град;
 α_p – кут різання ґрунторозробних органів, град. ($\alpha_p=25\dots35^\circ$);
 k_1 – коефіцієнт збільшення висоти ґрунтового пласта у процесі відокремлення його від масиву ($k_1=1,2\dots1,3$);
 α_3 – задній кут ґрунторозробних органів ($\alpha_3=15\dots20^\circ$), град;
 $\beta_{тр}$ – кут нахилу робочого органу до горизонту ($\beta_{тр}=24\dots26^\circ$), град;
 2β – кут загострення вертикального ножа ($2\beta=45\dots50^\circ$), град;
 ϑ – робоча швидкість ЗРО, м/с (до 1,0 м/с);
 $h_{зт}$ – висота затуплення різальних кромки, м([1], табл.5.1);
 h_v – вертикальне переміщення робочого органу , м([1],табл.5.1);
(залежить від мікрорельєфу місцевості).
 A_p, A_3, A_α – розрахункові коефіцієнти впливу кута різання, ґрунтового ядра ущільнення та заднього кута на опір різанню([1], табл.5.2...5.8);
 μ_0, μ_k – кути між дотичною до направляючої кривої та горизонтальною віссю (у проекції на профільну площину) у початковій і кінцевій точках направляючої кривої профілю відвала ЗРО ($\mu_0=35\dots50^\circ$; $\mu_k=60\dots65^\circ$), град.
 $\gamma_{зх}$ – кут захвату ґрунторозробних органів, град;

$h_{яр}^*$ - оптимальна висота ярусів, м;

t_n – товщина вертикальних відрізаючих ножів, м ($t_n = 0.02 \dots 0.03$ м);

B – ширина ярусів, м;

Z – функція направляючої кривої профілю h_v – вертикальне відвала ЗРО, м;

R_Σ – сумарний опір переміщенню багатоярусного ЗРО відвального типу, МН.

g - прискорення вільного падіння, м/с² ($g=9.81$ м/с²).

1.

Початок

2.

Введення вхідних даних: тип ґрунту
 ($c \rightarrow \text{МПа}$, $\varphi_0, \varphi \rightarrow \text{град}$, $\gamma_{\text{гп}} \rightarrow \text{МН/М}^3$, k_1, α_2 ,
 $n_2, \alpha_{\text{м}2}, k_{\text{в}2}$), ($d, H_{\text{max}}, \delta_3, t_{\text{гт}}, t_{\text{н}}, h_{\text{згт}}, h_0$) $\rightarrow \text{М}$,
 $\vartheta \rightarrow \text{М/с}$, $g \rightarrow \text{М/с}^2$ ($\alpha_p, \alpha_3, 2\beta, \beta_{\text{зп}}, \mu_0, \mu_k$) $\rightarrow \text{град}$,
 A_p, A_3, A_d .

3.

$$b = d + 2\delta_3 + 2t_{\text{гп}}$$

4.

$$\gamma_{\text{зз}} = 80^\circ - 0,5(\alpha_3 - 10^\circ)$$

5.

$$h_{\text{кп}2} = 0,3 \text{ м}$$

6.

$$\varphi_\alpha = 180^\circ - \alpha_p - \frac{\varphi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0}$$

$$A_1 = \frac{\cos \varphi (\cos \varphi + \sqrt{\sin^2 \varphi_0 - \sin^2 \varphi}) \times (\sin \varphi_0 \cos \varphi_\alpha + \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_0 \sin^2 \varphi})^2}{\cos^2 \varphi (1 - \sin \varphi_0)}$$

$$q_0 = c \cdot (A_1 - 1) \text{ctg} \varphi_0, q_{\text{кп}2} = \left(\gamma_{\text{зп}} h_{\text{кп}2} + \frac{c}{\text{tg} \varphi_0} \right) \times \text{tg}^4 \left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} \right)$$

7.

$$h_{\text{зп}}^* = \sqrt{\frac{(A_d h_{\text{зп}} - A_3 h_v) q_{\text{кп}2} b}{A_p k_1 \left[q_0 + \frac{(q_{\text{кп}2} - q_0) (\text{tg} \alpha_p)^{n_2}}{2\alpha_2} \cdot \frac{k_{\text{неп}}}{k_1} \right]}}$$

8.

$$B = h_{\text{зп}}^* k_1 + b$$

9.

$$Z_{\text{зп}} \geq \frac{H_{\text{max}}}{h_{\text{зп}}^*} \rightarrow \text{цїле число}$$

10.

$$\Delta y = \frac{2(h_{xp}^* k_1 + b)}{5(tg \mu_\kappa + tg \mu_0)}$$

11.

$$Z = \frac{tg^2 \mu_\kappa - tg^2 \mu_0}{4(h_{xp}^* k_1 + b)} y^2 + tg \mu_0 \cdot y$$

$$y = \Delta y \cdot k, \quad k=0, 1, 2, 3, 4, 5$$

12.

$$\psi_2 = 57,3^\circ \left(a_{\psi_2} + k_{\psi_2} \frac{\alpha_p}{57,3^\circ} \right)$$

13.

$$g_r = \frac{g \sin \psi_2}{\sin(\alpha_p + \psi_2)}$$

14.

$$P_\Sigma = A_p H_{max} (h_{xp}^* k_1 + b) \left[q_0 + \frac{(q_{xp2} - q_0) h_{xp}^* k_{nep} (tg \alpha_p)^{n_2}}{2a_2 (h_{xp}^* k_1 + b)} + \right.$$

$$\left. + (A_2 h_{3m} - A_3 h_v) Z_{xp} (h_{xp}^* k_1 + b) q_{xp2} + t_n H_{max} q_{xp2} + \right.$$

$$\left. + \frac{\gamma_{xp} (h_{xp}^* k_1 + b)^2 (h_{xp}^*)}{1 - tg \varphi \cdot tg \varphi_0} \left[tg \varphi \frac{g_r^2}{g h_{xp}^* k_1 + b} \cdot \frac{(\mu_\kappa - \mu_0)}{57,3^\circ} + 1 + \frac{2tg \varphi}{tg \mu_0 + tg \mu_\kappa} \right] \cos \mu_0 \right]$$

15.

Вивести: $\gamma_{zx} \rightarrow$ град, $(h_{xp}^*, B) \rightarrow$ м,
 $Z_{xp}, Z = f(y), P_\Sigma \rightarrow$ МН

16.

Кінець

Практичне заняття 6.

Блок-схема алгоритму визначення основних параметрів ґрунтопроколюючих пристроїв (блок-схема б)

Визначити кут загострення конусного наконечника, його лобовий опір, напруження в ґрунті на границі пружно-пластичної зони, діаметр циліндричної зони руйнування ґрунту, довжину задньої фіксуючої еластичної камери, а також сумарний опір переміщенню біонічно-синтезованого пристрою.

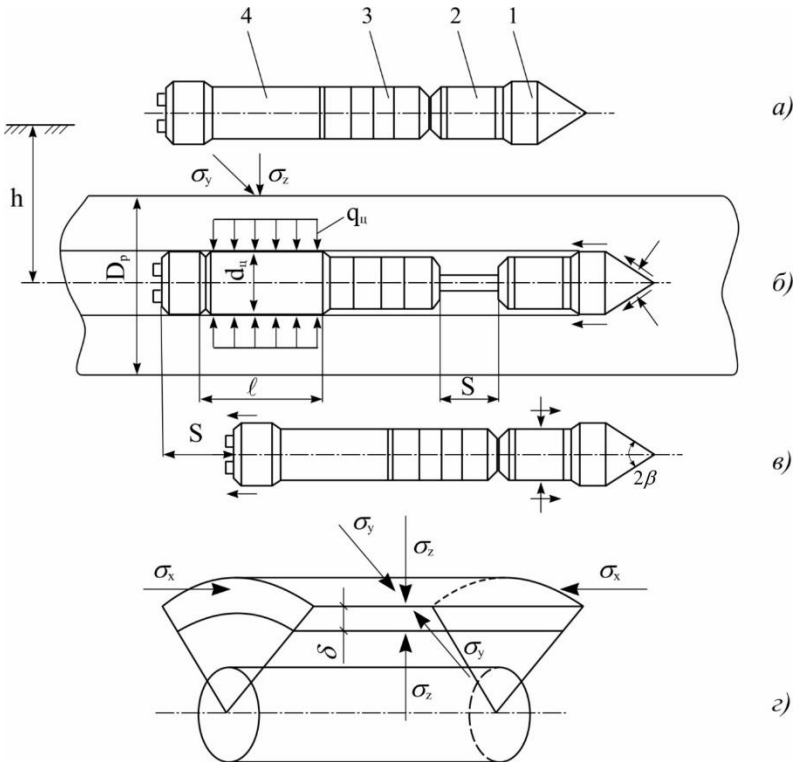


Рис. 6. Схема взаємодії еластичних оболонок фіксуючих камер ПРП з ґрунтом під час руху:

a – вихідне положення ПРП; *б* – деформація ґрунту в процесі фіксації хвостової частини і просування вперед

відносно неї носової частини;
 ϵ – фіксація просунутої вперед носової частини і закінчення підтягування до неї хвостової частини; ϱ – об'ємне зображення взаємодії з ґрунтом елемента поверхні фіксуєчих камер

Умовні позначення та одиниці вимірювання вхідних і вихідних даних:

c – коефіцієнт зчеплення ґрунту, МПа ([3], табл.1.2);
 φ_0 – кут внутрішнього тертя ґрунту, град([3], табл.1.2);
 φ – кут зовнішнього тертя ґрунту, град ([3], табл.1.2);
 f – коефіцієнт зовнішнього тертя ґрунту ($f=tg\varphi$);
 $\gamma_{гр}$ – питома сила тяжіння ґрунту, МН/м³ ([3], табл.1.2);
 $\rho_{пр}$ – природна щільність ґрунту $\left(\rho_{пр} = \frac{\gamma_{сп}}{g} \right)$, кг/м³;

$\rho_{тв}$ – щільність твердої фази ґрунту (щільність ґрунту при умові, що в ньому відсутні пори), кг/м³ ($\rho_{тв}=2,7\dots2,75$ кг/м³);
 ω – природна вологість ґрунту, %([2], табл.1.2);
 c_k – коефіцієнт компресії ґрунту, МПа⁻¹;
 $E_{гр}$ – компресійний модуль деформації ґрунту, МПа;
 h – глибина проколу, м ([3], табл.1.1);
 d_n – діаметр проколу, м ([3], табл.1.1) ;
 L – довжина проколу, м ([3], табл.1.1);
 $q_{гр}$ - маса одного погонного метра труби, кг/м ([3], табл.1.1);
 2β – кут загострення носової частини, град;
 W_l – лобовий опір носової частини, МН;
 σ_1 – напруження на границі пружної та пластичної зони, МПа;
 D_p – діаметр пластичної (зруйнованої) зони ґрунту, м;
 $q_{ц}$ – контактний тиск ґрунту на циліндричну частину пристрою, МПа;
 l – мінімальна довжина задньої фіксуєчої камери, м;
 $W_{ц}$ – опір сил тертя на циліндричній частині пристрою, МН;
 W_{Σ} – натискне зусилля гідродомкратів, МН;
 $l_{ц}$ – довжина циліндричної частини пристрою ($l_{ц}=0,2\dots0,8$ м);
 q_3 – залишковий тиск на циліндричній частині пристрою ($q_3=0,016\dots0,035$ МПа).
 g – прискорення вільного падіння, м/с² ($g = 9.81$ м/с²).

1.

Початок

2.

Введення вхідних даних: тип ґрунту
 ($c \rightarrow \text{МПа}$, $\varphi_0, \varphi \rightarrow \text{град}$, $\gamma_{\text{ґр}} \rightarrow \text{МН/м}^3$, $\omega \rightarrow \%$,
 $f = \text{tg} \varphi$, $\rho_{\text{ш}} = \gamma_{\text{ґр}} / g \rightarrow \text{кг/м}^3$, $\rho_{\text{ґв}} \rightarrow \text{кг/м}^3$; $c_{\kappa} \rightarrow \text{МПа}^{-1}$);
 $h \rightarrow \text{м}$, $d \rightarrow \text{м}$; $L \rightarrow \text{м}$; $l_{\text{ц}} \rightarrow \text{м}$; $q_{\text{ґр}} \rightarrow \text{кг/м}$,
 $q_2 \rightarrow \text{МПа}$; $g = 9.81 \text{ м/с}^2$

3.

$$\left. \begin{matrix} A+ \\ D- \end{matrix} \right\} = \sqrt[3]{\frac{16f^4 + 45f^2 + 27}{54f} \pm \sqrt{\left(\frac{16f^4 + 45f^2 + 27}{54f}\right)^2 - \left(\frac{3 + 4f^2}{9}\right)^3}}$$

4.

$$2\beta = 2\text{arcctg} \left(\frac{2}{3} f + A + D \right)$$

5.

$$c_{\kappa} = 0,07(1,2\omega - 4,8)$$

6.

$$E_{\text{зр}} = \frac{\left(1 + \frac{\omega\%}{100}\right) \rho_{\text{ме}}}{c_{\kappa} \rho_{\text{ґр}}}$$

7.

$$P_{\text{ґр}} = W_{\text{л}} = \frac{3,14 E_{\text{зр}} d^2}{8} (1 + f \cdot \text{ctg} \beta)$$

8.

$$\begin{aligned} A_* &= \sin \varphi_0 (3 - \sin \varphi_0) \\ B_* &= 3c \cdot \cos \varphi_0 - 2,5c \cdot \sin 2\varphi_0 + \gamma_{\text{зр}} \cdot h(1 + \sin \varphi_0) \\ C_* &= [\gamma_{\text{зр}} h(1 + \sin \varphi_0) + 4c \cdot \cos \varphi_0] c \cdot \cos \varphi_0 \end{aligned}$$

9.

$$\sigma_1 = \frac{B_* + \sqrt{B_*^2 + 4A_*C_*}}{2A_*}$$

10.

$$\frac{D_p}{d_n} = \frac{\left(\gamma_{zp}h + \frac{c}{\text{tg}\varphi_0}\right) \text{tg}^4\left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2}\right)}{\sigma_1} = \lambda$$

11.

$$q_y = \lambda \sigma_1$$

12.

$$l \geq \frac{W_x}{\pi d_n q_y \text{tg}\varphi}$$

13.

$$W_y = 0,1\pi\lambda d_n f \sigma_1 + \pi d_n f (l_y - 0,2)$$

14.

$$W_\Sigma = W_x + W_y + \frac{q_{mp} L f g}{10^6}$$

15.

Вивести: $2\beta \rightarrow$ град, $W_x \rightarrow$ МН;
 $\sigma_1 \rightarrow$ МПа; $\frac{D_p}{d_n}$; $q_y \rightarrow$ МПа; $l \rightarrow$ м;
 $W_\Sigma \rightarrow$ МН

16.

Кінець

Практичне заняття 7.

Блок-схема алгоритму визначення сумарного зусилля переміщення та зони деформування ґрунту кільцевидним робочим органом при комбінованому способі (продавлювання) прокладання підземних комунікацій (блок-схема 7)

Визначити довжину кільцевидного наконечника, напруження в ґрунті на границі пружно-пластичної зони, силу продавлювання для одноконусного кільцевидного наконечника із зовнішнім конусом, сили тертя на зовнішній та внутрішній циліндричних поверхнях наконечника, діаметр руйнування кільцевидним наконечником, а також сумарний опір його переміщення.

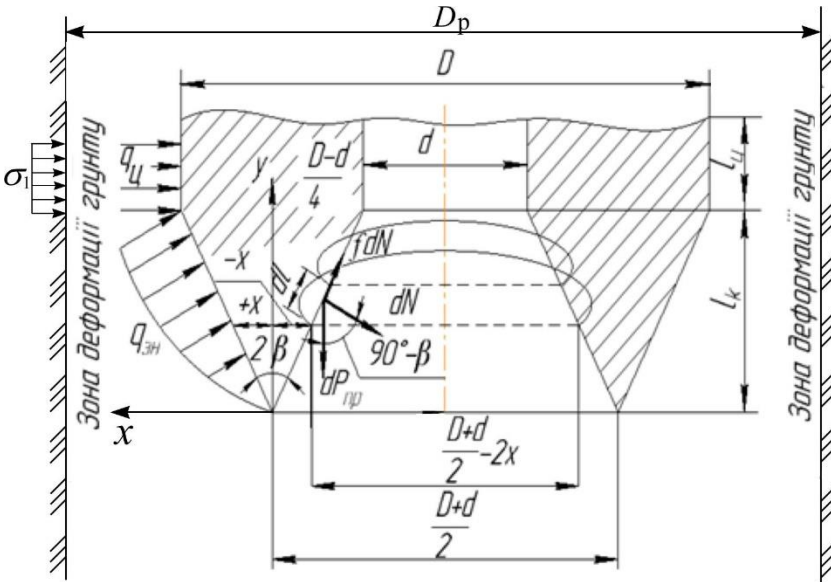


Рис.7. Схема взаємодії кільцевого двоконусного наконечника з ґрунтом

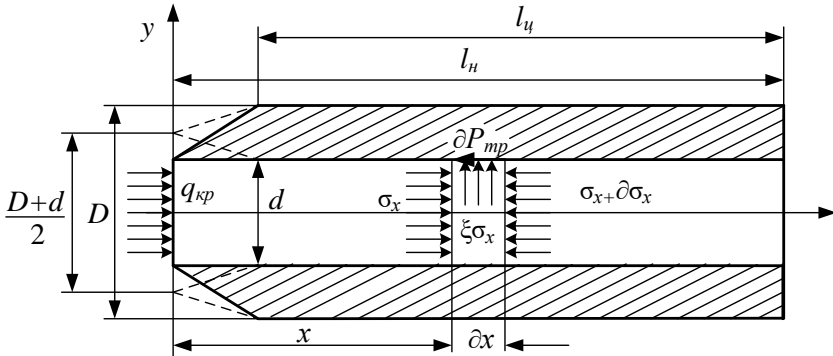


Рис.8.Розрахункова схема наконечника із зовнішнім конусом

Умовні позначення та одиниці вимірювання вхідних і вихідних даних:

- ω – вологість ґрунту, % ([2], табл.1.2);;
- c – коефіцієнт зчеплення ґрунту, МПа([3], табл.1.2);
- $\rho_{тв}$ – щільність твердої фази ґрунту при умові, що в ньому відсутні пори ($\rho_{тв}=2700\dots2750\text{кг/м}^3$), кг/м^3 ;
- $\rho_{пр}$ – щільність ґрунту в природньому непорушеному стані, кг/м^3 ($\rho_{пр} = \gamma_{гр}/g$);
- $\omega_{т}$ – границя текучості ґрунту, ($\omega_{т}=5,2+1,2\omega$), %;
- c_k – коефіцієнт компресії ґрунту ($c_k=0,07\dots0,09(\omega_{т}-1)$, МПа $^{-1}$);
- $E_{гр}$ – компресійний модуль ґрунту, МПа;
- h – глибина, на якій здійснюється продавлювання, м ([3], табл.1.1);
- 2β – кут загострення конуса ($2\beta=50^\circ\dots60^\circ$), град;
- φ – кут зовнішнього тертя ґрунту, град ([3], табл.1.2);
- f – коефіцієнт зовнішнього тертя ґрунту ($f=\text{tg}\varphi$);
- φ_0 – кут внутрішнього тертя ґрунту, град ([3], табл.1.2);
- D – зовнішній діаметр наконечника, м([3], табл.1.1);
- d – внутрішній діаметр наконечника, м;
- γ – відношення зовнішнього до внутрішнього діам([3], табл.1.1)etra наконечника ($\gamma=D/d=1,2\dots1,7$);
- ξ – коефіцієнт бічного тиску;
- $q_{кр}$ – критичний тиск на ґрунт по його несучій спроможності, МПа;
- l_n – довжина наконечника, м($l_n = l_k + l_u$);

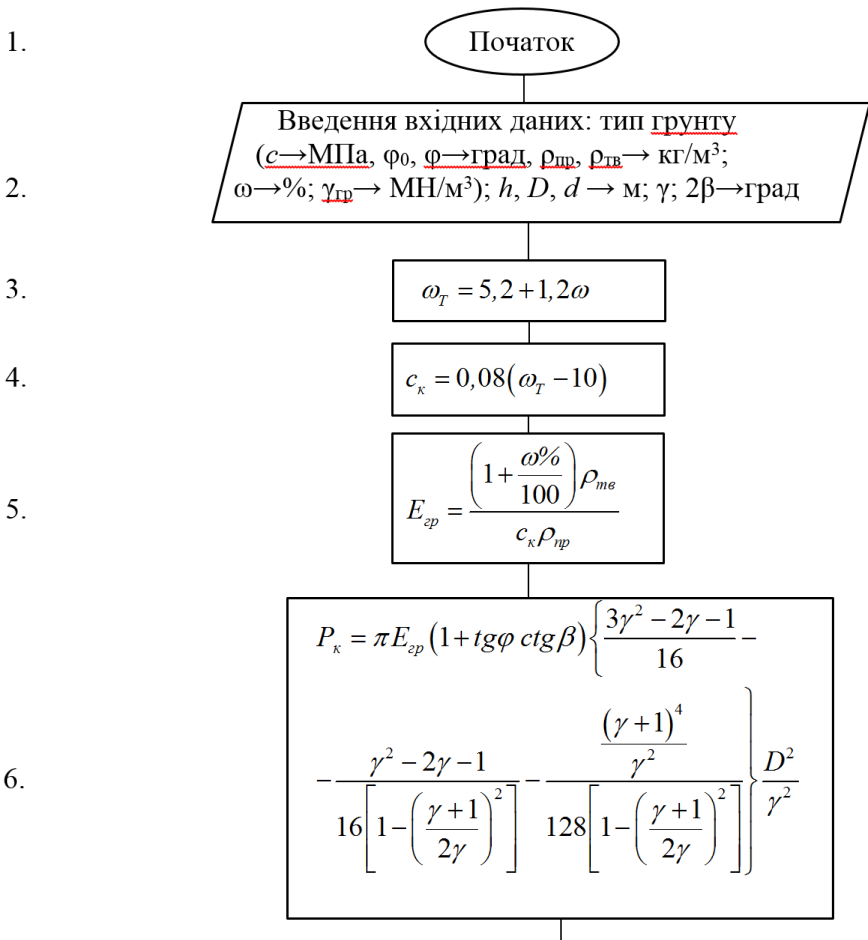
P_k – сила продавлювання одноконусного наконечника із зовнішнім конусом, МН;

σ_1 – напруження в ґрунті на границі пружної та пластичної зони, МПа;

P_{mp}^{6H}, P_{mp}^{36} - сила тертя на внутрішньому та зовнішньому циліндрах, МН;

P_Σ – сумарне зусилля переміщення наконечника, МН;

D_p – діаметр зони руйнування ґрунту, м.



7.

$$q_{kp} = \left(\gamma_{zp} h + \frac{c}{tg \varphi_0} \right) tg^4 \left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} \right)$$

8.

$$\zeta = 1 - 0,74 tg \varphi_0 - \frac{1,52 \cdot c}{q_{kp}}$$

9.

$$l_n e^{\frac{4tg\varphi_0 l_n}{2}} < \frac{q_{kp}}{\gamma_{zp}} \rightarrow l_n$$

10.

$$\begin{aligned} A_* &= \sin \varphi_0 (3 - \sin \varphi_0) \\ B_* &= 3 \cdot c \cdot \cos \varphi_0 - 2,5 \cdot c \cdot \sin 2\varphi_0 + \gamma_{zp} h (1 + \sin \varphi_0) \\ C_* &= [\gamma_{zp} h (1 + \sin \varphi_0) + 4c \cdot \cos \varphi_0] c \cdot \cos \varphi_0 \end{aligned}$$

11.

$$\sigma_1 = \frac{B_* + \sqrt{B_*^2 + 4A_*C_*}}{2A_*}$$

12.

$$\lambda = \frac{\left(\gamma_{zp} h + \frac{c}{tg \varphi_0} \right) tg^4 \left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} \right)}{\sigma_1}$$

13.

$$D_p = D \sqrt{\lambda^2 - (\lambda^2 - 1) \left(\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2}$$

14.

$$P_{np}^{38} = \frac{\pi D_p \sigma_1 tg \varphi l_n}{2}$$

15.

$$P_{mp}^{en} = \frac{\pi d^2}{4} q_{kp} \left(1 - \frac{1}{e^{4 \operatorname{tg} \varphi_z l_n / d}} \right)$$

16.

$$P_{\Sigma} = P_{\kappa} + P_{mp}^{ze} + P_{mp}^{en}$$

17.

Вивести: $l_n \rightarrow \text{м}$, $\sigma_1 \rightarrow \text{МПа}$;
 P_{κ} , P_{mp}^{ze} , P_{mp}^{en} , $P_{\Sigma} \rightarrow \text{МН}$; $D_p \rightarrow \text{м}$

18.

Кінець

Практичне заняття 8.

Блок-схема алгоритму визначення корекції траєкторії підземного руху асиметричної головки з похилою еліптичною площиною (блок-схема 8)

Визначити робочий і критичний кути нахилу еліпсоїдної площини циліндричного наконечника до горизонту, поздовжнє та поперечне зусилля, що діє на наконечник і його поперечне відхилення в залежності від довжини проходження траси.

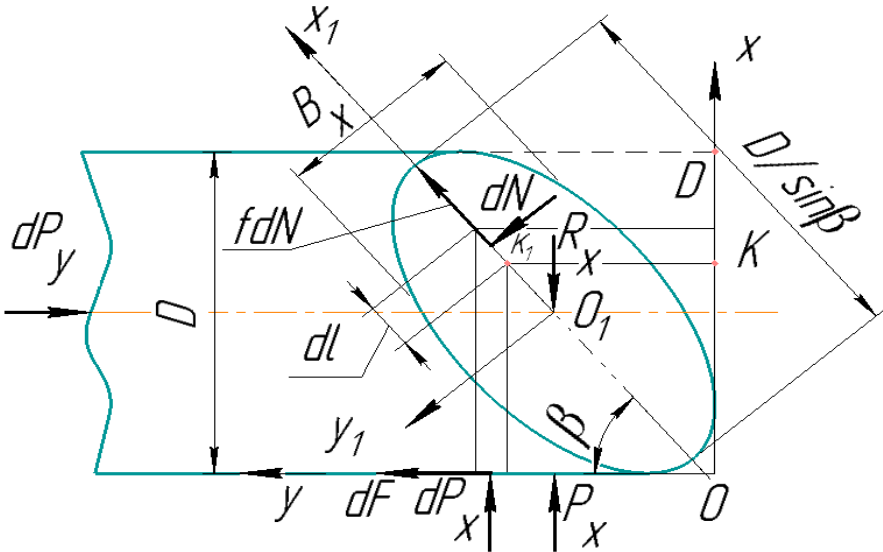


Рис.9.Розрахункова схема наконечника з похилою площиною

Умовні позначення та одиниці вимірювання вхідних і вихідних даних:

ω , $\rho_{тв}$, $\rho_{пр}$, c_k , φ , f , D (див. блок-схему 7);

P_y – поздовжнє зусилля, Н;

P_x – поперечне зусилля, Н;

β – кут нахилу лобової площини наконечника до горизонту, град;

W – статичний момент опору кільцеподібного перерізу штанги, м^3 ;
 $[\sigma_{32}]$ – допустиме напруження сталевій штанги на згин, $\text{Н}/\text{м}^2$ (для

сталі 45 - $[\sigma_{32}] = 300 \cdot 10^6 \text{Н}/\text{м}^2$);

L_{\min} – мінімальна довжина штанги, м ($L_{\min} = 0,5 \dots 1,0$ м);

q – погонна сила тяжіння штанги, $\text{Н}/\text{м}$ $\left(q = 100 \dots 200 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right)$;

$E_{\text{гр}}$ – компресійний модуль ґрунту, $\text{Н}/\text{м}^2$;

S – поперечне відхилення наконечника, м;

$E_{\text{зг}}$ – модуль пружності сталевій штанги, $\text{Н}/\text{м}^2$ $\left(E_{\text{зг}} = 2 \cdot 10^{11} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right)$;

γ – відношення зовнішнього до внутрішнього діаметра штанги ($\gamma = 1,2 \dots 1,7$);

I – момент інерції кільцеподібного поперечного перерізу штанги, м^4 ;

$k_{\text{п}}$ – коефіцієнт постілі (основи), $\text{Н}/\text{м}^2$ (для ґрунтів середньої щільності $k_{\text{п}} = (5 \dots 50) 10^4 \text{Н}/\text{м}^2$);

L – довжина проходки, м (задається в технічному завданні);

1.

Початок

2.

Введення вхідних даних: тип ґрунту
($\varphi \rightarrow$ град; $\rho_{шв}$, $\rho_{гв} \rightarrow$ кг/м³; $\omega \rightarrow$ %;
 $c_{\kappa} \rightarrow$ МПа⁻¹); $D \rightarrow$ м; γ , $[\sigma_{зг}] \rightarrow$ Н/м²; $q \rightarrow$ Н/м;
 $E_{зг} \rightarrow$ Н/м²; $k_{п} \rightarrow$ Н/м²; $L_{min} \rightarrow$ м; $L \rightarrow$ м

3.

$$\beta = \arcsin \sqrt{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \left(\frac{tg \varphi}{1 + tg^2 \varphi} \right)^2}}$$

4.

$$\omega_T = 5,2 + 1,2\omega$$

5.

$$c_{\kappa} = 0,08(\omega_T - 10)$$

6.

$$E_{зп} = \frac{\left(1 + \frac{\omega\%}{100}\right) \rho_{мг}}{c_{\kappa} \cdot \rho_{пг}} \cdot 10^6$$

7.

$$W = 0,098D^3 \frac{\gamma^4 - 1}{\gamma^4}$$

8.

$$\beta_{зп} = \operatorname{arccctg} \left(tg \varphi + \frac{8W[\sigma_{зг}] - qL_{min}^2}{1,44E_{зп}D^2L_{min}} \right)$$

9.

$$\beta_{зп} < \beta$$

10.

$$P_y = 0,36E_{зп} \left[(1 - tg^2 \varphi) + 2tg \varphi \cdot ctg \beta \right] D^2$$

11.

$$P_x = 0,36E_{zp} (ctg\beta_{kp} - tg\varphi) D^2$$

12.

$$I = 0,05D^4 \frac{\gamma^4 - 1}{\gamma^4}$$

13.

$$\beta_n = \sqrt[4]{\frac{k_n}{4E_{32}I}}$$

14.

$$S = \frac{0,9E_{zp} (1 - tg\varphi \cdot ctg\beta_{kp}) L}{E_{32} D^3 \frac{\gamma^4 - 1}{\gamma^4} \beta_n^3}$$

15.

Вивести: $\beta, \beta_{kp} \rightarrow$ град,
 $P_y, P_x \rightarrow$ Н; $L, S \rightarrow$ м

16.

Кінець

Література

1. 02-01-325. Методичні вказівки до виконання практичних робіт та розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Машини для прокладання підземних комунікацій» для студентів спеціальності «Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні, меліоративні машини і обладнання» денної та заочної форм навчання / С. В. Кравець, А. А. Нечидюк, О. В. Косяк. Рівне : НУВГП, 2015. 35 с.
2. 02-01-339. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Теорія руйнування робочих середовищ» для студентів напряму підготовки 6.050503 «Машинобудування» денної та заочної форм навчання / С.В. Кравець, О. В. Косяк. Рівне : НУВГП, 2015. 27 с.
3. 02-01-433. Методичні вказівки для виконання практичних робіт з дисципліни «Наукові основи створення машин для прокладання підземних комунікацій» для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» спеціалізації «Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні, меліоративні машини та обладнання» денної та заочної форм навчання / Кравець С. В. Косяк О. В. Рівне : НУВГП, 2018. 22 с.
4. С. В. Кравець, А. А. Нечидюк, О. В. Косяк Машини для прокладання підземних комунікацій (Наукові основи створення), підручник / за заг. ред. С. В. Кравця. Рівне : НУВГП, 2018. 270 с.
5. Наукові основи та практика створення мінімально-енергоємних робочих органів для формування комунікаційних порожнин в ґрунті / С. В. Кравець, В. М. Супонев, О. П. Посмітюха, С. П. Балесний. Харків : ХНАДУ, 2021. 304 с.