

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



02-01-613М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт і самостійної роботи з
дисципліни «Створення інноваційних машин для прокладання
підземних комунікацій» для здобувачів вищої освіти другого
(магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою
«Інжиніринг машин та обладнання» спеціальності G11
«Машинобудування» денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-методичною
радою з якості ННМІ
Протокол № 5 від 18.12.2025 р.

Рівне – 2026

Методичні вказівки до виконання практичних робіт і самостійної роботи з дисципліни «Створення інноваційних машин для прокладання підземних комунікацій» для здобувачів вищої освіти другого(магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг машин та обладнання» спеціальності G11 «Машинобудування» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Кравець С. В., Холоденко В. А. – Рівне : НУВГП, 2026. – 35 с.

Укладачі: Кравець С. В., д.т.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України, професор кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин; Холоденко В. А., старший викладач кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин.

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

Керівник групи забезпечення спеціальності: Нечидюк А. А., к.т.н., доцент, доцент кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин.

Попередня версія МВ: 02-01-574М

© С. В. Кравець
В. А. Холоденко, 2026
© НУВГП, 2026

ЗМІСТ

	ст.
Вступ.....	4
Практична робота №1	5
Практична робота № 2 (4 год).....	12
Практична робота № 3 (4 год).....	15
Практична робота № 4	23
Практична робота № 5	27
Практична робота № 6	30
Практична робота № 7 (12 год).....	33
Список використаної літератури	35

Вступ

Вивчення дисципліни «Створення інноваційних машин для прокладання підземних комунікацій» включає курс лекцій лабораторні та практичні заняття.

Прокладка трубопроводів, кабелів і ліній зв'язку за останні роки перетворилася в одну з найважливіших областей будівництва, забезпечуючи зростаючі потреби промисловості, сільського господарства і в цілому народногосподарського комплексу.

Майбутньому фахівцеві в галузі машинобудування необхідні глибокі знання з проектування і випуску конкурентоспроможної продукції машинобудування: машин та обладнання для прокладання підземних інженерних комунікацій різного призначення (газо- і водопроводи низького тиску, оптико-волоконні та інші лінії зв'язку, термо- і гідромеліоративні системи, енергосилові лінії, протиерозійні системи та інші комунікації) із використанням сучасних поліетиленових матеріалів.

У методичних вказівках розглянуті методики розрахунків обладнання для прокладання підземних комунікацій, які створені на основі власних досліджень. Наведені варіанти індивідуальних завдань та довідкові дані.

Метою даних методичних вказівок до виконання практичних робіт з дисципліни «Створення інноваційних машин для прокладання підземних комунікацій» є закріплення знань, що отримані при вивченні лекційного матеріалу; вироблення навичок аналізу інженерних ситуацій, що дасть можливість майбутнім фахівцям створювати і застосовувати машини та обладнання, які дозволяють найбільш ефективно прокладати підземні комунікації.

Практична робота №1

*Тема: Визначення основних параметрів
грунтопроколюючих пристроїв.*

До основних параметрів грунтопроколюючих пристроїв належать кут загострення носової частини (2β), лобовий опір (W_n), опір циліндричної частини пристрою (W_u); її довжина (l_u), розміри руйнуючої зони (D_p) і її щільність (ρ_{cm}). Ці параметри визначені на підставі досліджень, які проведені в Національному університеті водного господарства і природокористування. (рис.1.1)

1. Для заданого типу ґрунту (табл. 1.1) оптимальний кут загострення дорівнює:

$$2\beta = 2 \cdot \arctg \left(\frac{2}{3} \cdot f + A + D \right); \quad (1.1)$$

де:

$$\left. \begin{matrix} A+ \\ D- \end{matrix} \right\} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot f^4 + 45 \cdot f^2 + 27}{54 \cdot f} \pm \sqrt{\left(\frac{16 \cdot f^4 + 45 \cdot f^2 + 27}{54 \cdot f} \right)^2 - \left(\frac{3 + 4 \cdot f^2}{9} \right)^3}}; \quad (1.2)$$

f – коефіцієнт зовнішнього тертя ґрунту, $f = tg \varphi$ (табл. 1.2).

Таблиця 1.1

Варіанти завдань для практичної роботи №1

Варіанти	Тип ґрунту	Глибина проколу h , м	Діаметр проколу d , м	Швидкість проколу v , м/с	Довжина проколу L , м	Маса 1 п.м. труби, q_{mp} , кг
1	2	3	4	5	6	7
1	Супісок твердий	1,00	0,1	0,4	1,0	1,18
2		1,05	0,2	0,6	1,5	1,52
3		1,10	0,3	0,8	2,0	2,76

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
4	Супісок твердий	1,15	0,1	1,0	2,5	1,18
5		1,20	0,2	1,2	3,0	1,52
6		1,25	0,3	1,4	3,5	2,76
7	Глина тугопластична	1,00	0,1	1,6	1,0	1,18
8		1,05	0,2	1,8	1,5	1,52
9		1,10	0,3	0,4	2,0	2,76
10		1,15	0,1	0,6	2,5	1,18
11		1,20	0,2	0,8	3,0	1,52
12		1,25	0,3	1,0	3,5	2,76
13	Супісок твердий	1,00	0,1	1,2	1,0	1,18
14		1,05	0,2	1,4	1,5	1,52
15		1,10	0,3	1,6	2,0	2,76
16		1,15	0,1	1,8	2,5	1,18
17		1,20	0,2	0,4	3,0	1,52
18		1,25	0,3	0,6	3,5	2,76
19	Суглинок напівтвердий	1,00	0,1	0,8	1,0	1,18
20		1,05	0,2	1,0	1,5	1,52
21		1,10	0,3	1,2	2,0	2,76
22		1,15	0,1	1,4	2,5	1,18
23		1,20	0,2	1,6	3,0	1,52
24		1,25	0,3	1,8	3,5	2,76
25	Глина тугопластична	1,00	0,1	0,4	1,0	1,18
26		1,05	0,2	0,6	1,5	1,52
27		1,10	0,3	0,8	2,0	2,76
28		1,15	0,1	1,0	2,5	1,18
29		1,20	0,2	1,2	3,0	1,52
30		1,25	0,3	1,4	3,5	2,76

2.Визначаємо лобовий опір головної (носової) частини пристрою:

$$P_{np} = W_{\pi} = \frac{\pi \cdot E_{cp} \cdot d_n^2}{2} (1 + f \cdot ctg(\beta)), \text{ МН}; \quad (1.3)$$

де: d_n – діаметр проколу; E_{zp} – компресійний модуль деформації ґрунту

$$E_{zp} = \frac{(1 + \omega) \rho_{mв}}{C_k \cdot \rho_{np}}, \text{ МПа}; \quad (1.4)$$

де: ω – природна вологість ґрунту $\left(\frac{\omega\%}{100} \right)$; $\rho_{mв}$ – щільність твердої фази ґрунту (щільність ґрунту при умові, що в ньому відсутні пори) ($\rho_{mв} = 2,7 \dots 2,83 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$); ρ_{np} – щільність ґрунту в природному стані ($\rho_{np} = \gamma_{zp} / g$, кг/м^3), $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; C_k – коефіцієнт компресії ґрунту ($C_k = 0,1\omega\%$), МПа^{-1} .

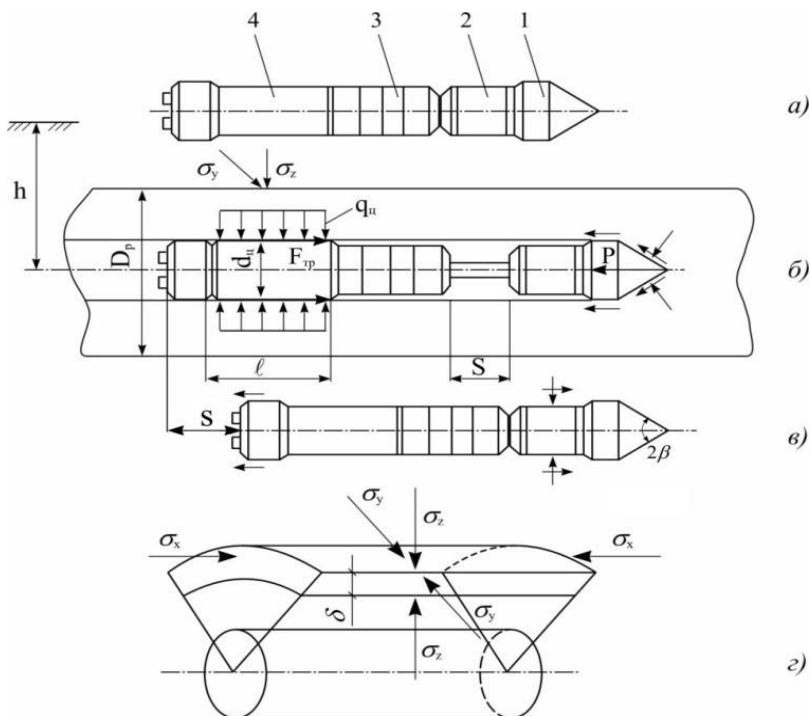


Рисунок 1.1 – Схема взаємодії еластичних оболонок фіксуючих камер підземного пристрою (ПРП) з ґрунтом під час руху:

1 – носова частина; 2 і 4 – відповідно передня і задня фіксуючі камери; 3 – багатоступінчастий силовий блок-лінійний двигун: а) – вихідне положення ПРП; б) – деформація ґрунту в процесі фіксації хвостової частини і просування вперед відносно неї носової частини; в) – фіксація просунутої вперед носової частини і закінчення підтягування до неї хвостової частини; г) – об’ємне зображення взаємодії з ґрунтом елемента поверхні фіксуючих камер

3. Знаходимо напруження на границі пружної та пластичної зони;

$$\sigma_z = \sigma_1 = \frac{B + \sqrt{B^2 + 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A}, \text{ МПа}; \quad (1.5)$$

$$\text{де: } \begin{cases} A = \sin(\varphi) \cdot (3 - \sin(\varphi)) \\ B = 3 \cdot c \cdot \cos(\varphi) - 2,5 \cdot c \cdot \sin(2\varphi) + \gamma_{zp} \cdot h \cdot (1 + \sin(\varphi)); \\ C = [\gamma_{zp} \cdot h(1 + \sin(\varphi)) + 4 \cdot c \cdot \cos(\varphi)] \cdot c \cdot \cos(\varphi) \end{cases}$$

γ_{zp} – питома сила тяжіння ґрунту, МН/м³; h – глибина проколу, м;
 c – коефіцієнт зчеплення ґрунту, МПа.

4. Відношення розміру пластичної (зруйнованої) зони (D_p) до діаметра проколу (d_n) дорівнює ($D_p = \lambda \cdot d_n$)

$$\frac{D_p}{d_n} = \frac{\left(\gamma_{zp} \cdot h + \frac{c}{\operatorname{tg}(\varphi)} \right) \cdot \operatorname{tg}^4 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)}{\sigma_1} = \lambda; \quad (1.6)$$

В подальшому визначаємо:

5. Контактний тиск ґрунту на циліндричну частину пристрою

$$q_u = \frac{D_p}{d_n} \sigma_1, \text{ МПа}; \quad (1.7)$$

Таблиця 1.2

Характеристика талих ґрунтів

Тип ґрунту	Коефіцієнт консистен- ції, B_k	Коефіцієнт зчеплення, c , МПа	Кут внутріш- нього тертя, φ_0 , град.	Кут зовніш- нього тертя, φ , град.	Питома вага ґрунту у природному стані, $\gamma_{пр}$, кН/м^3	Несуча спромож- ність ґрунту, $q_{БР}$, МПа	Кількість ударів щільноміра $S_{уд}$ (категорія)
Супісок твердий	$B_k < 0$	0,02	28	25	20,5	0,37	5...8(II)
Суглинок напівтвердий	$0 < B_k < 0,25$	0,04	23	21	21,0	0,55	5...8(II)
Глина тугопластична	$0,25 < B_k < 0,5$	0,04	18	22	20,5	0,48	5...8(II)
Суглинок твердий	$B_k < 0$	0,06	25	21	21,5	0,85	9...16(III)
Глина напівтверда	$0 < B_k < 0,25$	0,06	20	22	21,0	0,73	13...18(III з переходом на IV)
Глина тверда	$B_k < 0$	0,1	22	22	22,0	1,25	23...29(IV)

6. Необхідну мінімальну довжину контакту задньої фіксуючої камери ПРП з ґрунтом

$$l \geq \frac{W_1}{\pi \cdot d_n \cdot q_y \cdot \operatorname{tg}(\varphi)}, \text{ м}; \quad (1.8)$$

7. З урахуванням динамічного опору проколу довжина контакту з ґрунтом еластичної оболонки задньої фіксуючої камери вибирається із графіків (рис. 1.2).

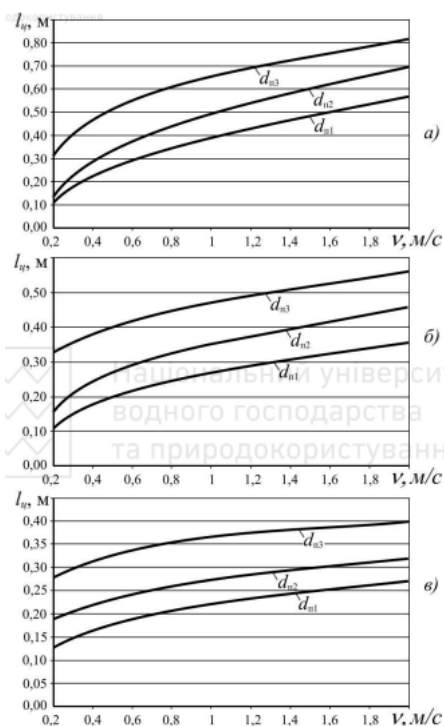


Рисунок 1.2 – Залежність необхідної довжини l_y контакту з ґрунтом еластичної оболонки задньої фіксуючої камери ПРП від швидкості переміщення носової частини при утворенні порожнин діаметрами $d_{n1}=0,1\text{м}$, $d_{n2}=0,2\text{м}$ та $d_{n3}=0,35\text{м}$; в твердому супіску (а), напівтвердому суглинку (б) та тугопластичній глині (в).

8. Якщо діаметр циліндричної частини корпусу ґрунтопроколюючого пристрою є незмінним і дорівнює (d_n), то на циліндричній частині в процесі переміщення пристрою буде виникати опір від сил тертя

$$P_y = W_y = 0,314 \cdot \lambda \cdot f \cdot d_n \cdot \sigma_1 + \pi \cdot f \cdot d_n (l_y - 0,2) \cdot q_3, \text{ МН}; \quad (1.9)$$

де: q_3 – залишковий тиск на циліндричній частині пристрою ($q_3 = 0,016 \dots 0,035$ МПа); l_y – довжина циліндричної частини пристрою.

9. Мінімальна довжина бічної циліндричної поверхні ґрунтопроколюючого пристрою визначається із умови компенсації реакції віддачі зусилля проколювання силами тертя ґрунту на бічній поверхні пристрою ($F_{mp} > P_{np}$) (для саморухомих динамічних пристроїв із внутрішнім підведенням енергії)

$$l_y > \frac{E_{zp} d_n}{8 f q_3} (1 + f \cdot \text{ctg}(\beta)) - \frac{0,1 \lambda \delta_1}{q_3} + 0,2, \text{ м}; \quad (1.10)$$

10. Середня щільність ґрунту в бічній стінці свердловини товщиною $(D_p - d_n)/2$ визначається як

$$\rho_{cm} = \frac{\rho_{np}}{1 - \left(\frac{1}{\lambda^2} \right)}; \quad (1.11)$$

11. Необхідне натискне зусилля гідродомкратів дорівнює

$$P_{\Sigma} = P_{np} + P_y + \frac{q_{mp} \cdot L \cdot f \cdot g}{10^6}, \text{ МН}; \quad (1.12)$$

де: q_{mp} – маса 1 п. м. труби, кг; L – довжина проколу, м.

Практична робота № 2 (4 год)

Тема: Дослідження лобового опору проколювання при одночасному прокладанні лінійно – протяжних об'єктів (ЛПО).

1. Конусно-циліндричний робочий орган для одночасного прокладання декількох лінійно-протяжних об'єктів (рис.2.1).

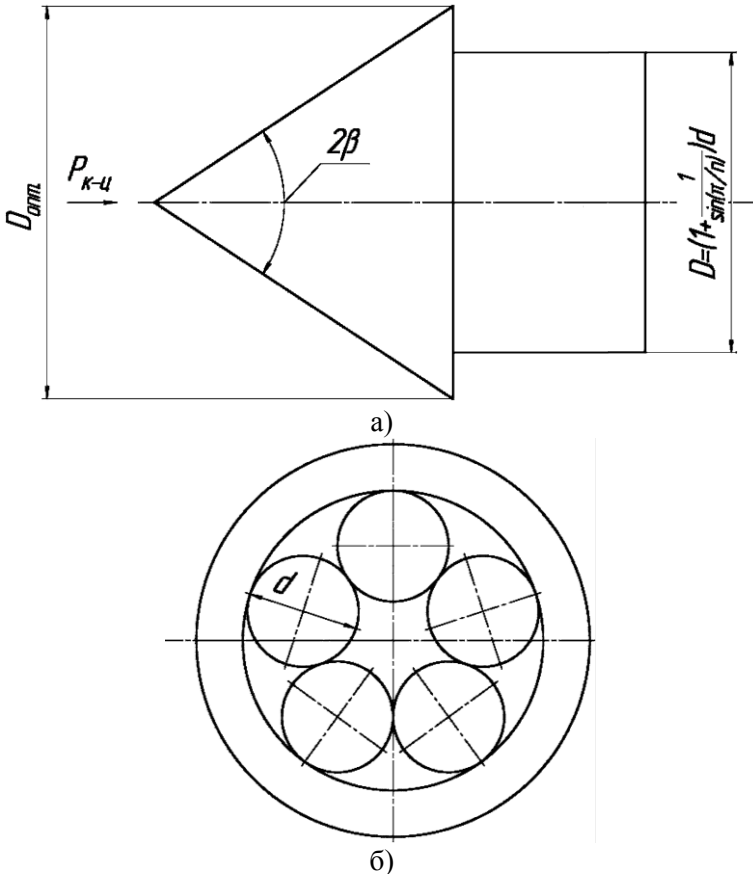


Рисунок 2.1 – Конусно-циліндричний з виступами робочий орган (наконечник), для проколювання ЛПО з виступами
а) вигляд з боку; б) вигляд з заду.

$$P_{ки} = \frac{\pi}{8} \left[\left(1 + \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} \right) d \right]^2 \cdot E_{zp} (1 + f \cdot \operatorname{ctg}(\beta)); \quad (2.1)$$

де : n – кількість одночасно - прокладаємих ЛПО (комунікацій),
 d – діаметр одночасно - прокладених комунікацій; E_{zp} –
 компресійний модуль, який визначається в компресійних
 приладах в умовах одновісного ступеневого навантаження без
 можливості поперечного розширення ґрунту (див. формулу
 (1.4)); f – коефіцієнт зовнішнього тертя ґрунту; 2β – кут при
 вершині конуса ($2\beta = 45^\circ \dots 50^\circ$).

2. Конусно-циліндричний робочий орган з виступами.
 Сумарний опір проколювання складається із опорів конусної і
 циліндричної частин наконечника. Щоб усунути із процесу
 статичного проколювання сили тертя на бічній циліндричній
 поверхні наконечника, необхідно діаметр конусної частини
 виконати більшим за діаметр (D) циліндричної частини. При
 цьому існує оптимальний діаметр (D_{onm}), який дозволяє
 максимально знизити сумарний опір переміщенню наконечника.

$$D_{onm} = 4 \cdot f \cdot \frac{0,1 \cdot \lambda \cdot \sigma_1 + (l_y - 0,2) \cdot q_3}{\left[\left(1 + \frac{\sigma_1}{E_v} \right)^2 - 1 \right] E_{zp} (1 + f \cdot \operatorname{ctg}(\beta))}; \quad (2.2)$$

де: E_v – модуль об'ємної деформації

$$E_v = \frac{(1 + \omega) \rho_{m\varphi}}{3 \cdot c_k \cdot \rho_{np}} (1 + 2\xi); \quad (2.3)$$

де: ξ – коефіцієнт бічного тиску (для пісків – $\xi = 0,4 \dots 0,5$; для
 суглинків $\xi = 0,5 \dots 0,6$; для глини – $\xi = 0,6 \dots 0,7$)

Опір проколювання дорівнює

$$P_{K-Ц} = \frac{\pi D_{onm}^2}{8} E_{cp} (1 + f \cdot \operatorname{ctg}(\beta)); \quad (2.4)$$

Порівняти чисельні значення вираховані по формулі (2.4) і по (1.12) без останньої складової.

3. Клиново-призматичний робочий орган для проколювання ґрунту та одночасного прокладання декількох лінійно-протяжних об'єктів (рис.2.2)

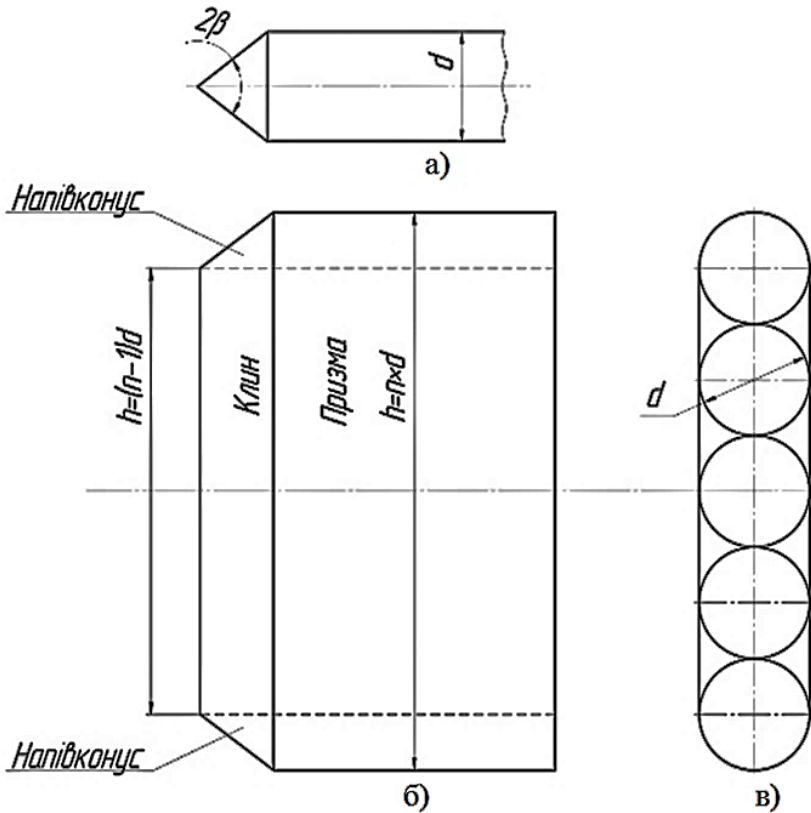


Рисунок 2.2 – Схема клиново-призматичного робочого органу для прокладання ЛПО: а) вигляд зверху; б) вигляд збоку; в) розміщення ЛПО по висоті призми.

$$P_{K-II} = \frac{\pi + 4(n-1)}{8} E_{zp} \cdot d^2 (1 + f \cdot \operatorname{ctg}(\beta)), \text{ МПа}; \quad (2.5)$$

Необхідно побудувати залежності (P_{K-II}) і (P_{K-II}) від (d) і (n) для заданого типу ґрунту. Вихідні дані ґрунтів приведені у (табл. 1.2). Природна вологість ґрунтів : твердий супісок і твердий суглинок – ($\omega=10\ldots14\%$), напівтвердий суглинок і напівтверда глина – ($\omega=17\ldots20\%$), тугопластична глина – ($\omega=25\ldots30\%$).

Практична робота № 3 (4 год)

Тема: Методика інженерного розрахунку пневмоударних пробійників.

Вихідними даними для розрахунку є: діаметр свердловини (D), довжина свердловини (проходки) (L_{cv}) і фізико-механічні властивості ґрунту.

Вихідними даними також можуть служити характеристики гідропривода будівельно-дорожніх машин як джерела енергії віброударних пробійників: робочий тиск у гідросистемі (p_n , МПа) і встановлена потужність двигуна (N , кВт), ступінь стиснення газу у камері робочого ходу (ε) і коефіцієнт керуючої дії (u).

При розрахунку параметрів пробійника користуються коефіцієнтом тертя корпусу по стінках свердловини (f), значеннями нормального тиску на бічну поверхню корпусу пробійника (q_u , МПа), питомою енергією одиничного удару, яка приходить на одиницю площі поперечного перерізу свердловини (a).

Додатково необхідно врахувати обмеження максимальної швидкості бійка у момент удару по корпусу ($\mathcal{J}$, м/с), тиск зарядки камери робочого ходу (P_n , МПа).

Послідовність розрахунку параметрів відповідно до варіанту (табл. 2.1) наступна. Визначається:

1. Сила лобового опору є функцією швидкості прикладання навантаження.

$$P_l = P_{nit} \cdot \frac{\pi D^2}{4}; \quad (3.1)$$

де: P_{nit} – питомий лобовий опір.

Таблиця 3.1

Варіанти завдань для практичної роботи №3

Варіанти	Довжина свердловини $L_{св}$, м	Діаметр свердловини D , м	Швидкість динамічного навантаження ґрунту $\mathcal{G}$, м/с	Варіанти	Довжина свердловини $L_{св}$, м	Діаметр свердловини D , м	Швидкість динамічного навантаження ґрунту $\mathcal{G}$, м/с
1	5	0,13	5	16	30	0,21	6,5
2	10	0,15	6	17	35	0,23	7
3	15	0,17	6,5	18	40	0,25	7,5
4	20	0,19	7	19	45	0,27	8
5	25	0,21	7,5	20	50	0,29	5
6	30	0,23	8	21	5	0,31	6
7	35	0,25	5	22	10	0,33	6,5
8	40	0,27	6	23	15	0,13	7
9	45	0,29	6,5	24	20	0,15	7,5
10	50	0,31	7	25	25	0,17	8
11	5	0,33	7,5	26	30	0,19	5
12	10	0,13	8	27	35	0,21	6
13	15	0,15	5	28	40	0,23	6,5
14	20	0,17	5	29	45	0,25	7
15	25	0,19	6	30	50	0,27	7,5

Питомий опір вибирається із (рис. 3.1).

2. Довжина корпусу залежить від фізико-механічних властивостей ґрунту

$$L_k \geq \frac{P_l}{\pi \cdot D \cdot q_u \cdot f}, \text{ м}; \quad (3.2)$$

де: q_u – нормальний тиск ґрунту на циліндричну частину корпусу пробійника (для $D = 0,13$ м, $q_u = 23 \cdot 10^3$ Па; для $D =$

0,19 м, $q_u = 27 \cdot 10^3$ Па; для $D = 0,245$ м, $q_u = 29 \cdot 10^3$ Па; для $D = 0,325$ м, $q_u = 31 \cdot 10^3$ Па); f – коефіцієнт зовнішнього тертя (для $D = 0,13$ м, $f = 0,625$; для $D = 0,19$ м, $f = 0,57$; для $D = 0,245$ м, $f = 0,53$; для $D = 0,325$ м, $f = 0,477$). Значення q_u і f приведені на (рис. 3.2).

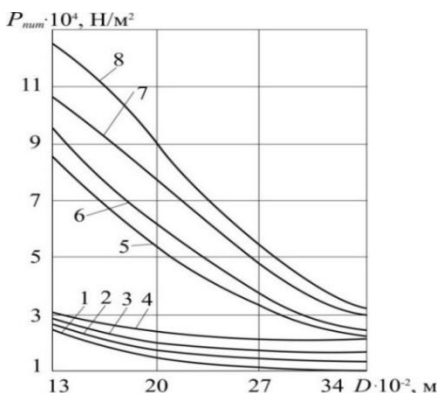


Рисунок 3.1 – Залежність питомого лобового опору P_{nut} від діаметра свердловини D : 1...4 – при статичному навантаженні; 5...8 – при динамічному навантаженні; 1...4 – відповідно для $v = (2, 3, 4, 5) \cdot 10^{-3}$ м/с; 5...8 – відповідно для $v = 5, 6, 7$ і 8 м/с.

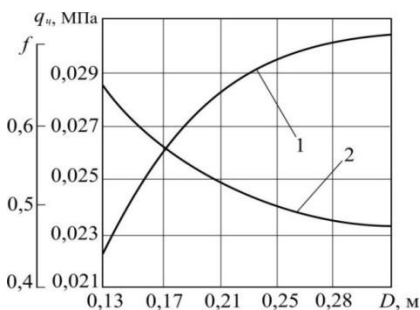


Рисунок 3.2 – Залежності нормального тиску ґрунту q_u і коефіцієнта тертя f від діаметра свердловини: 1 – для q_u ; 2 – для f .

3. Сила бічного опору залежно від довжини корпусу та фізико-механічних властивостей ґрунту.

$$P_{бок} = \pi \cdot D \cdot L_k \cdot q_u \cdot f, \text{ Н}; \quad (3.3)$$

4. Реакція віддачі не повинна перевищувати сили бічного опору

$$R_m \leq P_{бок}; \quad (3.4)$$

За реакцією (R_m) підбирається робочий тиск у системі (рис. 3.3)

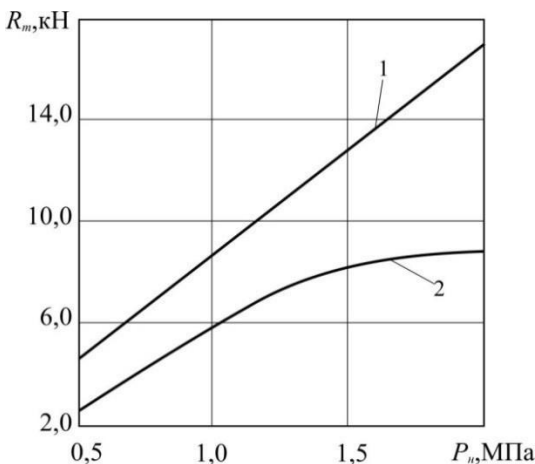


Рисунок 3.3 – Залежності реакції віддачі ударного механізму від робочого тиску у системі: 1 – аналітична; 2 – експериментальна.

5. Енергія одиничного удару визначається із умови забезпечення раціональної питомої енергії (a), яка витрачається на одиницю площі поперечного перерізу свердловини:

$$A = a \frac{\pi D^2}{4n}, \text{ Дж}; \quad (3.5)$$

де: n – частота ударів, с^{-1} .

Величини (a) і (n) визначаються відповідно до (рис. 3.4 і 3.5).

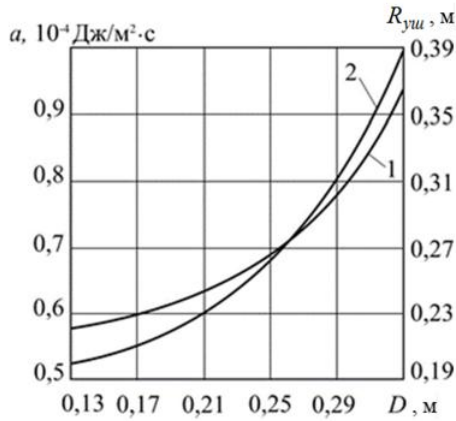


Рисунок 3.4 – Залежність питомої енергії удару a (крива 1) і радіуса ущільнення R_{ush} (крива 2) від діаметра свердловини D

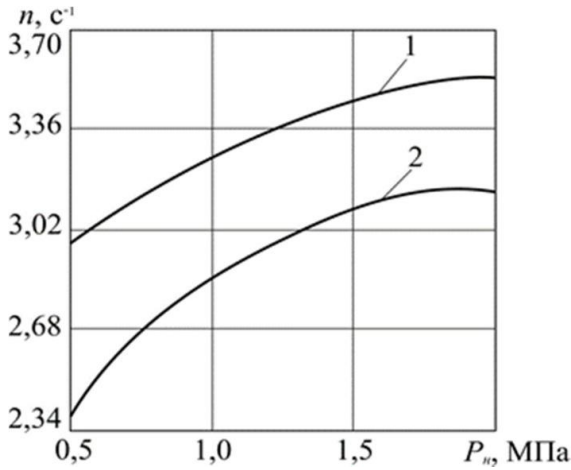


Рисунок 3.5 – Залежність частоти ударів a від робочого тиску у системі P_n : 1 – аналітична; 2 – експериментальна

7. Робочий хід бійка визначається заданою реакцією віддачі для конкретного значення енергії удару:

$$l_p = \frac{2A \cdot \varepsilon}{R_e \cdot e^{-a \cdot L} (\varepsilon - 1)}; \quad (3.7)$$

де: L – довжина трубопроводу, що підводить енергію; a – коефіцієнт, який характеризує інтенсивність зниження удару із збільшенням довжини трубопроводу і залежить від його діаметра d (для $d=12$ мм, $a=0,008$; для $d=16$ мм, $a=0,01$; для $d=20$ мм, $a=0,013$; для $d=25$ мм, $a=0,016$). Коефіцієнт корисної дії ударного механізму має найбільше значення для ($\varepsilon=1,3 \dots 1,7$).

8. Шлях розгону бійка при зворотному ході дорівнює:

$$l_1 = (0,78 \dots 0,83) l_p; \quad (3.8)$$

9. Активна площа камери робочого ходу визначається граничною реакцією віддачі і тиском робочого тіла:

$$S_{p.x.} = \frac{R_m \cdot e^{-a \cdot L}}{\varepsilon \cdot P_H \cdot 10^6}, \text{ м}; \quad (3.9)$$

де: P_1 – тиск у камері робочого ходу, МПа.

10. Активна площа камери зворотного ходу обмежується коефіцієнтом керованої дії і робочим тиском привода:

$$S_{зв.x.} = \frac{u \cdot R_m \cdot e^{-a \cdot L}}{(0,74 \dots 0,78) P_H \cdot 10^6}, \text{ м}^2; \quad (3.10)$$

де: u – коефіцієнт активних сил ($u=1,1 \dots 1,3$); P_H – робочий тиск в системі, МПа, ($P_H=1 \dots 3$).

11. Активна площа зливної камери для забезпечення повного переливу робочої рідини із камери зворотного ходу:

$$S_{зл} = S_{зв.x.}; \quad (3.11)$$

12. Необхідна продуктивність гідронасоса:

$$Q_H = \frac{\nu \cdot R_m \cdot e^{-a \cdot L}}{P_H \cdot 10^6}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (3.12)$$

13.Робочий об'єм гідравлічної порожнини пневмогідравлічного акумулятора дорівнює:

$$V_{ак} = \frac{2Ai\varepsilon}{P_n \cdot 10^6 (\varepsilon - 1) \mu_p} \left\{ \frac{\left((1 + \mu_p) \cdot \left[(\varepsilon u + \mu_p)^2 \cdot (1 + \mu_p) + (\varepsilon^2 - 1) \mu_p \right] - (1 + \mu_p) \cdot (\varepsilon u + \mu_p) \right)}{\dots} \right\}; \quad (3.13)$$

де: μ_p – коефіцієнт приведеної маси робочої рідини (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Значення коефіцієнта приведеної маси, μ_p

Діаметр трубопроводу, d , мм	Довжина трубопроводу L_{mp} , м				
	10	20	30	40	50
12	6,55	13,1	19,65	26,2	32,75
16	3,68	7,36	11,04	14,72	18,4
20	2,35	4,7	7,05	9,4	11,75
25	1,47	2,94	4,41	5,88	7,35

14.Маса золотника визначається величиною втрат енергії на керування:

$$m_3 = 0,02m_0 \quad (3.14)$$

15.Зусилля, яке діє на золотник зі сторони камери керування:

$$K_p = 0,04R_m \cdot e^{-a \cdot L} \quad (3.15)$$

16.Діаметр золотника визначається необхідним зусиллям зі сторони камери керування і тиском гідроприводу:

$$d = \sqrt{\frac{0,16R_m \cdot e^{-a \cdot L}}{\pi(0,74...0,78)P_n \cdot 10^6}}, \text{ м}; \quad (3.16)$$

17.Робочий хід золотника: $l_3 = 0,4l_p$.

18.Жорсткість пружного елемента:

$$K_c = \frac{0,1 \cdot R_m \cdot e^{-a \cdot L} (\varepsilon - 1)}{\varepsilon \cdot l_p}; \quad (3.17)$$

19.Зусилля поперечного стискання пружного елемента:

$$K_F = 0,024 \cdot R_m \cdot e^{-a \cdot L}; \quad (3.18)$$

На основі отриманих параметрів ударного механізму і органа керування визначаються техніко-економічні показники ударного пристрою і гідропробійника в цілому.

20.Частота ударів бійка за хвилину:

$$n_{x\delta} = 60 \cdot n_0 \cdot e^{-a \cdot L}; \quad (3.19)$$

де: n_0 – максимальна частота ударів бійка при $L = 0$ (див. рис. 3.2).

21.Ударна потужність:

$$N_{y\delta} = \frac{A \cdot n_{x\delta}}{60}; \quad (3.20)$$

22.Необхідна потужність приводу:

$$N_{np} = \frac{N_{y\delta}}{\eta_{np}}; \quad (3.21)$$

де: η_{np} – к. к. д. приводу.

23.Швидкість проходки свердловини:

$$v_{np} = 0,007 \left(1 - e^{-0,09 \frac{A+7,1}{6,2}} \right), \text{ м/с}; \quad (3.22)$$

24.Час проходки свердловини:

$$T_{np} = \frac{L_{cs}}{3600 \cdot v_{np}}, \text{ год.}; \quad (3.23)$$

Практична робота № 4

Тема: Розрахунок напірного зусилля для продавлювання кільцевидного наконечника труб.

Таблиця 4.1

Варіанти завдань для практичної роботи №4

Варі- анти	Зовнішній діаметр D, м	Варі- анти	Зовнішній діаметр D, м	Варі- анти	Зовнішній діаметр D, м
1	0,23	11	0,33	21	0,43
2	0,24	12	0,34	22	0,44
3	0,25	13	0,35	23	0,45
4	0,26	14	0,36	24	0,46
5	0,27	15	0,37	25	0,47
6	0,28	16	0,38	26	0,48
7	0,29	17	0,39	27	0,49
8	0,30	18	0,40	28	0,50
9	0,31	19	0,41	29	0,51
10	0,32	20	0,42	30	0,52

Напірне зусилля (рис.4.1) формується із сил опору проникнення конусної частини кільцевидного наконечника (W_k), опорів по зовнішній (W'_u) і внутрішній (W''_u) циліндричних поверхнях інструмента, а також із опору сили тертя керн по трубі (W_{kp}). Розрахункова схема взаємодії кільцевидного наконечника з ґрунтом представлена на (рис. 4.1.)

На зовнішню поверхню інструмента діє нормальний тиск від стінок свердловини (q'_u), на внутрішню – нормальний тиск від керн (q''_u). На лінії переходу циліндричних поверхонь інструмента на зовнішній і внутрішній конуси на останні відповідно діє нормальний тиск (q'_k) і (q''_k) пропорційний куту загострення інструмента α ($2\alpha = 45^\circ \dots 50^\circ$).

Залежність нормального тиску і коефіцієнта тертя ґрунту на циліндричну частину наконечника наведені на (рис. 4.2).

Для розрахунків у першому наближенні можна прийняти:
 $q'_{\text{ц}} = q''_{\text{ц}} = q_{\text{ц}}$

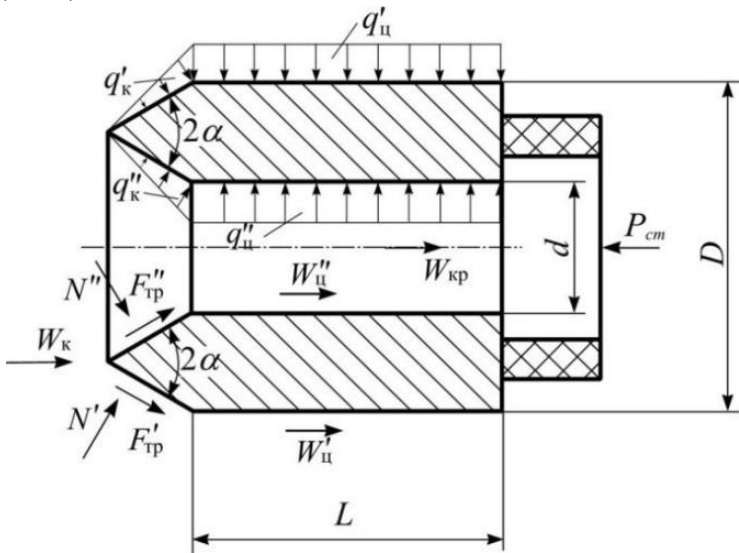


Рисунок 4.1 – Схема дії сил на кільцевидний наконечник.

1. Тиск на конусі:

$$q'_{\text{к}} = q'_{\text{ц}} \cdot \text{tg}(\alpha); q''_{\text{к}} = q''_{\text{ц}} \cdot \text{tg}(\alpha); \quad (4.1)$$

Тоді:

$$q'_{\text{к.ср}} = \frac{q'_{\text{ц}}}{2} \cdot \text{tg}(\alpha); q''_{\text{к.ср}} = \frac{q''_{\text{ц}}}{2} \cdot \text{tg}(\alpha); \quad (4.2)$$

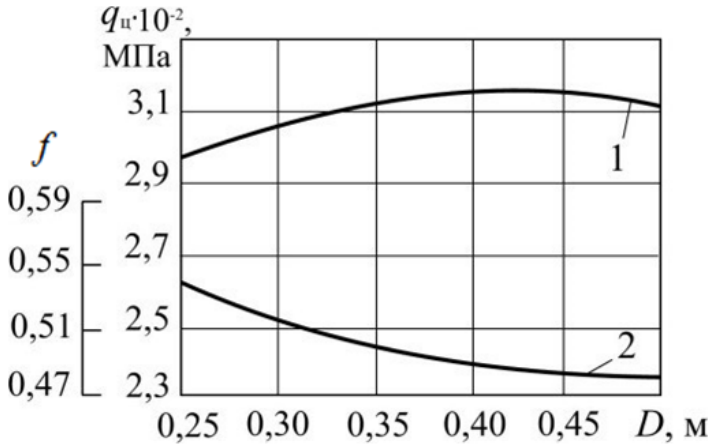


Рисунок 4.2. – Залежність нормального тиску ґрунту і коефіцієнта тертя на циліндричній частині наконечника від діаметра свердловини: 1) – $q_u = f(D)$; 2) – $f = f(D)$

2. Бічні площі зрізаних конусів дорівнюють:
зовнішнього:

$$S' = \frac{\pi}{16} (3D + d) \cdot (D - d) \cdot \frac{1}{\sin(\alpha/2)}; \quad (4.3)$$

внутрішнього:

$$S'' = \frac{\pi}{16} (3d + D) \cdot (D - d) \cdot \frac{1}{\sin(\alpha/2)} \quad (4.4)$$

де: D і d – відповідно, зовнішній і внутрішній діаметри кільцеподібного наконечника.

3. Нормальні реакції (N' , N'') і сили тертя (F'_{mp} , F''_{mp}), які діють на зовнішній і внутрішній конуси наконечника:

$$N' = q'_{к.ср} \cdot S' = \frac{\pi}{32} (3D + d) \cdot (D - d) \cdot \frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\sin(\alpha/2)} \cdot q'_u; \quad (4.5)$$

$$N'' = q''_{к.ср} \cdot S'' = \frac{\pi}{32} (3d + D) \cdot (D - d) \cdot \frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\sin(\alpha/2)} \cdot q''_u; \quad (4.6)$$

$$F'_{mp,\kappa} = f \cdot q'_{\kappa.cp} \cdot S' = f \cdot \frac{\pi}{32} (3D + d) \cdot (D - d) \cdot \frac{tg(\alpha)}{\sin(\alpha/2)} \cdot q'_u; \quad (4.7)$$

$$F''_{mp,\kappa} = f \cdot q''_{\kappa.cp} \cdot S'' = f \cdot \frac{\pi}{32} (3d + D) \cdot (D - d) \cdot \frac{tg(\alpha)}{\sin(\alpha/2)} \cdot q''_u; \quad (4.8)$$

де: f – коефіцієнт зовнішнього тертя ґрунту.

4. Опір конусній частині наконечника:

$$\begin{aligned} W_{\kappa} &= (N' + N'') \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + (F'_{mp} + F''_{mp}) \cdot \cos \left(\frac{\alpha}{2} \right) = \\ &= \frac{\pi}{32} (D - d) \cdot tg(\alpha) \cdot [(3D + d) \cdot q'_u + (3d + D) \cdot q''_u] \cdot \\ &\quad \cdot \left(1 + f \cdot ctg \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right); \end{aligned} \quad (4.9)$$

5. Нормальний тиск (q'_u) і (q''_u) створюють на зовнішній і внутрішній поверхнях інструмента сили тертя:

$$F'_{mp,u} = \pi \cdot D \cdot L \cdot q'_u \cdot f; F''_{mp,u} = \pi \cdot d \cdot L \cdot q''_u \cdot f; \quad (4.10)$$

6. Крім визначених сил, опір створює сила тертя керна всередині труби:

$$F_{mp} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L_{np} \cdot \gamma_{kp} \cdot f; \quad (4.11)$$

де: L_{np} – довжина проходки $L_{np}=10$ м; γ_{kp} – питома сила тяжіння керна.

7. Щільність ґрунту у керні апроксимована залежністю:

$$\gamma_{kp} = a \cdot D^2 - b \cdot d + c; \quad (4.12)$$

де: $a=16 \cdot 10^3$ кг/м³; $b=21 \cdot 10^2$ кг/м⁴; $c=0,38 \cdot 10^3$ кг/м³.

8. Таким чином, статичне зусилля для проникнення кільцеподібного наконечника труб дорівнює:

$$P_{cm} = \frac{\pi}{32} (D-d) \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot [(3D+d) \cdot q'_{\psi} + (3d+D) \cdot q''_{\psi}] \cdot (1 + f \cdot \operatorname{ctg}(\alpha/2)) + \pi \cdot L \cdot f \cdot (D \cdot q'_{\psi} + d \cdot q''_{\psi}) + \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L_{np} \cdot \gamma_{кр} \cdot f ; \quad (4.13)$$

9. У випадку динамічного прикладання наванта-ження до інструмента кільцеподібного перерізу:

$$P_o = (2,58 \dots 2,96) \cdot P_{cm} ; \quad (4.14)$$

Отриманий вираз (4.13) показує, що статичне зусилля (P_{cm}) у значній мірі залежить від співвідношення діаметрів кільцеподібного наконечника ($K_d = D/d$) і тиску ґрунту на інструмент (q'_{ψ}) і (q''_{ψ}), які визначені експериментально.

Практична робота № 5

Тема : Визначення параметрів кільцевидного наконечника для утворення підземних свердловин комбінованим способом (ущільненням ґрунту зовні та всередині кільцевидного наконечника).

Розміри кільцевого наконечника показані на (рис. 5.1.)

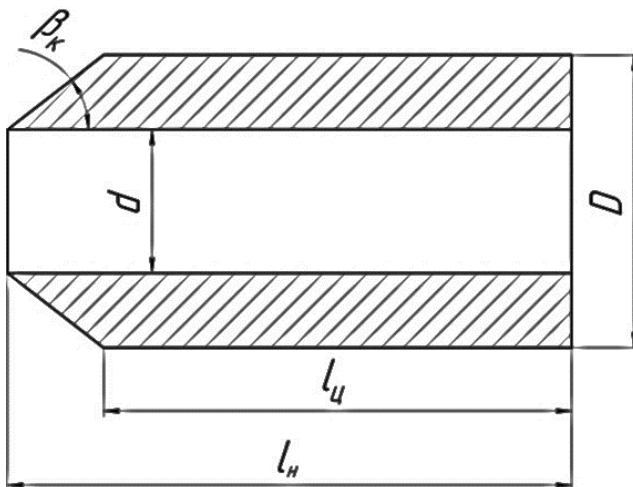


Рисунок 5.1 – Схема одноконусного наконечника із зовнішнім конусом

Послідовність визначення параметрів наступна:

1. Визначаємо відстань, на яку розповсюджуються руйнівні деформації в ґрунті:

$$D_p = D \sqrt{\lambda^2 - \left(\lambda^2 - 1 \right) \left(\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2}; \quad (5.1)$$

де: $\gamma = D/d$; λ – визначається по залежності (1.6).

2. Вибираємо максимальну довжину кільцевого наконечника (l_n), яка визначається довжиною утворюваного ґрунтового керна (рис. 5.2)

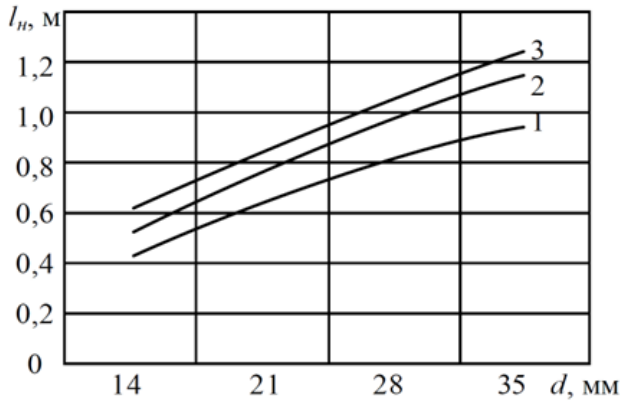


Рисунок 5.2 – Залежності максимальної довжини наконечника від його внутрішнього діаметру: 1- для твердого суглинку; 2 – для напівтвердого суглинку; 3 – для тугопластичної глини.

3. Кількість циклів, яка необхідна для екскавації ґрунту на зовні із трубчастої частини наконечника на довжині проходки ($L_{св}$) визначається довжиною утворюваного керна ($l_k = l_n$):

$$n_{ц} = \frac{L_{св}}{l_k}; \quad (5.2)$$

4. Визначаємо необхідне зусилля продавлювання наконечника кільцевидної конструкції для комбінованого способу із зовнішнім конусом:

$$P_{\Sigma} = \pi \cdot E_{cp} (1 + f \cdot \operatorname{ctg}(\beta_k)) \left[\frac{3\gamma^2 - 2\gamma - 1}{16} - \frac{\gamma^2 - 2\gamma - 1}{16 \left[1 - \left(\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2 \right]} - \frac{\frac{(\gamma + 1)^4}{\gamma^2}}{128 \left[1 - \left(\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2 \right]} - \frac{D^2}{\gamma^2} + \right. \\ \left. + \frac{\pi D^2}{4\gamma^2} q_{kp} \left(1 - \frac{1}{e^{(4 f \xi l_n \gamma)/D}} \right) + \pi D \sigma_1 f l_n \right]; \quad (5.3)$$

де: q_{kp} – несуча спроможність ґрунту (див. табл. 1.2).

ξ – коефіцієнт бічного тиску (див. формулу (2.3)).

Практична робота № 6

Тема : Визначення параметрів та величини поперечного відхилення від повздовжньої осі руху циліндричного наконечника зі зрізаною лобовою площиною. (рис. 6.1).

Послідовність визначення параметрів і величини відхилення наступна:

1. Визначаємо кут нахилу лобової площини наконечника до горизонту із умови руху ґрунту по цій площині:

$$\beta < \arcsin \sqrt{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \left(\frac{f}{1 + f^2} \right)^2}}; \quad (6.1)$$

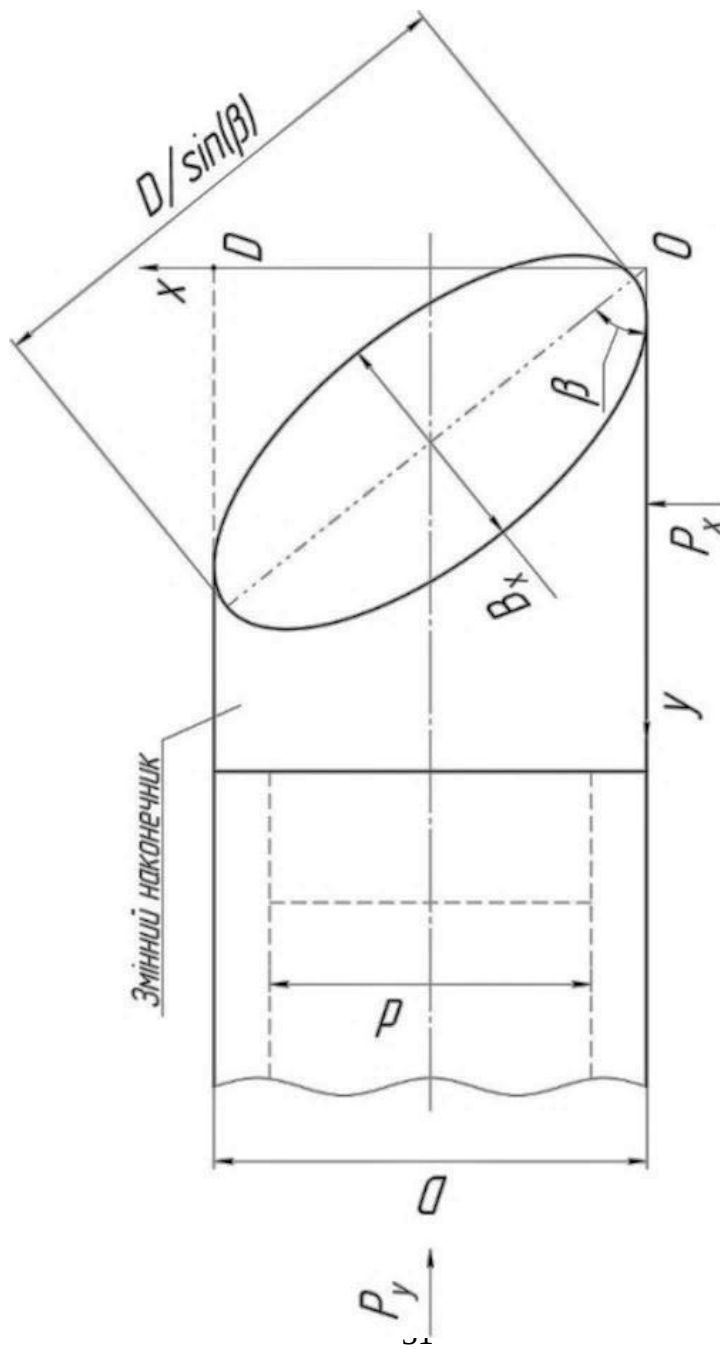


Рисунок 6.1 – Схема циліндричного наконечника із похилою еліптичною площиною

2. Визначаємо кут нахилу лобової площини наконечника до горизонту із умови міцності матеріалу штанги на згин:

$$\beta \geq \arccos \left(f + \frac{8W[\sigma_{32}] - qL_{\min}^2}{1,44E_{zp}D^2L_{\min}} \right); \quad (6.2)$$

де: $f = \tan(\varphi)$ – коефіцієнт зовнішнього тертя ґрунту (φ – кут зовнішнього тертя ґрунту); W – статичний момент перерізу трубчастої штанги з внутрішнім і зовнішнім діаметрами відповідно d і D

$$W = \frac{\pi D^3 \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right)}{32}; \quad (6.3)$$

$[\sigma_{32}]$ – гранично допустимі напруження матеріалу штовхаючих штанг на згин, МПа (для сталі $[\sigma_{32}] = 3 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2 = 3 \cdot 10^2 \text{ МПа}$); q – погонна сила тяжіння штовхаючих штанг (для штанг $D = 0,005 \dots 0,1 \text{ м}$; $q = 65 \dots 120 \text{ Н/м}$); E_{zp} – компресійний модуль деформації ґрунту, МПа (для твердого супіску $E_{zp} = 1,39 \text{ МПа}$; для напівтвердого суглинку – $E_{zp} = 0,892 \text{ МПа}$; для тугопластичної глини $E_{zp} = 0,631 \text{ МПа}$; для інших ґрунтів вираховується по залежності (1.4)): $L_{\min}$ – мінімальна довжина лінії прогину штанги або мінімальна довжина ділянки корекції траєкторії, м.

$$L_{\min} \approx 2\sqrt{R_{\min}}; \quad (6.4)$$

де: $R_{\min}$ – мінімальний гранично допустимий радіус згину штанг, м:

$$R_{\min} = \frac{E_{zp}D}{2[\sigma_{32}]}; \quad (6.5)$$

де: E_{zp} – модуль пружності матеріалу штанг при згині, МПа (для сталі – $E = 21 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2 = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$)

3. Визначаємо основу та поперечну сили, що діють на наконечник (див. рис. 6.1).

$$P_y = 0,36E_{zp} \left[(1 - f^2) + 2f \cdot \operatorname{ctg}(\beta) \right] \cdot D^2; \quad (6.7)$$

$$P_x = 0,36E_{zp} (\operatorname{ctg}(\beta) - f) \cdot D^2; \quad (6.8)$$

4. Виразуємо поперечне відхилення циліндричного наконечника зі зрізаною еліптичною площиною в залежності від довжини пройденого шляху (L).

$$S = \frac{0,9E_{zp}(1 - f \cdot \operatorname{tg}(\beta))}{E_{3z} \cdot D^3 \frac{\gamma^4 - 1}{\gamma^4} \beta_n^3} L; \quad (6.9)$$

де: $\gamma = D/d$

$$\beta_n = 4 \sqrt{\frac{k_n}{4E_{3z} \cdot I}}; \quad (6.10)$$

де : k_n – коефіцієнт постілі (основи) (для ґрунтів середньої щільності – $k_n = 5 \dots 50 \text{ Н/см}^2 = 0,05 \dots 0,5 \text{ МПа}$);

I – момент інерції кільцевого поперечного перерізу штанги:

$$I = 0,05D^4 \frac{\gamma^4 - 1}{\gamma^4}; \quad (6.11)$$

Практична робота № 7 (12 год)

Тема: Методика розрахунку параметрів проходження пілотної свердловини, її розширення та укладання трубопроводу.

Виконується відповідно до таблиці варіантів (табл. 7.1) і алгоритму розрахунку, що приведений у підручнику [3, п. 4.11]

Таблиця 7.1

Таблиця варіантів для практичної роботи № 7

Варіант	Тип ґрунту	Глибина проходки, Н, м	Діаметр бурового каналу, d, мм	Радіус вигину R, м	Довжина проходки, L, м	Діаметр розширювача $d_{рш}$, мм
1	Супісок твердий	1,00	60	31	20	250
2		1,05	70	33	25	300
3		1,10	80	36	30	350
4		1,15	90	39	35	400
5		1,20	100	42	40	450
6		1,25	110	45	45	500
7	Глина тугоплас- тична	1,00	120	48	50	550
8		1,05	60	51	55	600
9		1,10	70	54	60	650
10		1,15	80	57	65	700
11		1,20	90	60	70	250
12		1,25	100	63	75	300
13	Супісок твердий	1,00	110	66	20	350
14		1,05	120	69	25	400
15		1,10	60	72	30	450
16		1,15	70	31	35	500
17		1,20	80	33	40	550
18		1,25	90	36	45	600
19	Суглинок напівтвердий	1,00	100	39	50	650
20		1,05	110	42	55	700
21		1,10	120	45	60	250
22		1,15	60	48	65	300
23		1,20	70	51	70	350
24		1,25	80	54	75	400
25	Глина тугоплас- тична	1,00	90	57	20	450
26		1,05	100	60	25	500
27		1,10	110	63	30	550
28		1,15	120	66	35	600
29		1,20	60	69	40	650
30		1,25	70	72	45	700

Список використаної літератури

1. Кравець С. В., Косяк О. В. 02-01-433. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Наукові основи створення машин для прокладання підземних комунікацій». Рівне : НУВГП, 2018. 22 с.

URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/9654/1/02-01-433.pdf>

2. Кравець С. В. 02-01-547М. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Розробка нових алгоритмів для розрахунків та конструювання машин і обладнання». Рівне : НУВГП, 2023. 38 с.

URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/27629/1/02-01-547%D0%9C.pdf>

3. Машини для прокладання підземних комунікацій (наукові основи створення) : підручник / Кравець С. В., Нечидюк А. А., Косяк О. В.; за заг. ред. С .В Кравця. Рівне : НУВГП, 2018. 270 с.

URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/12061/>

4. Кравець С. В., Кованько В. В., Лук'янчук О. П. Наукові основи створення землерийно – ярусних машин та підземнорухомих пристроїв: монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 322 с.

URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/3203/>

5. Наукові основи та практика створення мінімальноенергоємних робочих органів для формування комунікаційних порожнин в ґрунті : монографія / С. В. Кравець, В. М. Супонев, О. П. Посмітюха, С. П. Балесний. Харків : ХНАДУ, 2021. 304 с.

URL: <https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/14460>