

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства
та природокористування

**С. В. Кравець,
О. П. Лук'янчук, А. А. Нечидюк**

**ГРУНТОЗАХИСНІ ТА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ
РОБОЧІ ПРОЦЕСИ ЗЕМЛЕРИЙНО-
ЯРУСНИХ МАШИН**

*За редакцією заслуженого діяча науки і техніки,
доктора технічних наук, професора С. В. Кравця*

Монографія

Рівне – 2024

УДК 624.132.002.51.001.24

К77

Рецензенти:

Ракиша С. В., доктор технічних наук, професор, професор Українського державного університету науки і технологій;

Супонєв В. М., доктор технічних наук, професор, професор Харківського національного автомобільно-дорожнього університету;

Шатов С. В., доктор технічних наук, доцент, професор Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.

Рекомендовано вченою радою Національного університету водного господарства та природокористування.

Протокол № 3 від 29 березня 2024 р.

Кравець С. В., Лук'янчук О. П., Нечидюк А. А.

К77 Грунтозахисні та енергозберігаючі робочі процеси землерийно-ярусних машин : монографія / за загальною редакцією С. В. Кравця. – Рівне : НУВГП, 2024. – 121 с.

ISBN 978-966-327-589-5

У монографії представлені практичні результати наукових досліджень кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин Національного університету водного господарства та природокористування з наукового напрямку теорії багатоярусної розробки ґрунтового середовища та створення ґрунтозахисних та енергозберігаючих землерийно-ярусних машин за період з 1982 р.

Рекомендується для науковців, аспірантів, магістрів та бакалаврів технічних спеціальностей.

УДК 624.132.002.51.001.24

ISBN 978-966-327-589-5

© С. В. Кравець, О. П. Лук'янчук,
А. А. Нечидюк, 2024

© Національний університет
водного господарства та
природокористування, 2024

ЗМІСТ

Вступ	5
Прийняті припущення і позначення	8
1. Визначення критичної глибини різання при поярусній розробці ґрунтового середовища	10
1.1. Визначення критичної глибини різання в блокованих і напівблокованих умовах	13
1.2. Визначення критичної глибини різання при комбінованому руйнуванні ґрунту	27
1.3. Визначення критичної глибини при асиметричному блокованому та напівблокованому різанні ґрунту	37
1.4. Суть наукового відкриття	48
2. Принципи створення багатоярусних робочих органів	51
2.1. Принцип незалежності роботи попередніх ґрунторозробних органів від наступних	52
2.2. Принцип рівності об'ємних витрат ґрунту в суміжних ярусах	53
2.3. Принцип рівності масових витрат ґрунту в суміжних ярусах	55
2.4. Принцип рівності площ поперечного перерізу зрізаного шару ґрунту і прохідних вікон	56
3. Розрахунок та конструкція багатоярусних робочих органів	60
3.1. Алгоритми розрахунку основних параметрів	60
3.2. Натурні зразки багатоярусних робочих органів	89

4. Апробація багатоярусних робочих органів	99
4.1. Польові випробування безтраншейного дреноукладача з традиційним одноярусним і двоярусними ножами	99
4.2. Виробничі випробування кабелеукладача з традиційним одноярусним і двоярусними ножами	102
4.3. Польові випробування багатоярусних безвідвальних землерийних робочих органів	104
4.4. Польові та виробничі випробування багатоярусних відвальних землерийних робочих органів	106
Висновки	117
Інформаційні джерела	118

ВСТУП

Зростаючі потреби народного господарства та прискорення науково-технічного прогресу потребують значного збільшення обсягів земляних робіт для будівництва підземних комунікацій з укладанням у підземні горизонти лінійно-протяжних об'єктів (ЛПО) будівельними розпушувачами, ланцюговими екскаваторами та укладачами пасивного типу. А ринкові умови розвитку передбачають необхідність зменшення матеріальних затрат на реалізацію ЛПО для транспортування води, газу, нафти та інших продуктів, передачі енергії, інформації та інше.

Досвід будівництва підземних комунікацій свідчить про наступне. По-перше, ЛПО, як правило, проходять через сільськогосподарські території, тому прагнуть скоротити протяжність та знизити вартість робіт з укладання цих комунікацій. По-друге, останнім часом все частіше виникає необхідність оперативного прокладання ЛПО, якщо роботи здійснюються в зонах радіаційного забруднення, а також для ліквідації наслідків екологічних катастроф та ін. Все це накладає додаткові вимоги на будівництво підземних комунікацій [1], а саме: – прокладання ЛПО має здійснюватися оперативно на всіх найбільш представницьких ґрунтах (I–III категорій) на швидкостях до 2–3 км/год із поєднанням операцій з розробки, розуцільнення ґрунту, укладання об'єктів та закриття щілини; – над прокладеними комунікаціями повинен зберігатися родючий шар ґрунту щільністю 1,1–1,4 г/см³ та пористістю 53–68% без необхідності подальшого проведення рекультиваційних робіт; роботи з прокладання ЛПО на

сільськогосподарських площах повинні проводитися в стислі терміни, в період міжсезоння між збиранням урожаю і наступною сівбою, з мінімальним техногенним впливом на ґрунт; – проведення робіт в екстремальних умовах необхідно здійснювати в найкоротші терміни і за мінімальної кількості обслуговуючого персоналу, що можливе лише за максимальної механізації та автоматизації робочих процесів. Незалежно від призначення та типу ЛПО їх заглиблення здійснюється одним із двох способів: траншейним або безтраншейним [1; 2].

Траншейним називається спосіб будівництва, при якому відкриту траншею викопують ланцюговими екскаваторами, ґрунт транспортують на денну поверхню, на дно траншеї укладають ЛПО, після чого її засипають ґрунтом або іншим матеріалом. Ширина траншеї при траншейному способі складає від 200 мм до 500 мм і більше. Операції з розробки траншеї, укладання ЛПО і зворотна засипка не суміщені в часі.

Безтраншейним називається спосіб будівництва, при якому ножовим робочим органом розробляють щілину шириною, як правило, не більше 200 мм без винесення основної маси ґрунту на денну поверхню, на дно якої укладають підземний об'єкт, з одночасним закриттям щілини. При цьому способі операції з нарізання щілини, укладання ЛПО і закриття щілини суміщені в одному технологічному процесі.

Досвід укладання ЛПО показує, що незважаючи на існуючі недоліки, безтраншейний спосіб є найбільш перспективним і на сучасному рівні техніки іншої альтернативи не має.

До переваг безтраншейного способу відносяться:

- мінімальний обсяг ґрунту, що руйнується;
- всі операції технологічного процесу поєднані у часі, що скорочує термін будівництва;
- високий рівень механізації і, як наслідок, висока швидкість прокладки ЛПО (1000–2500 м/год) і мала чисельність обслуговуючого персоналу;
- можливість укладання ЛПО у складних ґрунтових умовах (обвальні та опливаючі ґрунти, високий рівень стояння підземних вод, наявність кам'янистих та інших твердих включень тощо);
- мінімальний винос мінерального ґрунту на денну поверхню, практично повне збереження верхнього, родючого гумусового шару та відсутність необхідності проведення рекультиваційних робіт;
- конструктивна простота та надійність безтраншейних укладачів, відсутність обмежень швидкостей укладання ЛПО виносною здатністю робочих органів.

До недоліків безтраншейного способу необхідно віднести:

- великі опори переміщенню робочих органів у ґрунті, що потребує використання енергонасичених тягачів великої маси;
- ущільнення ґрунтів по глибині щілини, що нарізується.

Усі безтраншейні укладачі ЛПО здійснюють процес, так званої глибокої розробки ґрунтів, коли глибина розробки в 3–5 і більше разів перевищує ширину розробки. Тому проектування пасивних робочих органів безтраншейних укладачів має здійснюватися на основі вивчення фізичної суті процесу глибокої розробки ґрунтів.

ПРИЙНЯТІ ПРИПУЩЕННЯ І ПОЗНАЧЕННЯ

Проведене аналітичне моделювання робочих процесів різання та деформування ґрунту з наступними припущеннями щодо моделі ґрунту і схеми його поперуксного руйнування: ґрунт розглядається як суцільне однорідне ізотропне середовище, яке характеризується механічним складом, пластичністю, зчепленням, внутрішнім і зовнішнім тертям і щільністю; руйнування ґрунту проходить, як правило, за рахунок деформацій зрізу і зсуву після порушення рівноваги сил діючих на елемент стружки, який розглядається як тверде тіло, опір відокремлення якого від ґрунтового середовища не залежить від швидкості робочого інструмента. Впливом швидкості на опір руйнуванню талих ґрунтів можна нехтувати, якщо її значення не перевищує 1,0 м/с [4; 5].

Основні умовні позначення:

c – коефіцієнт зчеплення ґрунту, МПа;

φ, φ_0 – кути зовнішнього і внутрішнього тертя ґрунту, град.;

f – коефіцієнт зовнішнього тертя ґрунту ($f = tg\varphi$);

γ_{ep} – питома сила тяжіння ґрунту в природному стані, МН/м³;

ρ_c – щільність зруйнованого ґрунту, т/м³;

A_1 – коефіцієнт, який залежить від кута різання ножа, визначається за формулою В.В. Соколовського для проміжних граней;

h_c – середня глибина сколювання ґрунту в ярусі, м;

$q_0, q_{кр}, q_{сер}$ – відповідно мінімальний, максимальний і середній тиск ґрунту на лобову поверхню ножа по глибині, МПа;

ψ, ψ_1, ψ_2 – кути поздовжнього зсуву ґрунту, град.;

H_{max} – максимальна глибина укладання ЛПО, м;

h – поточне значення глибини, м;

$h_{кр1,2}$ – критична глибина різання ($h_{кр} = h_c / k_{пер}$), м;

$k_{пер}$ – відношення глибини гарантованого сколювання ґрунту до критичної глибини різання ($k_{пер} = 0,9 \dots 0,95$);

h_p – глибина різання ($h_p \leq h_{кр}$), м;

d – діаметр ЛПО, що укладається, м;

h_z – висота нижнього ярусу, м;

B_z – ширина різання в нижньому ярусі, м;

B_k – ширина різання в k -му ярусі, м;

B_0 – ширина руйнування ґрунту на денній поверхні, м;

k_2 – питомий опір різанню в нижньому ярусі, МПа;

$Z_{яр}$ – кількість ґрунторозробних органів (ярусів) ЗРО;

ϑ, ϑ_r – переносна і відносна швидкості ґрунту, м/с;

α_p – кут різання ґрунторозробного органа, град;

β_{mp} – кут нахилу матеріалопровідного тракту до горизонту, град;

γ – кут розвалу щілини, град;

$\varphi_{зч}, f_{оп}$ – коефіцієнти зчеплення рушії з опорною поверхнею та опору переміщенню;

$\rho_{пр}, \rho_{мс}$ – щільність ґрунту в природному стані та щільність мінеральних частинок ґрунту ($\rho_{мс} = 2,7 \text{ т/м}^3$), т/м³;

W_{Σ} – сумарний опір переміщенню робочого обладнання, МН.

Умовні позначення з індексом «1» відносяться до верхнього ярусу, а з індексом «2» – для наступних нижніх ярусів.

1. ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ГЛИБИНИ РІЗАННЯ ПРИ ПОЯРУСНІЙ РОЗРОБЦІ ҐРУНТОВОГО СЕРЕДОВИЩА

У вивченні процесу різання ґрунтів ножами, що відокремлюють стружку, істотну роль відіграє наявність явища критичної глибини різання, яке вперше відзначив німецький вчений Е. Дінглінгер для розрізаючих ножів [3]. Дослідники процесу дійшли висновку, що відокремлення стружки від ґрунтового масиву розрізаючим ножом у сторони збільшується лише до так званої критичної глибини різання $h_{кр}$ [4]. Подальше заглиблення ножа не збільшує зону руйнування ґрунту в сторони, а лише супроводжується ущільненням ґрунту без відокремлення стружки. Тобто, процес механічної розробки мінеральних ґрунтів супроводжується просторовою взаємодією робочого інструмента з середовищем і найбільш характерним поелементним відокремленням ґрунтової стружки за рахунок деформацій зсуву і відриву у верхньому ґрунтовому шарі і тільки за рахунок деформацій зрізу і зсуву в нижніх шарах.

Збільшення глибини різання ґрунту ножом у верхньому ярусі до $h < h_{кр}$ ($h_{кр}$ – критична глибина різання) призводить до зменшення питомої енергоємності робочого процесу тому, що інтенсивність зростання опору різанню стає меншою, ніж площі поперечного перерізу щілини, яка нарізується. Якщо $h > h_{кр}$ інтенсивність зростання опору різанню ножа суттєво збільшується за рахунок пресування ґрунту в бічні стінки щілини, яка нарізується, а площа руйнування зменшується. В результаті енергоємність робочого процесу значно підвищується [4; 1].

На рис. 1.1 зображені закономірності зміни сили блокованого різання від ширини (рис. 1.1, а), глибини (рис. 1.1, б) різання і енергоємності блокованого різання (рис. 1.1, в). Із останньої залежності випливає, що критичній глибині різання відповідає мінімальна енергоємність руйнування – величина, яка вимірюється енергією, необхідною для руйнування одиниці об'єму ґрунту.

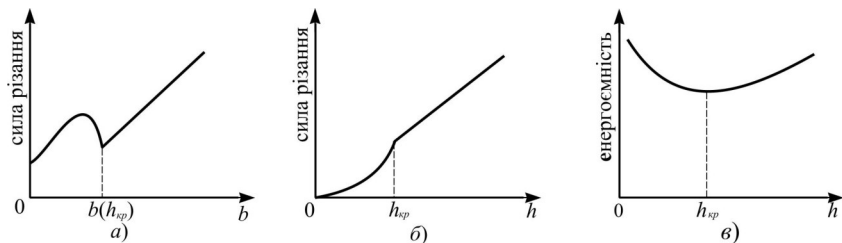


Рис. 1.1. Характерні залежності для блокованого руйнування ґрунту, які визначають критичну глибину різання: а – сили різання від ширини ножа; б – сили від глибини різання; в – енергоємності від глибини різання

Критична глибина різання ґрунту – це глибина, що розділяє фізичний процес руйнування ґрунтового масиву на деформації відриву та зсуву ґрунту у напрямку денної поверхні на докритичній глибині та деформації стиснення та ущільнення ґрунту у масив на закритичній глибині.

Якщо зона сколювання ґрунту створюється умовами вільного виходу ґрунту на денну поверхню, то закритична зона ущільнення, навпаки, утворюється через відсутність таких умов (вихід ґрунту із зони різання). Для усунення закритичної зони руйнування ґрунту і покращення якості його обробки в зоні дії робочого органа необхідно, перш за все, створити умови для вільного виходу стружки ґрунту із будь-якого підземного горизонту в напрямку

денної поверхні або іншого вільного простору в межах щілини, що формується. Якщо $H > h_{кр}$, то такі умови можуть бути створені при поярусній розробці середовища (рис. 1.2).

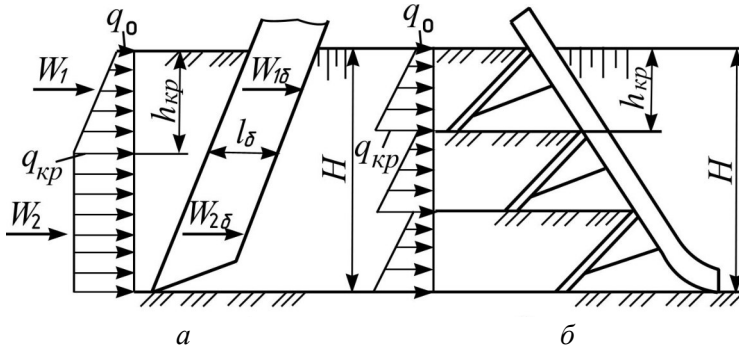


Рис. 1.2. Характерні епюри розподілу нормального тиску на лобову поверхню робочого органа по глибині: *а* – для традиційної конструкції; *б* – для багаторярусної конструкції

Поярусна схема розробки дозволяє зменшити енергоємність і динаміку робочого процесу порівняно з одноярусною (традиційною) схемою розробки щілини (глибина різання у три і більше разів перевищує його ширину). Зниження енергоємності багаторярусної схеми розробки базується на тому положенні, що кожний ярус робочого органа здійснює розробку ґрунту тільки в докритичній зоні, а найбільш енергоємна закритична зона ущільнення відсутня. Тому нормальний тиск ґрунту на робочу поверхню багаторярусного робочого органа, а отже і енергоємність процесу при оптимальній кількості ярусів менші, ніж для традиційних ЗРО.

Тому, перш за все, необхідно знати величину критичної

глибини різання в залежності від умов різання (верхній, нижній ярус) типу різання (блоковане, напівблоковане, вільне, комбіноване) і вихідних даних для найбільш ймовірних типів талих мінеральних ґрунтів.

1.1. ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ГЛИБИНИ РІЗАННЯ В БЛОКОВАНИХ І НАПІВБЛОКОВАНИХ УМОВАХ

З метою визначення критичної глибини різання для укладачів пасивного типу розроблена розрахункова схема взаємодії найбільш поширеного прямолінійного ножа з ґрунтом (рис. 1.3) [6]. Прийняті наступні припущення: елемент стружки розглядається як тверде тіло у вигляді трикутної призми з двома симетричними конічними секторами по боках; критична глибина різання постійна незалежно від того, працює ЗРО у режимі заглиблення або в сталому режимі; закон розподілу нормального тиску на лобову площину ножа в зоні зсуву ґрунту на денну поверхню прийнятий лінійним по глибині [4; 7; 8].

Розрахункова схема (див. рис. 1.3) ґрунтується на наступному положенні. Довжина контакту ножа з ґрунтом не порушеної структури в режимі заглиблення і при сталому режимі різання різна і впливає на об'єм елементів стружки і опір різанню, а не на критичну глибину.

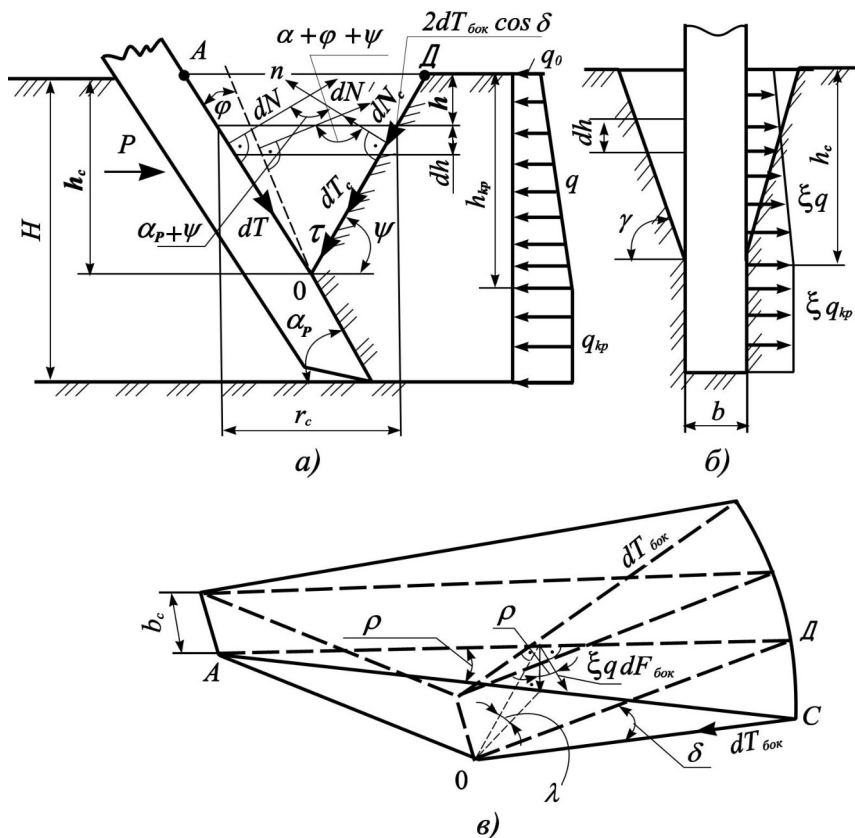


Рис. 1.3. Схема взаємодії ножа з ґрунтовим середовищем:
 а – у поздовжній площині; б – у поперечній площині;
 в – форма елемента стружки в процесі заглиблення ножа

У момент заглиблення ножа в ґрунт контакт між ними розповсюджується по всій глибині різання, довжина контакту максимальна, сколюється найбільший елемент стружки, а тому опір різанню ґрунту також найбільший. При сталому режимі різання контакт ножа з ґрунтом непорушеної структури розповсюджується не на всю глибину різання, а тому сколюються менші елементи

стружки і знижується опір різанню [8].

Закон розподілу нормального тиску на лобову поверхню ножа можна обґрунтувати як лінійний на основі теорії різання ґрунтів Ю.О. Вєтрова [4].

Згідно цієї теорії сила блокованого різання у верхньому ярусі при умові, що проріз утворюється з боковими розширеннями, як показано на рис. 1.3, $\delta \left(\gamma < \frac{\pi}{2} \right)$, дорівнює:

$$P(h) = \varphi_{\alpha_p} m_6 b_c h + 2m_{\text{бок.зр}} h + 2m_{\text{бок}} h^2, \quad (1.1)$$

де φ_{α_p} – коефіцієнт, який враховує вплив кута різання ножа на опір вільного різання; m_6 – питома сила вільного різання ґрунту ножом з кутом різання 45° ; b_c – ширина ножа; h – глибина різання; $m_{\text{бок.зр}}$, $m_{\text{бок}}$ – коефіцієнти, які характеризують питому силу для подолання опору ґрунту зрізу боковими ребрами ножа і для руйнування ґрунту в бокових розширеннях прорізу.

З іншої сторони

$$P(h) = q(h) b_c h (1 + \text{tg} \varphi \cdot \text{ctg} \alpha_p) = q(h) b_c h \frac{\sin(\alpha_p + \varphi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p}. \quad (1.2)$$

Тоді середній нормальний тиск ґрунту на лобову поверхню ножа по глибині верхнього ярусу розподілиться наступним чином:

$$q(h) = \frac{P \cos \varphi \sin \alpha_p}{b_c h \sin(\alpha_p + \varphi)} = \left(\varphi_{\alpha_p} m_6 + 2 \frac{m_{\text{бок.зр}}}{b_c} + 2 \frac{m_{\text{бок}}}{b_c} h \right) \times \frac{\cos \varphi \sin \alpha_p}{\sin(\alpha_p + \varphi)}, \quad (1.3)$$

де φ – кут зовнішнього тертя ґрунту.

У нижніх ярусах руйнування ґрунту може відбуватися як з

утворенням бокових розширень ($\gamma < \frac{\pi}{2}$), якщо ширина ярусів

збільшується знизу до верху, так і без їх утворення ($\gamma = \frac{\pi}{2}$), якщо

ширина ярусів постійна по глибині. В останньому випадку вираз для сили різання в нижньому ярусі можна записати в такому вигляді:

$$P(h) = \varphi_{\alpha_p} m_b b_c h + 2m_{\text{бок.зр}} h + 2m_{\text{бок.зс}} F_{\text{зс}}, \quad (1.4)$$

де $m_{\text{бок.зс}}$ – коефіцієнт, який характеризує питому силу руйнування ґрунту по бокових площинах зсуву $F_{\text{зс}} = \frac{h^2}{2} (\text{ctg}\alpha_p + \text{ctg}\psi)$ (див. рис. 1.3), де ψ – кут зсуву ґрунту в поздовжній площині.

$$q(h) = \frac{P \cos\psi \sin\alpha_p}{b_c h \sin(\alpha_p + \psi)} = \left(\varphi_{\alpha_p} m_b + 2 \frac{m_{\text{бок.зр}}}{b_c} + m_{\text{бок.зс}} (\text{ctg}\alpha_p + \text{ctg}\psi) \frac{h}{b_c} \right) \times \frac{\cos\psi \sin\alpha_p}{\sin(\alpha_p + \psi)}. \quad (1.5)$$

Таким чином, на основі проведеного обґрунтування і результатів експериментальних досліджень можна вважати достовірним *лінійний закон розподілу нормального тиску ґрунту на лобову поверхню ножа по глибині ярусу*. Мінімальний тиск діє на денній поверхні.

$$q_0 = c \cdot \text{ctg}\varphi_0 (A_1 - 1), \quad (1.6)$$

а на критичній глибині він досягає максимально можливого значення по несучій спроможності ґрунту, при якому ґрунт втрачає стійкість, вираховується за формулою Паукера.

$$q_{\text{кр}} = \left(\gamma_{\text{зр}} h_c + \frac{c}{\text{tg}\varphi_0} \right) \times \text{tg}^4 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right), \quad (1.7)$$

де γ_p , c – питома сила тяжіння і коефіцієнт зчеплення ґрунту; h_c – середня глибина сколювання ґрунту ножем; φ_0 – кут внутрішнього тертя; A_1 – коефіцієнт, який залежить від кута різання ножа, визначається за формулою В.В. Соколовського для проміжних граней.

$$A_1 = \frac{\cos \varphi \left(\cos \varphi + \sqrt{\sin^2 \varphi_0 - \sin^2 \varphi} \right) \times \left(\sin \varphi_0 \cos \varphi_\alpha + \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_0 \sin^2 \varphi_\alpha} \right)^2}{\cos^2 \varphi_0 (1 - \sin \varphi_0)}, \quad (1.8)$$

$$\text{де } \varphi_\alpha = \pi - \alpha_p - \frac{\varphi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0}.$$

На елементарний об'єм елемента стружки висотою dh в момент попередній сколюванню діють наступні сили, які приведені у вертикальну площину ОАД (див. рис. 1.3, а); активна сила, $dN' = \frac{dN}{\cos \varphi}$, яка направлена під кутом зовнішнього тертя ґрунту φ до нормалі лобової площини ножа; нормальна реакція dN_c і дотичні сили dT_c і $2dT_{\text{бок}} \cos \delta$ в площині зсуву ґрунту. Тоді система рівнянь рівноваги всіх сил на нормальну (n) і дотичну (τ) осі до лобової площини сколювання мають вигляд

$$\begin{cases} \sum P_n = dN_c + dN' \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0; \\ \sum P_\tau = dT_c + 2dT_{\text{бок}} \cos \delta - dN' \sin(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0. \end{cases} \quad (1.9)$$

З першого рівняння системи (9) маємо

$$dN_c = -\frac{dN}{\cos \varphi} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = -\frac{qb_c}{\cos \varphi \sin \alpha_p} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) dh, \quad (1.10)$$

де dh – елементарна глибина різання.

Закон розподілу нормального тиску ґрунту на ніж по глибині

представимо у вигляді

$$q = q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{h_{кр}} h = q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{h_c} k_{неп} h, \quad (1.11)$$

де $k_{неп}$ – відношення глибини зони гарантованого сколювання ґрунту h_c до критичної глибини різання $h_{кр}$ ($k_{неп}=0,9\dots0,95$); h – поточне значення глибини.

З урахуванням (1.11) вираз (1.10) перепишеться таким чином:

$$dN_c = -\frac{\cos(\alpha_p + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} b_c \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{h_c} k_{неп} h \right) dh. \quad (1.12)$$

Елементарні дотичні сили, які діють у лобовій (dT_c) і боковій ($dT_{бок}$) площинах сколювання визначаються за законом Кулона для ґрунтів

$$dT_c = tg \varphi_0 dN_c + cdF_c, \quad (1.13)$$

$$dT_{бок} = (\xi q \cos \rho \cos \lambda tg \varphi_0 + c) dF_{бок}, \quad (1.14)$$

де dF_c , $dF_{бок}$ – елементарні площі відповідно лобової і бокової площин сколювання; ξ – коефіцієнт бокового тиску; ρ , δ , λ – кути, які утворюються боковою площиною сколювання з вертикальною площиною (див. рис. 1.3, в). Елементарні площі відповідно дорівнюють:

$$dF_c = (b_c + 2\rho r_c) \frac{dh}{\sin \psi} = [b_c + 2\rho(ctg \alpha_p + ctg \psi)(h_c - h)] \frac{dh}{\sin \psi}, \quad (1.15)$$

$$dF_{бок} = r_c \frac{dh}{\cos \lambda} = (ctg \alpha_p + ctg \psi)(h_c - h) \frac{dh}{\cos \lambda}, \quad (1.16)$$

де r_c – поточне значення радіуса сколювання ґрунту.

Якщо підставити вирази (1.13) і (1.14) в друге рівняння

системи (1.9) з урахуванням рівностей (1.12), (1.15) і (1.16), а потім проінтегрувати його в межах від 0 до h_c , то після проміжних математичних перетворювань отримаємо:

$$\begin{aligned} & \left(\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi \right) \left[\zeta \left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{3} k_{nep} \right) \cos \delta \cos \rho \operatorname{tg} \varphi_0 + \right. \\ & \left. + \frac{c \rho}{\sin \psi} + c \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right] h_c = \\ & = \left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{2} k_{nep} \right) \left[\frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} + \operatorname{tg} \varphi_0 \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} \right] b_c - \frac{c}{\sin \psi} b_c. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Із рівняння (1.17) після нескладних тригонометричних перетворень визначимо математичну модель глибини h_c гарантованого сколювання ґрунту і критичної глибини різання

$$\begin{aligned} h_{kp} &= \frac{h_c}{k_{nep}} = \\ &= \frac{\left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{2} k_{nep} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \phi + \phi_0 + \psi)}{\cos \phi \cos \phi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\left(\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi \right) \left[\zeta \left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{3} k_{nep} \right) \cos \delta \cos \rho \operatorname{tg} \phi_0 + c \left(\frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) \right] k_{nep}} \cdot b_c. \end{aligned} \quad (1.18)$$

Кути ρ , δ , λ визначаються із геометричних співвідношень (див. рис. 1.3, в)

$$\cos \rho = \sqrt{1 - \left(\frac{\operatorname{ctg} \gamma}{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi} \right)^2}, \quad (1.19)$$

$$\cos \lambda = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p \operatorname{ctg} \gamma}{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi} \right)^2}}, \quad (1.20)$$

$$\cos \delta = 1 - 2 \left(\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi \right)^2 \sin^2 \psi \sin^2 \frac{\rho}{2}, \quad (1.21)$$

де γ – кут нахилу бокових площин елемента стружки до горизонту

$$\gamma = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}.$$

Модель (1.18) може бути використана для визначення критичної глибини різання ґрунту як у верхньому ярусі, так і в наступних нижніх ярусах. Умови роботи ґрунторозробних органів у цих ярусах неіdentичні. Верхній ґрунторозробний орган внаслідок впливу денної поверхні працює в умовах блокованого різання і утворює проріз з боковими розвалами, в яких ґрунт руйнується переважно за рахунок деформації відриву. А тому на бокових площинах елементів стружки відсутні бічний тиск і сили тертя утворюваних елементів стружки об масив ґрунту ($\xi q = 0$). При цьому верхній ґрунторозробний орган створює вільний простір з обмеженим розміром денної поверхні (шириною верхнього ярусу) для виходу ґрунту із нижнього ярусу. Внаслідок цього нижні ґрунторозробні органи формують щілину з бічними розвалами ($\rho > 0$), якщо ширина ярусів збільшується знизу до верху, або прямокутну щілину без розвалів ($\rho = 0$), якщо ширина ярусів незмінна. Формування щілини в нижніх ярусах здійснюється за рахунок деформації зрізу і зсуву, а тому на бічних площинах елементів стружки виникають нормальний тиск ($\xi q > 0$) і сили тертя.

З урахуванням цих особливостей залежність (1.18) для визначення глибини сколювання ґрунту у верхньому і наступних нижніх ярусах перепишеться у вигляді

$$h_{c_1} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{2} k_{nep} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{(ctg \alpha_p + ctg \psi) e^{\left(\frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right)}} b_{c_1}, \quad (1.22)$$

$$h_{c_2} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{2} k_{nep} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{(ctg \alpha_p + ctg \psi) \left[\zeta \left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{3} k_{nep} \right) tg \varphi_0 + c \right]} b_{c_2}. \quad (1.23)$$

Математична модель (1.22) підтверджує експериментальні дані про прямопропорційний характер залежності критичної глибини різання від ширини ножа у верхньому ярусі [4].

У залежностях (1.22) і (1.23) невідомим є параметр ψ . Визначимо його на основі того твердження, що кожний раз для $H \geq h_{kp1}$ значення кута сколювання ψ встановлюється таким, що опір відокремлення елементів стружки і опір різанню будуть мінімальні.

Опір ЗРО при глибокому різанні дорівнює [1; 6]:

$$P = k_1 b_{c_1} h_{kp1} + k_2 b_{c_2} (H - h_{kp1}), \quad (1.24)$$

де k_1 , k_2 і b_{c_1} b_{c_2} – питомий опір різанню і ширина ЗРО відповідно в докритичній і закритичній зонах; H – повна глибина різання ґрунту.

Питомий опір різанню k_1 залежить від середнього нормального тиску ґрунту на лобову площину ЗРО в зоні сколювання

$\left(q_{cp} = \frac{q_0 + q_{kp}}{2} \right)$, від кутів різання, загострення і зовнішнього тертя

ґрунту. Величина k_2 визначається критичним значенням нормального тиску ґрунту на ЗРО q_{kp} , кутом зовнішнього тертя ґрунту і геометричними параметрами різального інструмента.

Дослідимо (1.24) на екстремум по куту зсуву ґрунту ψ . Тому що всі параметри, які входять у залежність (1.24), за виключенням величини $h_{кр1}$, функціонально незалежні від кута ψ , то екстремальна умова запишеться у вигляді

$$\frac{dP}{d\psi} = \frac{dh_{кр1}}{d\psi} (k_1 b_{c_1} - k_2 b_{c_2}) = 0. \quad (1.25)$$

Звідки $\frac{dh_{кр1}}{d\psi} = 0$; $h_{кр1} = \frac{h_{c_1}}{k_{неp}} = \max$, тому що $h_{кр1} \neq 0$ (\min).

Цей висновок також впливає із епюри нормального тиску на лобову площину ЗРО (див. рис. 1.3, а). Мінімальний опір різанню можливий (для заданої глибини різання $H > h_{кр1}$) при мінімальній площі епюри нормального тиску, а це можливо, якщо $h_{кр1} = h_{c_1}/k_{неp} = \max$ і $h_{c_1} = \max$. Таким чином, кут зсуву ґрунту визначається максимальним значенням глибини зони сколювання.

Максимальні значення відносної глибини сколювання (h_c/b_c) і відповідні їм кути зсуву ґрунтів визначені для супіску, суглинку і глини для кутів різання ножа $\alpha_p = 20^\circ \dots 60^\circ$.

Характерні криві відносної глибини сколювання ґрунтів від кута зсуву для різних кутів різання ножа представлені на рис. 1.4. Залежність відносної глибини сколювання від кута різання ножа для ґрунтів другої і третьої категорії – на рис. 1.5 і 1.6, відповідно для верхнього і нижніх ярусів.

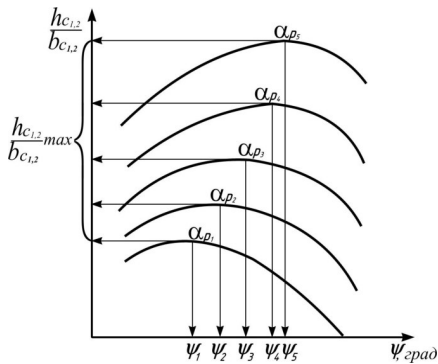


Рис. 1.4. Характерна залежність відносної глибини сколювання від поздовжнього кута зсуву ґрунту для різних кутів різання ножа ($\alpha_{p_1} > \alpha_{p_2} > \alpha_{p_3} > \alpha_{p_4} > \alpha_{p_5}$)

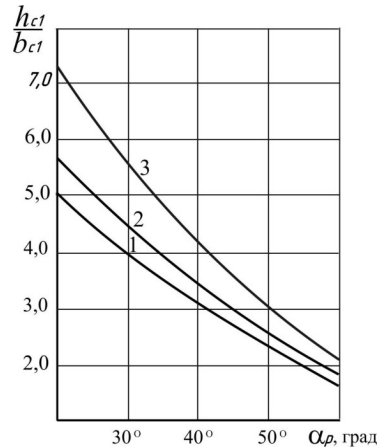


Рис. 1.5. Залежність відносної глибини сколювання ґрунтів від кута різання ножа у верхньому ярусі ($q_0 = 2c \cdot \text{tg}(\pi/4 + \varphi_0/2)$): 1 – тугопластична і напівтверда глина; 2 – твердий і напівтвердий суглинок; 3 – твердий супісок

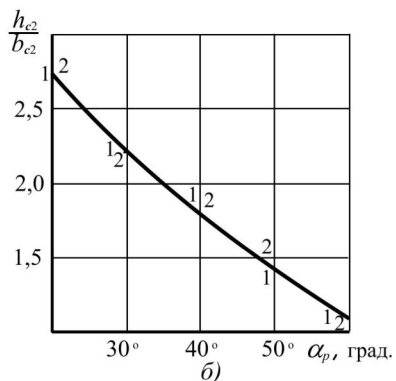
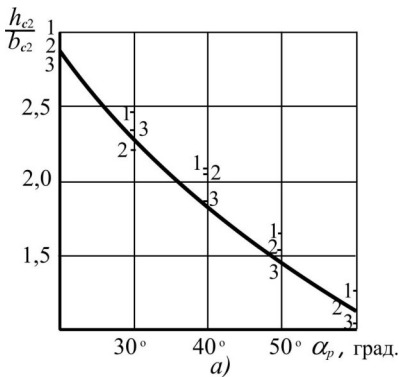


Рис. 1.6. Залежність відносної глибини сколювання ґрунтів від кута різання ножа в нижніх ярусах:

а) 1 – тугопластична глина; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – твердий супісок; б) 1 – напівтверда глина; 2 – твердий суглинок

Розрахункові залежності показують, якщо зменшується кут різання ножа від 60° до 20° відносна глибина сколювання (h_c/b_c) збільшується: у верхньому ярусі для ґрунтів другої категорії (твердий супісок, напівтвердий суглинок, тугопластична глина) від 1,73 до 7,35, а для ґрунтів третьої категорії (твердий суглинок і напівтверда глина) від 1,70 до 5,80; у нижніх ярусах для ґрунтів другої категорії від 1,03 до 2,93, а для ґрунтів третьої категорії від 1,1 до 2,83.

Аналіз розрахункових значень відносної глибини сколювання для ґрунтів з близькими фізико-механічними властивостями, але з різною вологістю (напівтвердий суглинок і тугопластична глина; твердий суглинок і напівтверда глина) показав, що зі збільшенням вологості відносна глибина зменшується. Така залежність характерна і для збільшення коефіцієнтів зчеплення ґрунту (твердий супісок, твердий суглинок).

Якщо параметрах ножа ($\alpha_p=30^\circ$) незмінні відносна глибина зсуву для різних ґрунтів змінюється в межах: у верхньому ярусі від 4,0 до 5,65, а в нижніх ярусах від 2,2 до 2,47.

Таким чином, геометричні параметри ЗРО впливають більш суттєво на відносну глибину зсуву, ніж фізико-механічні параметри ґрунтів. Ця глибина з меншою інтенсивністю змінюється в нижніх ярусах тому, що в цих ярусах руйнуються значно менші об'єми ґрунту. При інших рівних умовах критична глибина різання ґрунту в нижніх ярусах у 1,5–1,9 разів менша, ніж у верхньому ярусі.

Математичні моделі (1.18), (1.22) і (1.23) є громіздкими і

незручними для вирахування критичної глибини різання. З метою їх спрощення проведемо апроксимацію в межах кута різання ножа $\alpha_p=20^\circ \dots 60^\circ$. Для цього проведемо лінеаризацію функцій, та отримаємо:

$$\frac{h_c}{b_c} = \frac{e^{\alpha_{h_c}}}{(\operatorname{tg} \alpha_p)^n} = \frac{\alpha}{(\operatorname{tg} \alpha_p)^n}, \quad (1.26)$$

де α_{h_c} і n – коефіцієнти апроксимації, які залежать від фізико-механічних властивостей ґрунту.

Залежність кута зсуву ґрунту від кута різання ножа на рис. 1.4 достатньо точно інтерполюється лінійною залежністю

$$\psi = \alpha_\psi + k_\psi \alpha_p, \quad (1.27)$$

де α_ψ , k_ψ – коефіцієнти інтерполяції, які залежать від фізико-механічних властивостей ґрунту.

Коефіцієнти апроксимації і інтерполяції визначаються за методом найменших квадратів. Їх значення для верхнього і нижнього ярусів і широкого діапазону глинистих ґрунтів представлені у табл. 1.1.

Помилка апроксимації відносної глибини зсуву не перевищує 6,6%, а помилка інтерполяції кута зсуву – 3,8%.

Розроблена методика побудови математичних моделей (1.26), (1.27) дозволяє в кожному конкретному випадку на основі вихідних даних про талі ґрунти, що рекомендують БНіП, у залежності від кута різання ножа в межах 20° – 60° визначити (з достатньою для практичних розрахунків точністю) критичну глибину блокованого різання для поярусної розробки ґрунту.

Таблиця 1.1

Значення апроксимуючих та інтерполюючих коефіцієнтів для різних типів ґрунтів

Тип ґрунту	α_1	n_1	α_2	n_2	α_{w1}	k_{w1}	α_{w2}	k_{w2}
Твердий супісок	3,504	0,794	$\frac{1,564}{1,681}$	$\frac{0,658}{0,704}$	0,986	-0,369	0,909	-0,302
Напівтвердий суглинок	2,921	0,711	1,654	0,593	1,175	-0,448	1,130	-0,396
Тугопластична глина	2,635	0,691	1,770	0,540	1,171	-0,429	1,048	-0,280
Твердий суглинок	2,955	0,718	$\frac{1,605}{1,650}$	$\frac{0,592}{0,626}$	1,079	-0,360	0,984	-0,303
Напівтверда глина	2,614	0,702	$\frac{1,659}{1,718}$	$\frac{0,581}{0,548}$	1,107	-0,360	1,024	-0,295

Примітка: індекс „1” – для верхнього ярусу; „2” – для нижніх ярусів; у знаменнику приведені значення для кута розвалу ярусів $\gamma = 80...82^\circ$.

Аналогічним чином отримана залежність глибини сколювання для напівблокованого різання відповідно до розрахункової схеми [9]. Для верхнього ярусу $\xi q = 0$.

$$h_{sp} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{sp} - q_0}{2} k_{nep} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \rho \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\frac{ctg \alpha_p + ctg \psi}{2} \left[\xi \left(q_0 + \frac{q_{sp} - q_0}{3} k_{nep} \right) \cos \rho \cos \delta \operatorname{tg} \varphi_0 + c \left(\frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) \right]} k_{nep} \cdot b_c \quad (1.28)$$

Якщо порівняти залежності (1.22) і (1.28), то впливає висновок, що критична глибина для напівблокованого різання у 2 рази більша за критичну глибину блокованого різання ґрунтів при $\xi q = 0$.

1.2. ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ГЛИБИНИ РІЗАННЯ ПРИ КОМБІНОВАНОМУ РУЙНУВАННІ ҐРУНТУ

Для дослідження критичної глибини комбінованого різання (вільне у верхній частині та блоковане у нижній одночасно) для розпушуючого робочого органу розглянемо процес руйнування ґрунту сколюванням на основі наступної схеми (рис. 1.7). У якості вихідних умов приймаємо припущення, що зазначені вище у п. 1.1.

Згідно з теорією різання ґрунтів Ю.О. Ветрова [4] та розрахунковою схемою, що зображена на рис. 1.7, закон зміни нормального тиску на лобову поверхню ножа при блокованому різанні описується залежністю (1.2), а для вільного різання з урахуванням трапецеїдальної форми лобової площини зсуву

$$q_e = \varphi_{\alpha_p} m_e \left(1 + \frac{h_e}{b_\kappa} \operatorname{ctg} \gamma \right) \frac{\cos \varphi \sin \alpha_p}{\sin(\alpha_p + \varphi)}, \quad (1.29)$$

де $\varphi_{\alpha_p} m_e \frac{\cos \varphi \sin \alpha_p}{\sin(\alpha_p + \varphi)} = q_0$ – мінімальне значення тиску, який діє на

ніж на денній поверхні; h_e – глибина вільного різання ґрунту (див. рис. 1.7); b_κ – ширина ґрунторозробного органа при комбінованому різанні ґрунту; γ – кут нахилу бічних стінок прорізу до горизонту.

Тому закон розподілу нормального тиску ґрунту на ґрунторозробний орган при вільному різанні у верхньому ярусі визначається за формулою

$$q_e = q_0 \left(1 + \frac{h}{b_\kappa} \operatorname{ctg} \gamma \right), \quad (1.30)$$

де h – поточне значення глибини різання при вільному різанні.

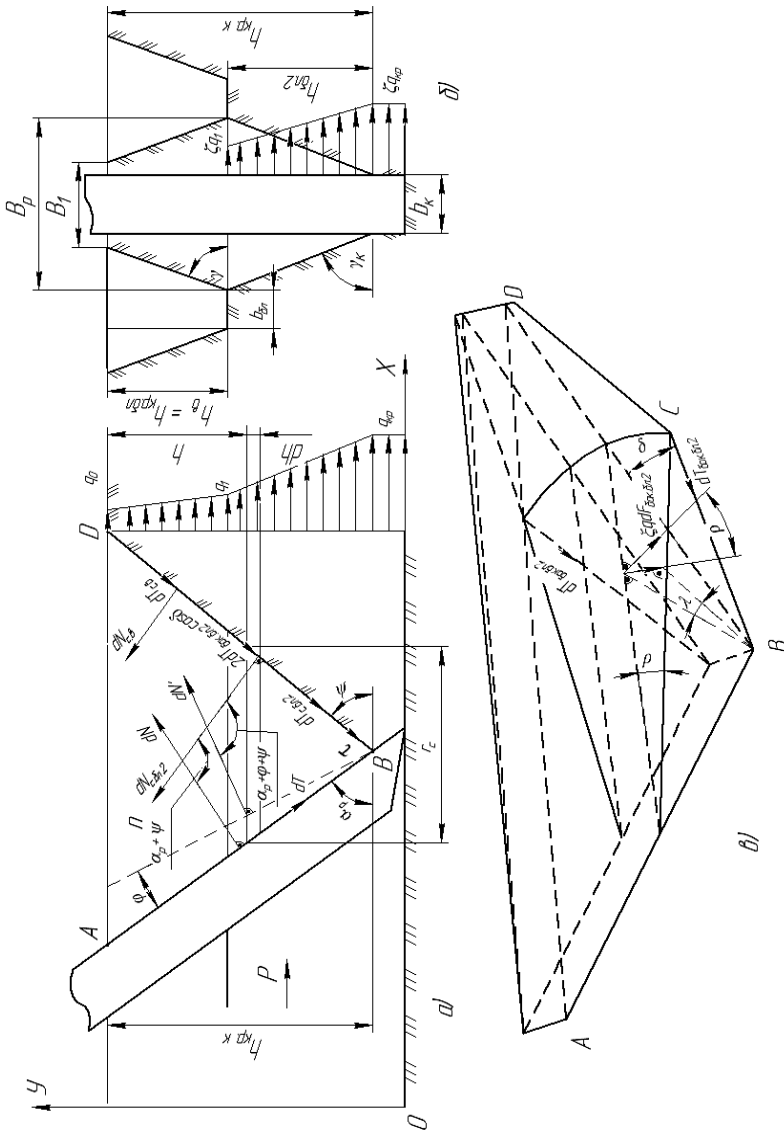


Рис. 1.7. Схема взаємодії ножа з ґрунтовим середовищем при комбінованому різанні ґрунту:
 а) у поздовжній площині; б) у поперечній площині;
 в) форма елемента стружки у процесі заглиблення ножа

На елементарний об'єм елемента стружки висотою dh в момент попередній сколюванню діють наступні сили, які приведені у вертикальну площину ABD (рис. 1.7, а): активна сила

$$dN' = \frac{dN}{\cos \varphi},$$

яка напрямлена під кутом зовнішнього тертя ґрунту φ

до нормалі лобової площини ножа; нормальна реакція $dN_{c.в}$ – для вільного різання і $dN_{c.бл}$ – для блокованого різання; дотичні сили $dT_{c.в}$ – для вільного і $dT_{c.бл}$, $2 dT_{бок.бл} \cos \delta$ – для блокованого різання в площині зсуву ґрунту. Тоді система рівнянь рівноваги всіх сил на нормальну (n) і дотичну (τ) осі до лобової площини сколювання матиме вигляд:

$$\begin{cases} \Sigma P_n = dN_{c.в} + dN_{c.бл} + dN' \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0 \\ \Sigma P_\tau = dT_{c.в} + dT_{c.бл} + 2dT_{бок.бл} \cos \delta - dN' \sin(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0, \end{cases} \quad (1.31)$$

де ψ – кут поздовжнього сколювання ґрунту; δ – кут який утворюється боковою площиною сколювання з вертикальною площиною (рис. 1.7, в) [10].

З першого рівняння системи (1.31) маємо:

$$\begin{aligned} dN_{c.в} + dN_{c.бл} &= -\frac{dN}{\cos \varphi} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = \\ &= -\frac{qb_\kappa}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) dh, \end{aligned} \quad (1.32)$$

Закон розподілу нормального тиску ґрунту на ніж по глибині:

- для вільного різання (1.30),
- для блокованого різання:

$$q_{\bar{\sigma}l} = q_{\sigma} + \frac{q_{кр} - q_{\sigma}}{h_{\bar{\sigma}l,2}} k_{неп} h, \quad (1.33)$$

де $k_{неп}$ – відношення глибини зони гарантованого сколювання ґрунту ($k_{неп}=0,9\dots0,95$); h – поточне значення глибини.

З урахуванням (1.30), (1.33) вираз (1.32) переписеться наступним чином:

$$dN_{c.\sigma} + dN_{c.\bar{\sigma}l} = -\frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} \cdot b_{\kappa} \cdot q_0 \cdot \left(1 + \frac{h}{b_{\kappa}} \operatorname{ctg} \gamma\right) dh - \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} \cdot b_{\kappa} \cdot \left(q_{\sigma} + \frac{q_{кр} - q_{\sigma}}{h_{\bar{\sigma}l,2}} k_{неп} h\right) dh. \quad (1.34)$$

Елементарні дотичні сили, які діють у лобовій ($dT_{c.\sigma}$, $dT_{c.\bar{\sigma}l}$) і боковій ($dT_{бок.\bar{\sigma}l}$) площинах сколювання, визначаються за законом Кулона для ґрунтів.

$$dT_{c.\sigma} = \operatorname{tg} \varphi_0 dN_{c.\sigma} + c dF_{c.\sigma}; \quad (1.35)$$

$$dT_{c.\bar{\sigma}l} = \operatorname{tg} \varphi_0 dN_{c.\bar{\sigma}l} + c dF_{c.\bar{\sigma}l}; \quad (1.36)$$

$$dT_{бок.\bar{\sigma}l} = (\xi q \cos \rho \cos \lambda \operatorname{tg} \varphi_0 + c) dF_{c.бок.\bar{\sigma}l}, \quad (1.37)$$

де $dF_{c.\sigma}$, $dF_{c.\bar{\sigma}l}$, $dF_{бок.\bar{\sigma}l}$, – елементарні площі відповідно лобової площини сколювання при вільному і блокованому різанні та бокової площини сколювання при блокованому різанні; ρ , λ , – кути які утворюються боковою площиною сколювання з вертикальною площиною (рис. 1.7, в).

Максимальна B_p і мінімальна B_l ширини тіла сколювання рівні (рис. 1.7, б):

$$B_p = 2h_{\bar{\sigma}l,2} \operatorname{ctg} \gamma_{\kappa} + b_{\kappa}, \quad (1.38)$$

$$B_1 = 2h_{\bar{\sigma}l.2}ctg\gamma_{\kappa} + b_{\kappa} - 2h_{\bar{\sigma}}ctg\gamma, \quad (1.39)$$

де γ_{κ} – кут нахилу бічних стінок прорізу до горизонту в нижньому ярусі.

Елементарні площі будуть визначатися залежностями:

$$dF_{c.\bar{\sigma}} = (2h_{\bar{\sigma}l.2}ctg\gamma_{\kappa} - h_{\bar{\sigma}}ctg\gamma + b_{\kappa} + hctg\gamma) \frac{dh}{\sin\psi}; \quad (1.40)$$

$$dF_{c.\bar{\sigma}l} = (b_{\kappa} + 2\rho r_c) \frac{dh}{\sin\psi} = (b_{\kappa} + 2\rho(ctg\psi + ctg\alpha_p) \cdot (h_{\bar{\sigma}l.2} - h)) \frac{dh}{\sin\psi}; \quad (1.41)$$

$$dF_{\bar{\sigma}\kappa.\bar{\sigma}l} = r_c \frac{dh}{\cos\lambda} = (ctg\psi + ctg\alpha_p) \cdot (h_{\bar{\sigma}l.2} - h) \frac{dh}{\cos\lambda}, \quad (1.42)$$

де r_c – поточне значення радіуса сколювання ґрунту.

Критична глибина при комбінованому поярусному руйнуванні ґрунту буде рівна:

$$h_{кр.\kappa} = h_{\bar{\sigma}} + h_{\bar{\sigma}l.2}. \quad (1.43)$$

Якщо підставити вирази (1.34), (1.35), і (1.36) у друге рівняння системи (1.31) з врахуванням рівностей (1.32), (1.30), (1.40), (1.41) і (1.42) отримаємо рівняння:

$$\begin{aligned} & -tg\varphi_0 \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos\varphi \sin\alpha_p} b_{\kappa} \cdot q_0 \cdot \left(1 + \frac{h}{b_{\kappa}} ctg\gamma\right) dh + \\ & + c \cdot \left(\frac{2h_{\bar{\sigma}l.2}ctg\gamma_{\kappa} - h_{\bar{\sigma}}ctg\gamma}{+b_{\kappa} + hctg\gamma} \right) \frac{dh}{\sin\psi} - \\ & -tg\varphi_0 \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos\varphi \sin\alpha_p} b_{\kappa} \cdot \left(q_6 + \frac{q_{кр} - q_6}{h_{\bar{\sigma}l.2}} k_{неп} h \right) dh + \\ & + c \cdot \left(\frac{b_{\kappa} + 2\rho(ctg\psi + ctg\alpha_p)}{\times(h_{\bar{\sigma}l.2} - h)} \right) \times \frac{dh}{\sin\psi} + 2 \cos\delta \cdot \xi \cdot \left(q_6 + \frac{q_{кр} - q_6}{h_{\bar{\sigma}l.2}} k_{неп} h \right) \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \cos \rho \cdot \cos \lambda \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 (ctg \psi + ctg \alpha_p) (h_{\delta \alpha.2} - h) \frac{dh}{\cos \lambda} + \\
& + 2 \cos \delta \cdot c \cdot (ctg \psi + ctg \alpha_p) (h_{\delta \alpha.2} - h) \frac{dh}{\cos \lambda} - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} b_\kappa \times \\
& \times q_0 \cdot \left(1 + \frac{h}{b_\kappa} ctg \gamma\right) dh - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} b_\kappa \cdot \left(q_6 + \frac{q_{kp} - q_6}{h_{\delta \alpha.2}} k_{nep} h\right) dh = 0.
\end{aligned} \tag{1.44}$$

Після інтегрування та перетворень системи (1.44) отримаємо рівняння для визначення критичної глибини при комбінованому різанні ґрунту з урахуванням бічного тиску та сили бічного тертя у нижньому ярусі ($\gamma > \gamma_\kappa$, $\xi q > 0$):

$$h_{кр.к} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A}. \tag{1.45}$$

За умови, що кут γ рівний куту бокового зміщення ґрунторозробних органів нижнього ярусу відносно верхнього ($\gamma = \gamma_\kappa$), на бокових стінках елемента стружки відсутній бічний тиск ($\xi q = 0$) і сили бічного тертя. В такому випадку коефіцієнти для визначення критичної глибини комбінованого різання запишуться у вигляді:

$$\left\{ \begin{aligned}
A &= (ctg \psi + ctg \alpha_p) \cdot c \cdot \left(\frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right); \\
B &= - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} b_\kappa \left(q_6 + \frac{q_{kp} - q_6}{2} k_{nep} \right) - \\
& - 2h_\delta (ctg \psi + ctg \alpha_p) \cdot c \left(\frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) + (2h_\delta ctg \gamma_\kappa + b_\kappa) \frac{c}{\sin \psi}; \\
C &= -h_\delta^2 \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} b_\kappa \cdot \left(q_0 \left(1 + \frac{h_\delta}{2b_\kappa} ctg \gamma \right) - \left(q_6 + \frac{q_{kp} - q_6}{2} k_{nep} \right) \right) + \\
& + \left(-2h_\delta^2 ctg \gamma_\kappa - h_\delta^2 ctg \gamma \right) \frac{c}{\sin \psi} + h_\delta^2 (ctg \psi + ctg \alpha_p) \cdot c \cdot \left(\frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right).
\end{aligned} \right. \tag{1.46}$$

Графіки залежності критичної глибини комбінованого різання від ширини різання (рис. 1.8) підтверджує експериментальні дані Ю.О. Ветрова про прямопропорційну залежність між глибиною та шириною різання $h_{кр} = (2,5 \dots 4,0)b$ [4; 11].

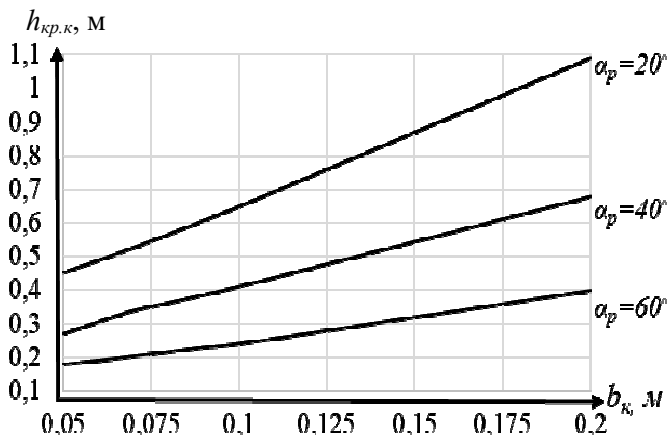


Рис. 1.8. Залежність критичної глибини комбінованого різання ґрунту $h_{кр,к}$ від ширини різання b_k для різних кутів різання (якщо $b_{\delta л} = 0,05$ м, напівтвердий суглинок, $\gamma = \gamma_k$)

Залежність кута повздовжнього зсуву ґрунту від кута різання ґрунторозробного органу для різних типів ґрунту (рис. 1.9) достатньо точно інтерполюється лінійною залежністю:

$$\psi = a_{\psi,к} + k_{\psi,к} \cdot \alpha_p \quad (1.47)$$

Значення коефіцієнтів інтерполяції кута повздовжнього зсуву ґрунту представлені в табл. 1.2. Похибка інтерполяції не перевищує 4,24%.

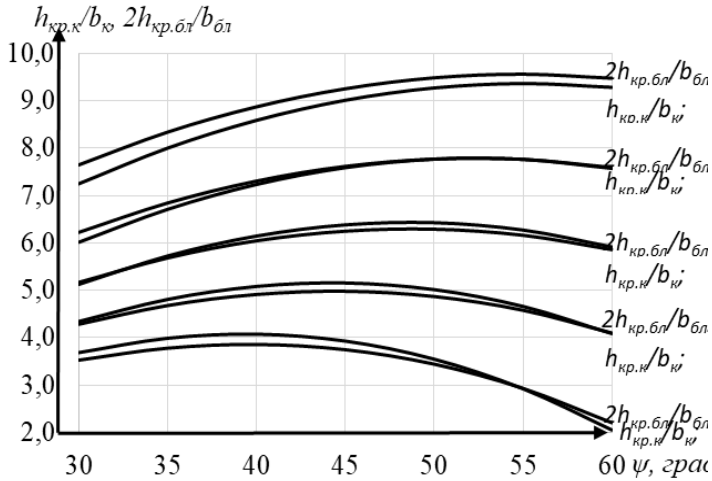


Рис. 1.9. Залежність відносної критичної глибини комбінованого різання ґрунту $h_{кр,к}/b_к$, і двох відносних критичних глибин блокованого різання ґрунту у верхньому ярусі $2h_{кр,бл}/b_{бл}$ від поздовжнього кута зсуву ψ для різних значень кута різання α_p , для напівтвердого суглинку, якщо $\gamma = \gamma_k$

Таблиця 1.2

Значення апроксимуючих коефіцієнтів критичної глибини комбінованого різання ґрунту і інтерполюючих коефіцієнтів кута поздовжнього зсуву ґрунту

Тип ґрунту	a_k	n_k	$a_{k,\psi}$	$k_{k,\psi}$
Супісок твердий	6,56	0,65	1,08	-0,349
Суглинок напівтвердий	5,556	0,557	1,046	-0,4
Глина напівтверда	5,085	0,555	1,13	-0,399
Глина тугопластична	4,856	0,572	1,13	-0,399
Суглинок твердий	5,53	0,6	1,06	-0,35

На рис. 1.9 спостерігаємо однаковий характер кривих залежності відносної глибини сколювання ґрунту від поздовжнього кута зсуву для різних значень кута різання

(комбіноване і блоковане різання), також бачимо, що відносна критична глибина при комбінованому різанні ґрунту $h_{кр.к}/b_k$ наближено рівна сумі двох критичних глибин блокованого різання $h_{кр.бл}/b_{бл}$ ($2h_{кр.бл} \approx h_{кр.к}$, і $b_k \approx b_{бл}$).

Залежність відносної глибини сколювання при комбінованому різанні ґрунту від кута різання зображена на рис. 1.10.

Із графіків зображених на рис. 1.10 бачимо, що при незмінних параметрах ножа при куті різання ($\alpha_p=20^\circ$) відносна глибина сколювання $h_{кр.к}/b_k$ для різних ґрунтів знаходиться в межах від 8 до 11,96; при ($\alpha_p=30^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ знаходиться в межах від 6,62 до 9,33; при ($\alpha_p=40^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ знаходиться в межах від 5,44 до 7,3; при ($\alpha_p=50^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ знаходиться в межах від 4,18 до 5,56; і при ($\alpha_p=60^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ знаходиться в межах від 3,08 до 4. Якщо наявний бічний тиск на бокових гранях елемента стружки $\gamma_k = 80^\circ$, критична глибина значно зменшується при незмінних параметрах ножа ($\alpha_p = 20^\circ$) відносна глибина сколювання з врахуванням бокового тиску при $h_{кр.к}/b_k$ для різних ґрунтів знаходиться в межах від 7,36 до 9,2; при ($\alpha_p=30^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ знаходиться в межах від 6,22 до 7,28; при ($\alpha_p=40^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ знаходиться в межах від 5,1 до 5,65; при ($\alpha_p=50^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ знаходиться в межах від 3,96 до 4,23; і при ($\alpha_p=60^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ знаходиться в межах від 2,93 до 3,17.

Математична модель (1.45) з урахуванням (1.46) громіздка і незручна для практичних розрахунків. З метою її спрощення проведена її апроксимація. В результаті отримано залежність для визначення критичної глибини комбінованого різання ґрунтів

$$\frac{h_{кр.к}}{b_k} = \frac{a_k}{(\operatorname{tg} \alpha_p)^{n_k}}, \quad (1.48)$$

де a_k і n_k – коефіцієнти апроксимації, які залежать від фізико-механічних властивостей ґрунту (див. табл. 1.2).

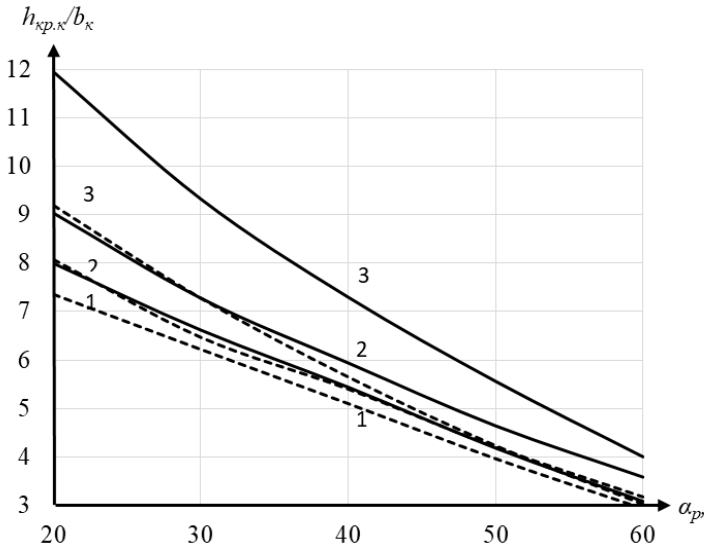


Рис. 1.10. Залежність відносної глибини сколювання ґрунтів $h_{кр.к}/b_k$ від кута різання ножа α_p : 1 – напівтверда глина; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – твердий супісок; - - - - з урахуванням бічного тиску ($\gamma_k = 80^\circ, \xi q > 0$); - - - - - без бічного тиску ($\gamma = \gamma_k, \xi q = 0$)

Значення коефіцієнтів апроксимації змінюються для ґрунтів другої і третьої категорій в межах: $a_k = 4,856 \dots 6,56$; $n_k = 0,555 \dots 0,65$.

1.3. ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ГЛИБИНИ ПРИ АСИМЕТРИЧНОМУ БЛОКОВАНОМУ ТА НАПІВБЛОКОВАНОМУ РІЗАННІ ҐРУНТУ

Копання траншей одноківшевыми та багатоківшевыми екскаваторами здійснюється в умовах обмеження робочих органів боковими вертикальними стінками. Руйнування ґрунту крайніми боковими різцями (зубами), що встановлені на робочих органах екскаваторів, здійснюється з обмеженням робочого процесу цими вертикальними стінками з однієї сторони різця. З іншої сторони різець взаємодіє з масивом ґрунту, утворюючи прорізь з одностороннім розвалом, або не взаємодіє, як при вільному різанні. У першому випадку різець здійснює блоковане асиметричне різання, а в другому випадку – напівблоковане різання.

Середні різці ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів і зуби ковшів одноківшевих екскаваторів працюють в умовах симетричного блокованого, напівблокованого, вільного та комбінованого (при двоярусній схемі розробки) різання, а крайні бокові різці – в умовах асиметричного блокованого або напівблокованого різання. Критичні глибини симетричного блокованого, напівблокованого та комбінованого різання визначені в літературі [9; 5; 12].

Визначимо критичну глибину асиметричного блокованого різання ґрунту в траншеї біля вертикальної стінки, яка обмежує простір руйнування різця з однієї сторони. З цією метою розроблена розрахункова схема взаємодії прямолінійного різця з ґрунтом (рис. 1.11). Задача вирішується з відомими припущеннями [5].

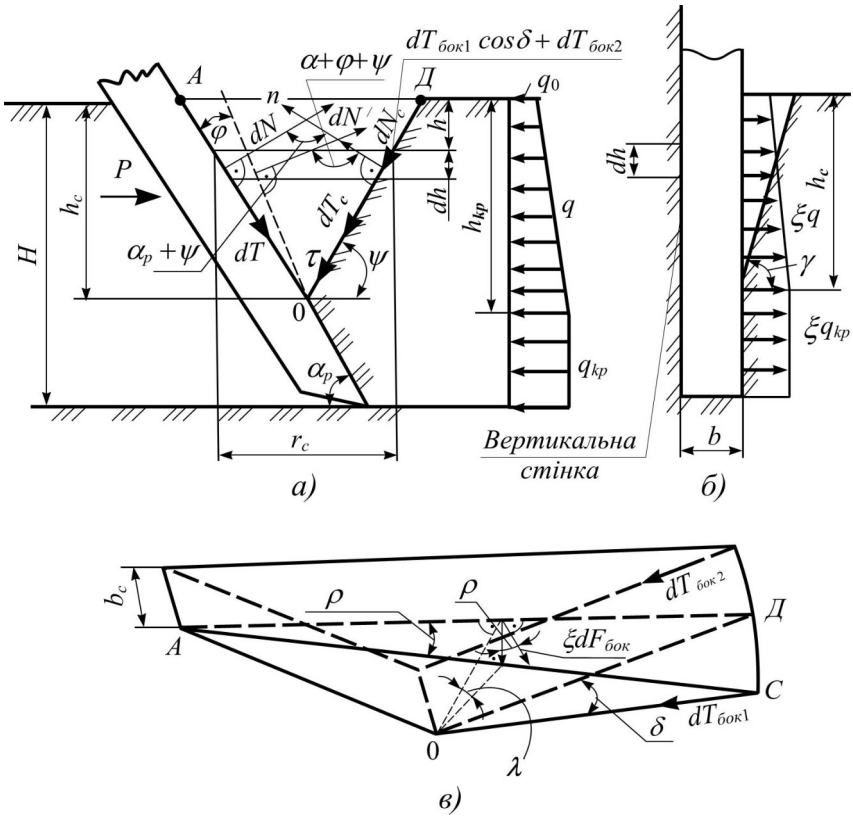


Рис. 1.11. Схема взаємодії крайнього бокового різця з ґрунтом при асиметричному блокованому різанні: а) – у поздовжній площині; б) – у поперечній площині; в) – форма елемента стружки

На елементарний об'єм елемента стружки висотою dh у момент попередній сколюванню ґрунту різцем діють наступні сили, які приведені у вертикальну площину OAD (див. рис. 1.11, а): активна сила $dN' = \frac{dN}{\cos\phi}$, яка напрямлена під кутом зовнішнього тертя ґрунту ϕ до нормалі лобової площини різця; нормальна реакція dN_c і дотичні сили dT_c , $dT_{бок1} + \cos\delta$ і $dT_{бок2}$ у площині зсуву

грунту. Тоді система рівнянь рівноваги всіх сил на нормальну (n) і дотичну (τ) осі до лобової площини сколювання мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} \sum P_n = dN_c + dN' \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0 \\ \sum P_\tau = dT_c + dT_{\text{бок1}} \cos \delta + dT_{\text{бок2}} - dN' \sin(\alpha_p + \varphi + \psi) \end{cases} \quad (1.49)$$

З першого рівняння системи (1.49) отримаємо (1.50).

$$dN_c = \frac{-dN}{\cos \varphi} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = \frac{-qb_p}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) dh \quad (1.50)$$

де q – закон розподілення нормального тиску на лобову площину різця по глибині; b_p – ширина різця; φ – кут зовнішнього тертя ґрунту; α_p – кут різання різця; ψ – кут зсуву ґрунту різцем у поздовжній площині; dh – елементарна глибина різання.

Закон розподілення нормального тиску на ніж по глибині представлено у вигляді лінійного закону на основі теорії різання ґрунтів [4].

З урахуванням (1.11) вираз (1.50) перепишеться наступним чином

$$dN_c = \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} b_p \left(q_0 + \frac{q_{xp} - q_0}{h_c} k_{nep} h \right) dh \quad (1.51)$$

Елементарні дотичні сили, які діють у лобовій (dT_c) і бокових ($dT_{\text{бок1}}$, $dT_{\text{бок2}}$) площинах сколювання визначається за законом Кулона для ґрунтів

$$dT_c = \text{tg } \varphi_0 dN_c + c dF_c; \quad (1.52)$$

$$dT_{\text{бок1}} = (\xi q \cos \rho \cos \lambda \text{tg } \varphi_0 + c) dF_{\text{бок1}}; \quad (1.53)$$

$$dT_{\text{бок}2} = (\xi q \operatorname{tg} \varphi_0 + c) dF_{\text{бок}2}, \quad (1.54)$$

де φ_0 – кут внутрішнього тертя ґрунту; c – коефіцієнт зчеплення ґрунту; ξ – коефіцієнт бокового тиску елемента ґрунтової стружки; dF_c , $dF_{\text{бок}1}$, $dF_{\text{бок}2}$ – елементарні площі відповідно лобової і бокових площин сколювання; ρ , δ , λ – кути, що утворюються боковою площиною сколювання з паралельною вертикальній боковій стінці траншеї площиною (див. рис. 1.11, в).

Елементарні площі відповідно дорівнюють:

$$dF_c = (b_p + \rho r_c) \frac{dh}{\sin \psi} = \left[b_p + \rho (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) (h_c - h) \right] \frac{dh}{\sin \psi}, \quad (1.55)$$

$$dF_{\text{бок}1} = r_c \frac{dh}{\cos \lambda} = (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) (h_c - h) \frac{dh}{\cos \alpha}, \quad (1.56)$$

$$dF_{\text{бок}2} = r_c \cdot dh = (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) (h_c - h) dh, \quad (1.57)$$

де r_c – поточне значення радіуса сколювання ґрунту.

Якщо підставити вирази (1.52–1.54) у друге рівняння системи (1.49) з урахуванням залежностей (1.51), (1.55–1.57) і проінтегрувати його в межах від 0 до h_c , то після проміжних алгебраїчно-тригонометричних перетворень отримаємо рівняння:

$$\left. \frac{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi}{2} \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{c\rho}{\sin \psi} + c \left(1 + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) \right] + \\ & + \xi \left(q_0 + \frac{q_{\text{кр}} - q_0}{3} k_{\text{неп}} \right) \cos \rho \cos \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 + \xi \operatorname{tg} \varphi_0 \end{aligned} \right\} \right\} h_c =$$

$$= \left[\left(q_0 + \frac{q_{\text{кр}} - q_0}{2} k_{\text{неп}} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi} \right] b_p. \quad (1.58)$$

Звідки після інтегрування та проміжних перетворень отримаємо

$$h_{кр} = \frac{h_c}{k_{неп}} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неп} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \rho \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\frac{\text{ctg} \alpha_p + \text{ctg} \psi}{2} k_{неп} \left[c \left(1 + \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) + \xi \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \text{tg} \varphi_0 (1 + \cos \rho \cos \delta) \right]} \quad (1.59)$$

Кути ρ , δ , λ визначаються із геометричних співвідношень (див. рис. 1.11, в) за (1.19–1.21).

Кут нахилу бокової площини елемента стружки до горизонту γ визначається за залежністю (1.60) [10].

$$\gamma = \arccos \left[\frac{c \cdot \cos \varphi_0}{\left(1 - 0,74 \text{tg} \varphi_0 - \frac{1,52 \cdot c}{q_{кр}} \right) q_{сеп}} \right] - \varphi_0, \quad (1.60)$$

$$q_{сеп} = \frac{q_0 + q_{кр}}{2}. \quad (1.61)$$

Математична модель (1.59) може бути використана для визначення критичної глибини різання при поперушній розробці ґрунту. Умови руйнування ґрунту у верхньому та наступних нижніх ярусах неідентичні. Верхній ґрунторозробний орган (різець) внаслідок впливу денної поверхні працює в умовах асиметричного блокованого різання: з однієї сторони різець обмежений вертикальною боковою стінкою траншеї, з іншої сторони – масивом ґрунту, що руйнується і виходить на денну поверхню. В результаті утворюється проріз з одностороннім боковим розвалом зі сторони

денної поверхні ($\rho > 0$), а з іншої сторони з вертикальною стінкою ($\rho = 0$) (див. рис. 1.11). Зі сторони бокового розвалу ґрунт руйнується переважно за рахунок деформації відриву, а тому на боковій площині елемента стружки з розвалом відсутні бічний тиск і сили тертя ($\xi q = 0$) [13]. Зі сторони вертикальної стінки ґрунт руйнується за рахунок деформації зрізу та зсуву, а тому на бічній вертикальній площині елемента стружки виникають нормальний тиск ($\xi q > 0$) і сили тертя ($\xi q \operatorname{tg} \varphi_0 > 0$). При цьому верхній різець створює вільний простір з розміром b_p денної поверхні для виходу ґрунту із нижнього ярусу. Внаслідок цього нижні ґрунторозробні органи формують прямокутну щілину ($\rho = 0$). Формування прорізу в нижньому ярусі здійснюється також за рахунок деформацій зрізу та зсуву, ($\xi q > 0$; $\xi q \operatorname{tg} \varphi_0 > 0$).

З урахуванням цих особливостей залежність (1.59) для визначення критичних глибин асиметричного блокованого різання у верхньому і наступних нижніх ярусах переписеться наступним чином

$$h_{\text{кр}1} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{\text{кр}} - q_0}{2} k_{\text{неп}} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi}{2} k_{\text{неп}} \left[c \left(1 + \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) + \xi \left(q_0 + \frac{q_{\text{кр}} - q_0}{3} k_{\text{неп}} \right) \operatorname{tg} \varphi_0 \right]} b_p, \quad (1.62)$$

$$h_{\text{кр}2} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{\text{кр}} - q_0}{2} k_{\text{неп}} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{(\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) k_{\text{неп}} \left[c + \xi \left(q_0 + \frac{q_{\text{кр}} - q_0}{3} k_{\text{неп}} \right) \operatorname{tg} \varphi_0 \right]} b_p. \quad (1.63)$$

Залежність (1.63) ідентична залежності для визначення критичної глибини різання в нижніх ярусах, що представлена в літературі [5]. Це підтверджує достовірність математичної моделі (1.59).

Якщо крайні бокові різці здійснюють напівблоковане різання (блокування однієї бокової грані різця вертикальною стінкою), $dT_{бок1} = 0$.

$$h_{кр1нбл.} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неp} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi}{2} k_{неp} \left[c + \xi \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неp} \right) \operatorname{tg} \varphi_0 \right]} b_p. \quad (1.64)$$

Порівнявши залежності (1.63) і (1.64), можна зробити висновок, що критична глибина напівблокованого різання крайніми боковими різцями у верхньому ярусі в 2 рази більша за критичну глибину блокованого різання у нижньому ярусі, якщо $\gamma = \pi/2$.

У залежностях (1.62), (1.63) і (1.64) невідомим є параметр ψ . Він визначається на основі припущення, що кожний раз для $h_p \geq h_{кр}$ значення кута сколювання ψ встановлюється таким, що опір різанню ножа буде мінімальним. Мінімальний опір різанню (для заданої глибини різання $h_p \geq h_{кр}$) ножа можливий при мінімальній площі епюри нормального тиску, а це буде, якщо $h_{кр} = h_c/k_{неp} = \max$ і $h_c = \max$. Таким чином, кут зсуву ґрунту визначається максимальним значенням глибини сколювання [5; 10].

Залежності відносної критичної глибини різання у верхньому ярусі від кута зсуву ґрунтів зображені на рис. 1.12, 1.13, а від кута різання різця – на рис. 1.14.

Розрахункові залежності показують, що при зменшенні кута різання різця від 50° до 20° відносна критична глибина асиметричного блокованого різання ($h_{кр1}/b_p$) збільшується: для тугопластичної та напівтвердої глини від 1,71 до 3,12; для напівтвердого суглинку від 1,76 до 3,27; для твердого супіску від 1,78 до 3,75.

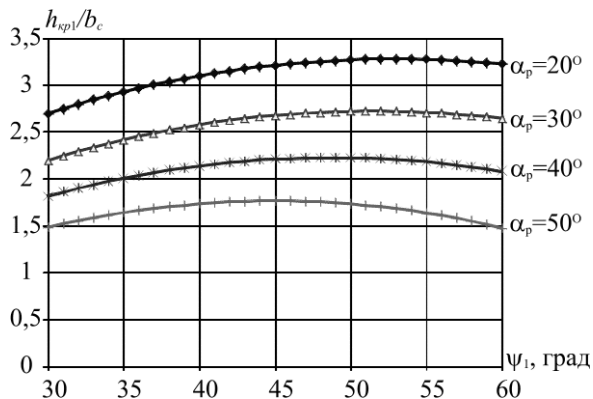


Рис. 1.12. Залежність відносної критичної глибини асиметричного блокованого різання боковими різцями від кута зсуву для напівтвердого суглинку

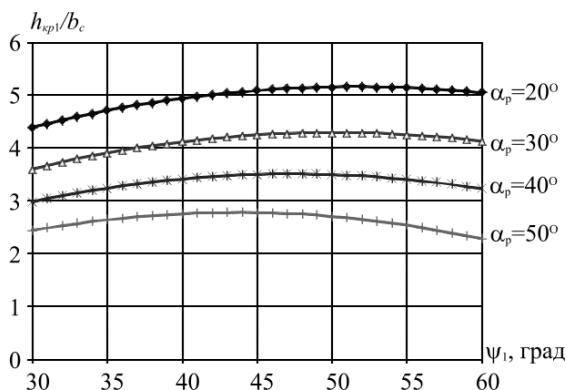
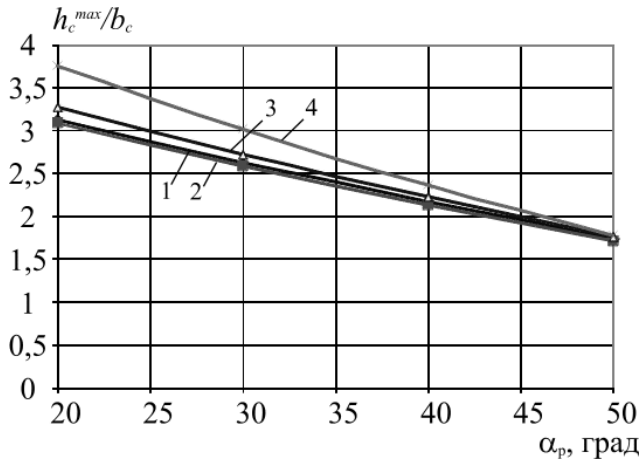
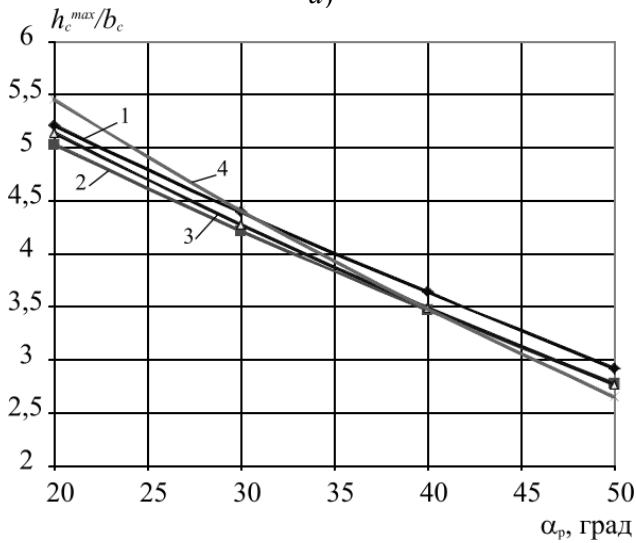


Рис. 1.13. Залежність відносної критичної глибини напівблокованого різання боковими різцями від кута зсуву для напівтвердого суглинку



a)



б)

Рис. 1.14. Залежності відносної критичної глибини різання ґрунтів від кута різання бокових різців: а) – для асиметричного блокованого різання; б) – для напівблокованого різання; 1 – тугопластична глина; 2 – напівтверда глина; 3 – напівтвердий суглинок; 4 – твердий супісок

Для напівблокованого різання ця глибина збільшується: для тугопластичної глини від 2,92 до 5,21; для напівтвердої глини від 2,78 до 5,03; для напівтвердого суглинку від 2,77 до 5,14; для твердого супіску від 2,65 до 5,45. Математичні моделі (1.62) і (1.64) є громіздкими та незручними для вирахування критичної глибини різання. З метою її спрощення проведена апроксимація в межах кута різання різця $\alpha_p = 20 \dots 50^\circ$. Похибка апроксимації не перевищує 3,4%. У результаті отримана лінійна залежність

$$\frac{h_{кр1}}{b'_p} = a' - n' \cdot \alpha_p, \quad (1.65)$$

де a' та n' – коефіцієнти апроксимації, що залежать від типу ґрунту та різання; α_p – кут різання різця в градусах.

Значення коефіцієнтів апроксимації для бокових різців представлені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Значення коефіцієнтів апроксимації для бокових різців

Тип різання Тип ґрунту	Асиметричне блоковане		Асиметричне напівблоковане	
	a'	n'	a'	n'
Тугопластична глина	4,02	0,046	6,70	0,076
Напівтверда глина	3,98	0,046	6,50	0,075
Напівтвердий суглинок	4,26	0,050	6,69	0,079
Твердий супісок	5,02	0,066	7,26	0,093

Отримані математичні моделі (1.63), (1.64) і (1.65) дозволяють у кожному конкретному випадку на основі вихідних даних про талі ґрунти, що рекомендують БНіП, у залежності від кута різання різця в межах кута різання 20° – 50° визначити критичну глибину різання для крайніх бокових різців багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів.

Отримані математичні моделі для визначення критичної глибини різання для крайніх бокових різців багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів, що працюють в умовах асиметричного бокового різання та напівблокованого різання.

Критична глибина напівблокованого різання крайніми боковим різцями у верхньому ярусі в 2 рази більша за критичну глибину різання асиметричного блокованого різання у нижньому ярусі, якщо $\gamma = \pi/2$.

Розрахункові значення відносної критичної глибини асиметричного блокованого та напівблокованого різання для крайніх бокових різців змінюється відповідно в межах (при зміні кута різання $\alpha_p = 50^\circ \dots 20^\circ$): для тугопластичної глини $h_{кр1}/b_p = 1,74 \dots 3,12; 2,92 \dots 5,21$; для напівтвердого суглинку $h_{кр1}/b_p = 1,76 \dots 3,27; 2,77 \dots 5,14$; для твердого супіску $h_{кр1}/b_p = 1,78 \dots 3,75; 2,65 \dots 5,45$; для напівтвердої глини $h_{кр1}/b_p = 1,71 \dots 3,08; 2,78 \dots 5,03$.

1.4. СУТЬ НАУКОВГО ВІДКРИТТЯ

Для усунення закритичної зони ущільнення ґрунту і зниження енергоємності робочого процесу формування щілини на глибину $h > h_{кр}$ повинно здійснюватися багатоярусними землерийними робочими органами (ЗРО), в яких висота ярусів не перевищує критичної глибини різання. При цьому мінімальна кількість ярусів визначається із нерівності [14; 1].

$$Z_{min} > 1 + \frac{H - h_{кр1}}{h_{кр2}}, \quad (1.66)$$

де H – повна глибина різання (глибина укладання); $h_{кр1}$, $h_{кр2}$ – критична глибина різання у верхньому і наступних за ним нижніх ярусах, відповідно.

У результаті теоретичних та експериментальних досліджень багатоярусного руйнування ґрунтів зареєстроване **наукове відкриття у формі наукової ідеї** [15] та встановлені наступні закономірності процесу (за інших рівних умов) (рис. 1.15):

- у верхньому ярусі зона відділення ґрунту від масиву звужується до ширини наступних ярусів;

- у наступних ярусах ширина руйнування ґрунту, незалежно від їх кількості, залишається постійною;

- у наступних ярусах граничні глибини руйнування ґрунту з відокремленням від масиву рівновеликі і менше такої у верхньому ярусі;

- граничний радіус зони руйнування у верхньому ярусі значно більший, ніж у наступних, а частота відокремлення тіл сколювання від масиву і, відповідно, гарантований ступінь руйнування – менші;

- зазначені закономірності відповідають мінімальному опору руйнуванню ґрунтів.

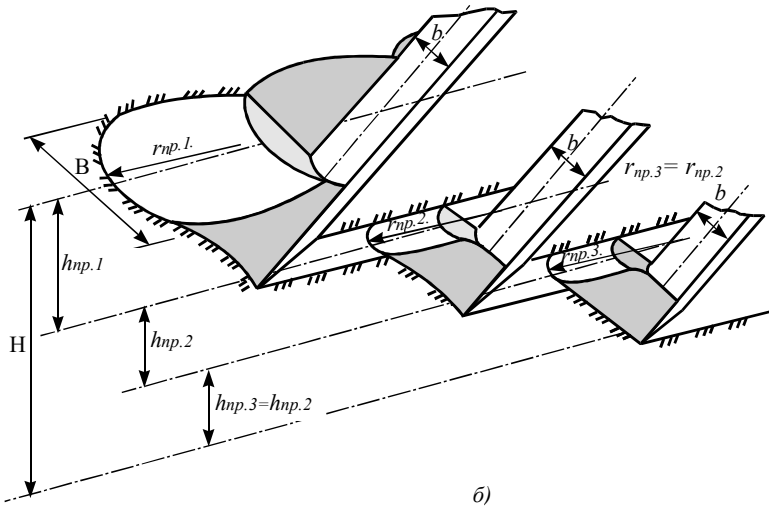
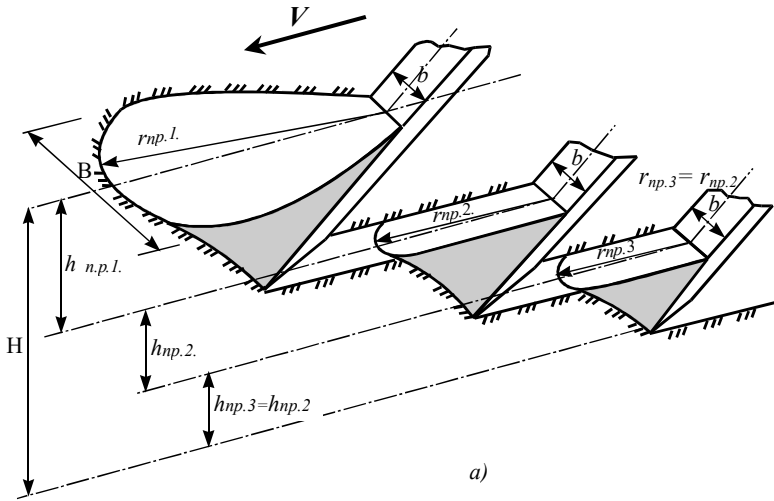


Рис. 1.15. Схема руйнування ґрунту з відділенням від масиву:
 а) – при заглибленні в масив та відділенні перших тіл сколювання;
 б) – в усталеному режимі роботи

Викладені закономірності є наслідком відмінностей деформаційних процесів у верхньому та наступних ярусах і відображені у формулі наукової ідеї.

Формула наукової ідеї

Обґрунтовано, що при багатоярусному просторовому руйнуванні масиву гірських порід однакового складу, викликаному природними або штучними джерелами (землетрусами, вулканізмом, техногенним впливом), граничні глибини та радіуси руйнування у верхньому ярусі значно більші, а ступінь руйнування менший у порівнянні з цими ж параметрами руйнування в нижніх ярусах.

2. ПРИНЦИПИ СТВОРЕННЯ БАГАТОЯРУСНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ

Форма і параметри багатоярусних робочих органів залежать від їхнього цільового призначення та параметрів ЛПО, що вкладаються. Так, діаметр ЛПО задає мінімальну ширину щілини і ґрунторозробного інструмента, критичну глибину різання, а отже при заданій глибині укладання ЛПО і мінімальну кількість ґрунторозробних ярусів.

Визначальною операцією при поярусній розробці є транспортування ґрунту, яке здійснюється із зони різання кожного ярусу в напрямку простору з найменшим опором переміщенню. Інтуїтивно вибрана багатоярусна конструкція ЗРО без обґрунтованого вибору форми і параметрів ярусів, а також напрямку транспортування ґрунту, не дозволяє уникнути техногенно-екологічних змін у навколишньому середовищі і знизити енергоємність різання.

Для вирішення цієї проблеми при створенні багатоярусних ЗРО, в яких ширина ярусів закономірно збільшується від нижнього ярусу до верхнього або є незмінною, розроблені наступні принципи їх створення:

- принцип незалежності роботи попередніх ґрунторозробних органів від наступних (п. 2.1);

- принцип рівності об'ємних витрат ґрунту в суміжних ярусах (п. 2.2);

- принцип рівності масових витрат ґрунту в суміжних ярусах при $\rho_{вих} = \rho_{ex}$ (п. 2.3);

- принцип рівності площ поперечного перерізу зрізаного шару ґрунту і прохідних вікон (п. 2.4).

2.1. ПРИНЦИП НЕЗАЛЕЖНОСТІ РОБОТИ ПОПЕРЕДНІХ ҐРУНТОРОЗРОБНИХ ОРГАНІВ ВІД НАСТУПНИХ

Суть принципу: поділ різального інструменту на ґрунторозробні органи і розміщення їх в просторі повинні проводити таким чином, щоб кожний попередній ґрунторозробний орган створював найбільш сприятливі умови розробки ґрунту для кожного наступного органа (рис. 2.1).

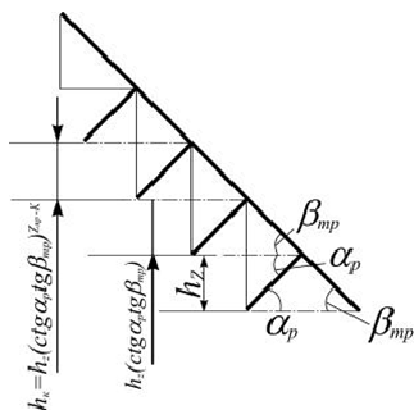


Рис. 2.1. Схема рознесення ґрунторозробних органів у профільній і горизонтальній площинах (принцип незалежності роботи)

За принципом незалежності роботи попередніх ґрунторозробних органів від наступних, їх рознесення по вертикалі здійснюється на наступну величину (див. рис. 2.1):

$$h_k = h_z \left(\text{ctg} \alpha_p \cdot \text{tg} \beta_{mp} \right)^{Z_{yp} - K} \leq h_{kp}, \quad (2.1)$$

де h_k – висота k -го ярусу; K – його порядковий номер, рахуючи зверху вниз; h_z – висота розробки ґрунту в нижньому ярусі;

$Z_{яp}$, α_p , β_{mp} – відповідно кількість ярусів, кути різання і нахил несучої рами до горизонту в напрямку руху (при рівності $\alpha_p = \beta_{mp}$ маємо рівномірне рознесення ярусів $h_k = h_z$); $h_{кр}$ – критична глибина різання.

Наслідком реалізації принципу є зменшення сил тертя шарів ґрунту по направляючих і їхнього підпресування при русі в між'ярусному просторі, а також енергоємності робочого процесу.

Вільному (з мінімальним ущільненням) транспортуванню ґрунту безвідвальними робочими органами сприяє створення між боковими стінками щілини і суміжними ґрунторозробними органами прохідних вікон для спрямування ґрунту в напрямку порожнини, яка утворена попереднім ґрунторозробним органом. При цьому ґрунт транспортується плоскими або криволінійними направляючими.

2.2. ПРИНЦИП РІВНОСТІ ОБ'ЄМНИХ ВИТРАТ ҐРУНТУ В СУМІЖНИХ ЯРУСАХ

Суть принципу: транспортування ґрунту в напрямку штучно створеної попереднім органом порожнини здійснювати для безвідвальних ЗРО за умови, щоб об'ємні витрати ґрунту, який поступає на ґрунторозробний орган у нижньому ярусі, не перевищували б об'ємних витрат ґрунту, який проходить через вікна в суміжному верхньому ярусі (рис. 2.2).

Об'єм ґрунту, який надходить на ґрунторозробний орган за одиницю часу в нижньому ярусі, дорівнює добутку площі трапеції $a_z b_z c_z d_z$ (див. рис. 2.2, б), що утворюється різальними кромками 2

двох суміжних ґрунторозробних органів і боковими стінками щілини б (площа поперечного перерізу зрізаного шару ґрунту), на переносну швидкість робочого органа \mathcal{Q} . Об'єм ґрунту, який проходить за той же час через прохідні вікна 5 у суміжному верхньому ярусі між різальними кромками 2, несучою рамою 1 і боковими стінками б щілини, дорівнює добутку суми площ $a'b'c'd' + a''b''c''d''$ на відносну швидкість ґрунту \mathcal{Q}_2 після розробки у нижньому ярусі (на вході і виході із прохідних вікон). Тоді принцип запишеться у такому вигляді:

$$\frac{B_Z + B_{Z-1}}{2} h_Z \mathcal{Q} \leq \left(\frac{B_{Z-1} + B_{Z-2}}{2} - B_Z \right) \frac{h_{Z-1}}{\sin \beta_{mp}} \mathcal{Q}_1, \quad (2.2)$$

де h_{Z-1} – висота другого знизу ярусу.

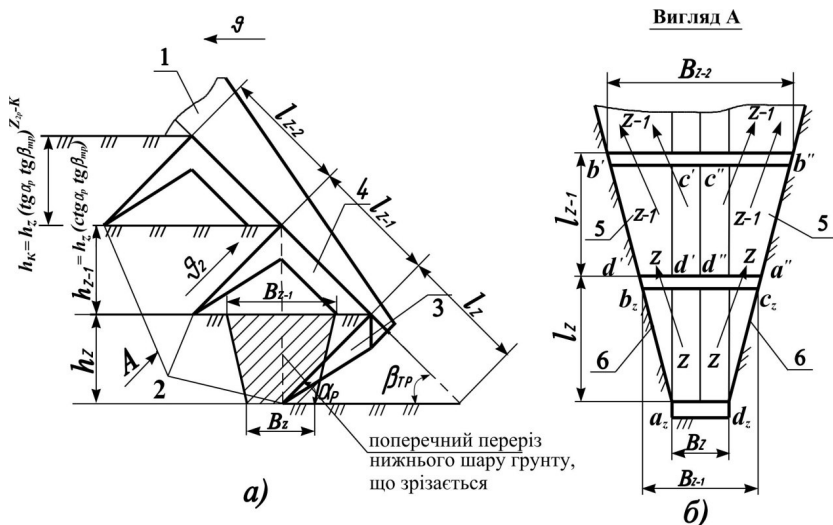


Рис. 2.2. Реалізація принципів незалежності роботи ґрунторозробних органів і рівності об'ємних (масових) витрат ґрунту у суміжних ярусах:
 а) вигляд збоку; б) вигляд А: 1 – рама; 2 – різальні кромки;
 3 – ґрутонаправляючі площини; 4 – клиновидний ґрунторозсікач;
 5 – прохідні вікна; 6 – бокові стінки щілини

Площа прохідних вікон регулюється кутом нахилу несучої рами до горизонту β_{mp} .

Принцип доцільно покласти в основу створення ЗРО тоді, коли ступінь розпушеності і оструктурення в зоні дії робочого органа не мають суттєвого значення, а головним є зменшення енергоємності робочого процесу і збереження родючого шару в ґрунтах з твердими включеннями.

Відмінною особливістю принципу є те, що ґрунт, зруйнований і розпушений у нижньому ярусі щільністю $\rho_{вж}$, в процесі транспортування його через прохідні вікна суміжного верхнього ярусу ущільнюється до природної щільності ρ_{np} . Для цього витрачається додаткова енергія на стискання ґрунту і його транспортування.

2.3. ПРИНЦИП РІВНОСТІ МАСОВИХ ВИТРАТ ҐРУНТУ В СУМІЖНИХ ЯРУСАХ

Суть принципу: маса ґрунту, яка надходить на ґрунторозробний орган за одиницю часу в нижньому ярусі, дорівнює добутку площі трапеції $a_z b_z c_z d_z$ (див. рис. 2.2, б), що утворюється різальними кромками 2 двох суміжних ґрунторозробних органів і боковими стінками щілини 6 (площа поперечного перерізу зрізаного шару ґрунту), на переносну швидкість робочого органа ϑ і на природну щільність ґрунту ρ_{np} . Маса ґрунту, яка проходить за той же час через прохідні вікна 5 у суміжному верхньому ярусі між різальними кромками 2, несучою рамою 1 і боковими стінками 6 щілини, дорівнює добутку суми

площ $a'b'c'd' + a''b''c''d''$ на відносну швидкість ґрунту \mathcal{G}_2 і на щільність ґрунту ρ_{ex} після розробки у нижньому ярусі (на вході і виході із прохідних вікон). Тоді принцип запишемо у такому вигляді:

$$\frac{B_Z + B_{Z-1}}{2} h_Z \mathcal{G} \rho_{np} \leq \left(\frac{B_{Z-1} + B_{Z-2}}{2} - B_Z \right) \frac{h_{Z-1}}{\sin \beta_{mp}} \mathcal{G}_ч \rho_{ex}, \quad (2.3)$$

де h_{Z-1} – висота другого знизу ярусу.

Якщо $\rho_{ex} = \rho_{np}$, маємо принцип рівності об'ємних витрат ґрунту в суміжних ярусах.

Принцип доцільно використовувати тоді, коли основними вимогами є оструктурування і високий ступінь розпушеності важких меліоративних ґрунтів з ілювіальним горизонтом, коли потрібно забезпечити максимальну вологоакумулюючу властивість підорних горизонтів, надійний гідравлічний зв'язок між дренажним улаштуванням і родючим шаром ґрунту та якщо агротехнічними вимогами не допускається винесення на денну поверхню неродючих шарів ґрунту.

2.4. ПРИНЦИП РІВНОСТІ ПЛОЩ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ЗРІЗАНОГО ШАРУ ҐРУНТУ І ПРОХІДНИХ ВІКОН

Суть принципу: транспортування ґрунту в напрямку штучно створеної попереднім органом порожнини здійснювати для відвальних ЗРО за умови, що площа поперечного перерізу зрізаного шару ґрунту не більша площі прохідних вікон у кожному

ярусі (рис. 2.3).

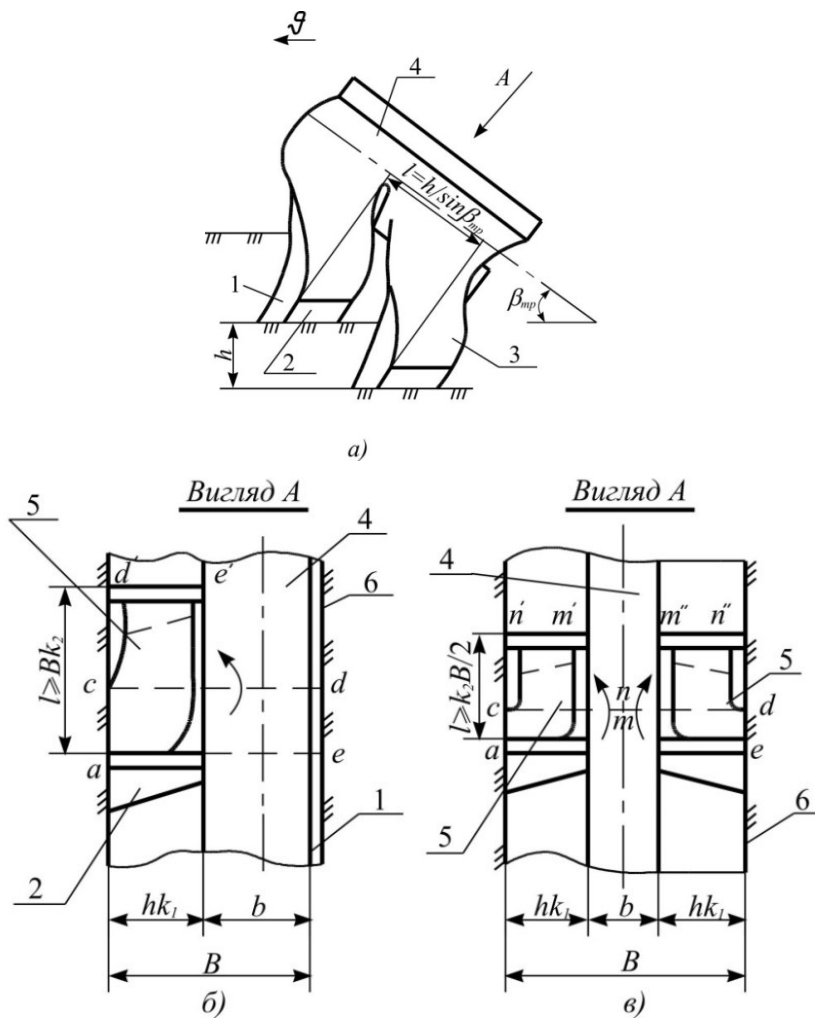


Рис. 2.3. Реалізація принципу рівності площ поперечного перерізу зрізаного шару ґрунту і прохідних вікон у кожному ярусі: *a* – вигляд збоку; *б, в* – вигляд *A* відповідно для асиметричного і симетричного руйнування ґрунту: 1 – відрізаючий ніж; 2 – леміш; 3 – відвал; 4 – рама-укладальник; 5 – зрізаний шар ґрунту; 6 – бокова стінка щілини

Проблема керованої поярусної подачі ґрунту відвальними робочими органами вирішується утворенням прохідних вікон у межах кожного ярусу для спрямування ґрунту із зони різання в порожнину щілини, що формується. При цьому довжина вікон l не менша ширини ярусу B (ґрунтового пласта), а ширина $(B - b)$ – не менша його висоти h з урахуванням збільшення лінійних розмірів при розробці.

Щілина формується за принципом багатоярусного різання з постійною шириною захвату (симетричного або асиметричного). Зрізані шари ґрунту скеровано транспортують через прохідні вікна 5, за рахунок встановлення криволінійних відвалів 3. Останні піднімають і повертають шар ґрунту на кут $\pi/2$ у фронтальній площині, зрізаний ножами 1, 2, і спрямовують у прохідні вікна 5, утворені між суміжними ґрунторозробними органами шириною B , несучою рамою 4 шириною ϵ і бічними стінками 6 щілини, що нарізується.

Прохідні вікна мають ширину $B - \epsilon \geq hk_1$ на рис. 2.3, b і $\frac{B - \epsilon}{2} \geq hk_1$ на рис. 2.3, ϵ і відповідно довжину $l = \frac{h}{\sin \beta_{mp}} \geq Bk_2$, де h – висота ярусу (відстань, на яку рознесені ґрунторозробні органи по вертикалі); β_{mp} – кут нахилу несучої рами до горизонту; $k_{1,2}$ – коефіцієнти збільшення лінійних розмірів ґрунтового пласта при розробці.

Площа одного прохідного вікна 5 на рис. 2.3, b або двох прохідних вікон 5 на рис. 2.3, ϵ у кожному ярусі,

$F_{\epsilon} = (B - \epsilon) \frac{h}{\sin \beta_{mp}}$, дорівнює або більша площі поперечного

перерізу шару ґрунту, який зрізується ножами 1, 2.

Якщо товщина (висота) шару ґрунту дорівнює h , то площа поперечного перерізу цього шару складає $F_1 = Bhk_1k_2$. Беручи до уваги, що розрізаючий ніж 1 на рис. 2.3, в розміщений на осі симетрії підрізаючих ножів 2 і розділяє шар ґрунту, що знімається, на дві рівні частини або смуги, то площа поперечного перерізу кожного шару, який направляється у вікна 5 на рис. 2.3, ϵ дорівнює

$F_{1,2} = \frac{B}{2} hk_1k_2$. Далі шар ґрунту обтікає несучу раму 4, повертається в

фронтальній площині на кут $\pi/2$ у зворотному напрямку і укладається в порожнину щілини максимально розпушеним. Робочий процес на рис. 2.3, ϵ , крім іншого, характеризується симетричністю навантаження по фронту розробки ґрунту і, як наслідок, зниженням енергоємності через усунення сил тертя на польовій дощі внаслідок зрівноваження сил по фронту.

Реалізація таких принципів робочого процесу дозволяє проводити якісну поярусну відвальну обробку ґрунту по глибині і ширині захвату без винесення неродючих шарів на денну поверхню. Це має особливе значення для покращення структури глинистих ґрунтів пластичної консистенції, які не піддаються якісній обробці безвідвальними робочими органами.

3. РОЗРАХУНОК ТА КОНСТРУКЦІЯ БАГАТОЯРУСНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ

У результаті проведених аналітичних та експериментальних досліджень кожного принципу отримано математичні моделі для визначення оптимальних параметрів принципово нових багатоярусних землерийних робочих органів [1; 5; 10; 16].

На основі отриманих математичних моделей здійснена практична реалізація наведених принципів шляхом розробки алгоритмів розрахунку основних параметрів багатоярусних ЗРО: для двоярусних ножів з плоскими та криволінійними різальними частинами; багатоярусних безвідвальних ЗРО, що працюють за принципами рівності об'ємних і масових витрат ґрунту в суміжних ярусах; багатоярусних ЗРО відвального типу, що працюють за принципом рівності площ поперечного перерізу зрізаного шару ґрунту та прохідних вікон кожного ярусу; критичноглибинних двох'ярусних глибокорозпушувачів ґрунту, що працюють за комбінованим принципом різання.

3.1. АЛГОРИТМИ РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ

Розрахункові схеми та блок-схеми алгоритмів зображені на рис. 3.1–3.13.

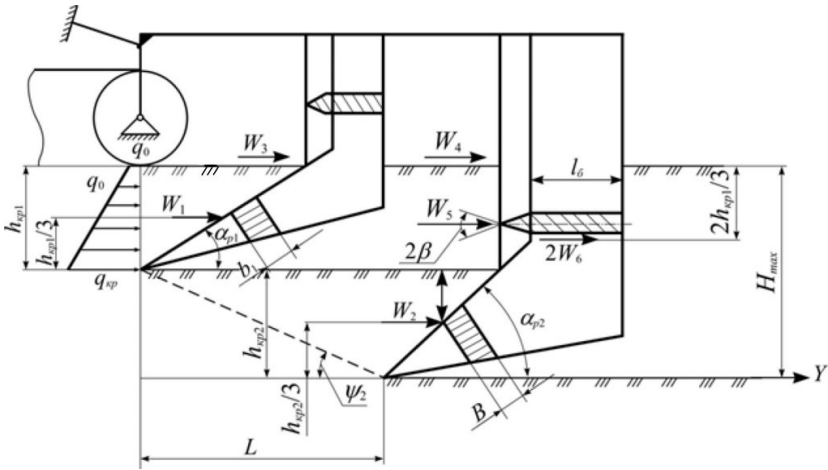


Рис. 3.1. Схема двоярусної розробки щілини ножами з плоскими різальними частинами

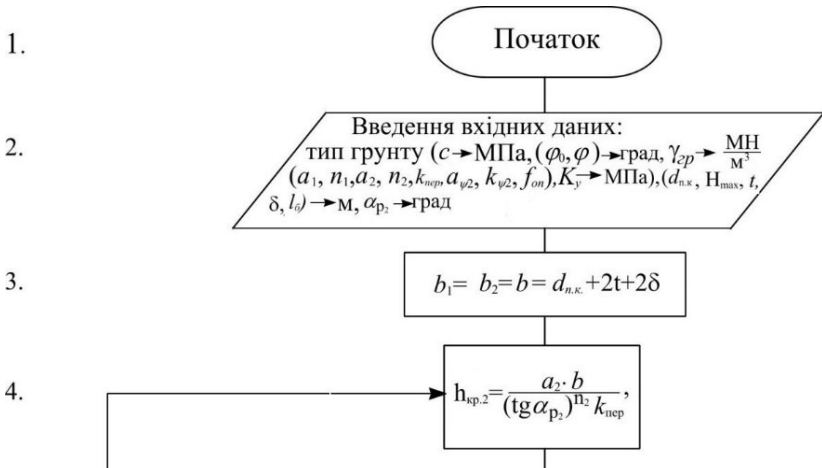


Рис. 3.2. Блок-схема алгоритму визначення основних параметрів двоярусних ножів з плоскими різальними частинами

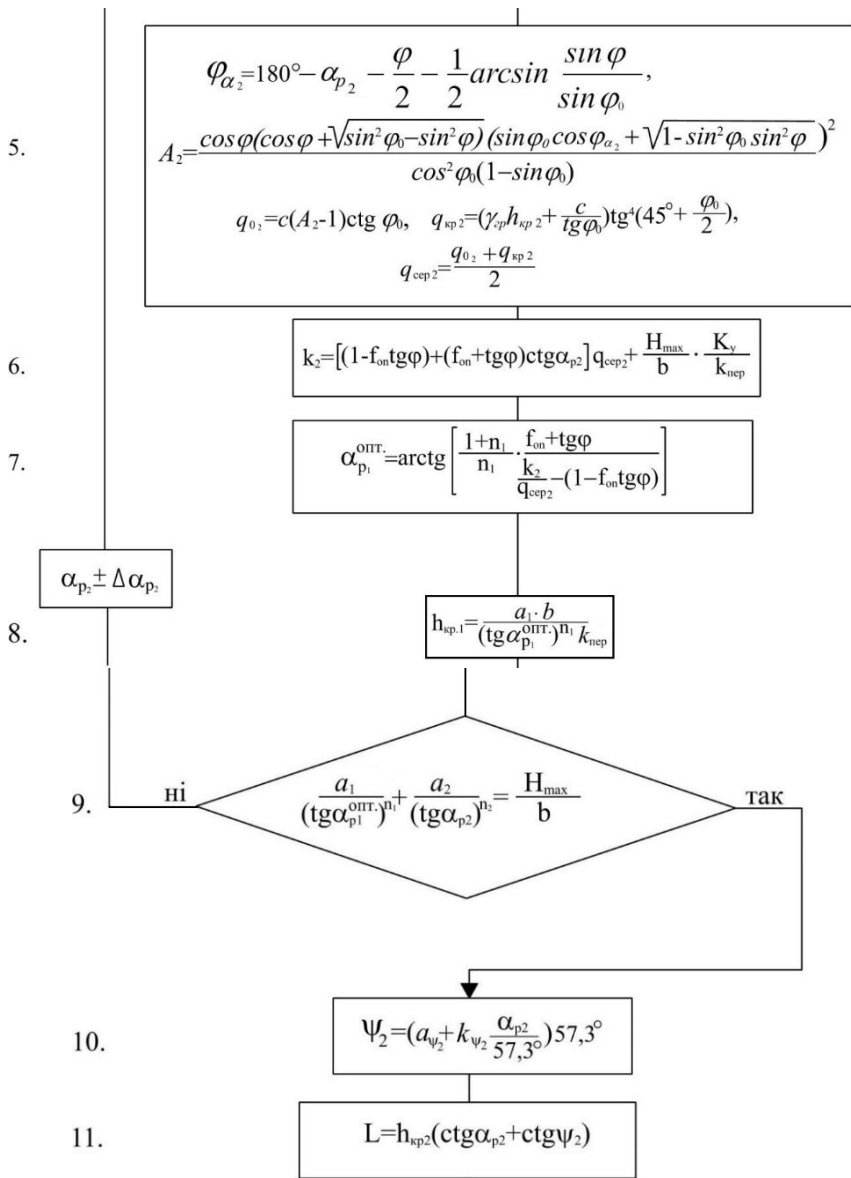


Рис. 3.2. Блок-схема алгоритму визначення основних параметрів дворушних ножів з плоскими різальними частинами (продовження)

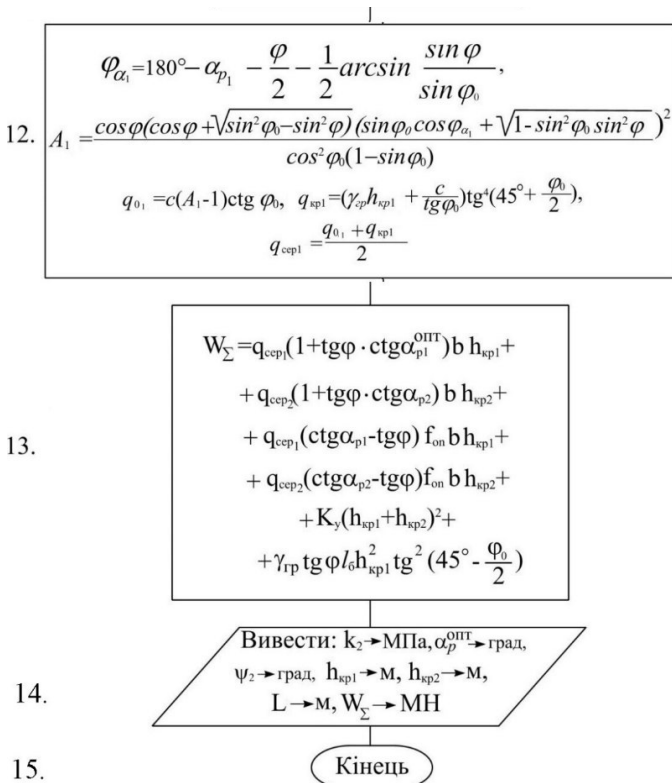


Рис. 3.2. Блок-схема алгоритму визначення основних параметрів двоярусних ножів з плоскими різальними частинами (закінчення): c – коефіцієнт зчеплення ґрунту, МПа; φ, φ_0 – кути зовнішнього та внутрішнього тертя ґрунту, град; $\gamma_{\text{сп}}$ – питома сила тяжіння ґрунту, МН/м³); a_1, n_1 – коефіцієнти апроксимації критичної глибини різання для верхнього ярусу; ψ_2 – кут поздовжнього зсуву ґрунту у нижньому ярусі, град; a_2, n_2 – коефіцієнти апроксимації критичної глибини різання для нижніх ярусів; $a_{\psi 2}, k_{\psi 2}$ – коефіцієнти інтерполяції для кута зсуву ґрунту в нижніх ярусах; $f_{\text{он}}$ – коефіцієнт опору переміщення опор робочого обладнання ($f_{\text{он}} = 0, 1 \dots 0, 15$); K_y – коефіцієнт питомого опору розрізання ґрунту порушеної структури ($K_y = 0, 02 \dots 0, 04$ МПа); $d_{n,k}$ – максимальний діаметр підземних комунікацій, що прокладаються, м; H_{max} – максимальна глибина прокладання підземних комунікацій, м; 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; $k_{нер}$ – відношення глибини гарантованого сколювання ґрунту h_c до критичної глибини різання $h_{кр}$ ($k_{нер} = 0,9 \dots 0,95$); α_{p2} – кут різання ножа в нижньому ярусі (вибирається в залежності від типу ґрунту та відношення H_{max}/b , град; l_b – 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

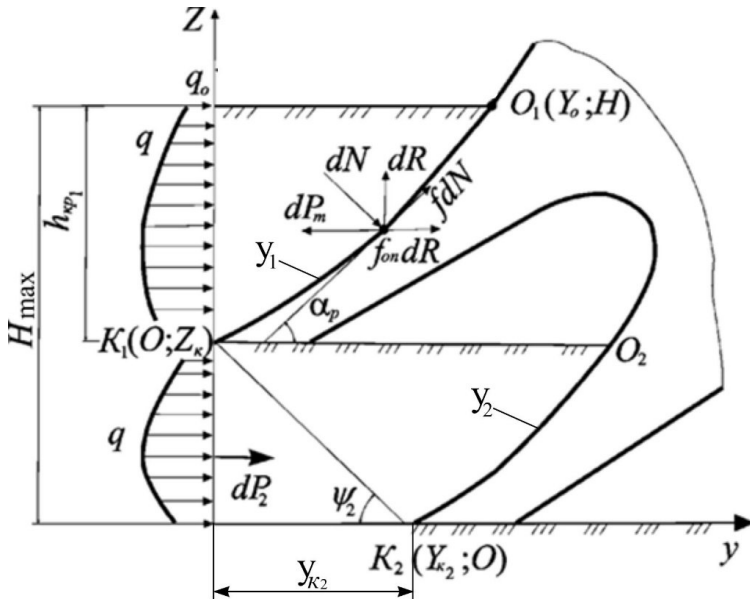


Рис. 3.3. Схема взаємодії з ґрунтом двоярусного безвідвального ЗРО з криволінійними різальними частинами

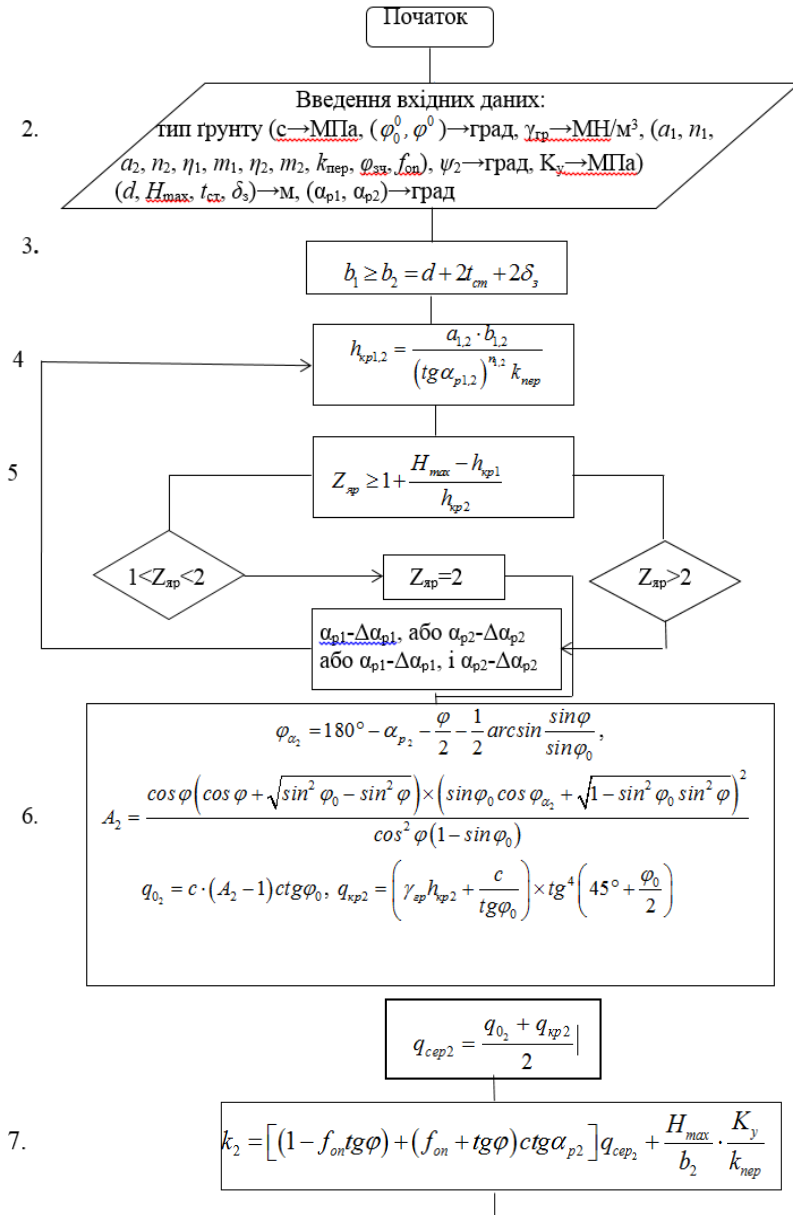


Рис. 3.4. Блок-схема алгоритму визначення форми та параметрів двоярусного безвідвального ЗРО

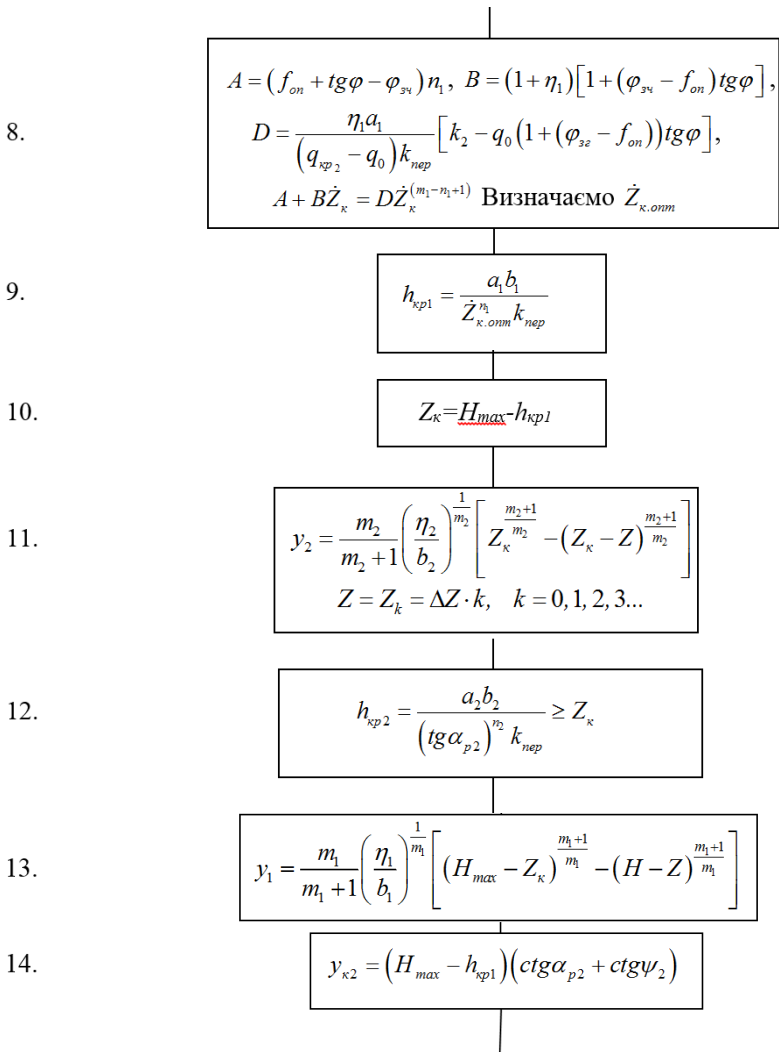


Рис. 3.4. Блок-схема алгоритму визначення форми та параметрів двоярусного безвідвального ЗРО (продовження)

15.

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

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

$$q_{0_1} = c \cdot (A_2 - 1) \operatorname{ctg} \varphi_0, \quad q_{\text{сп1}} = \left(\gamma_{\text{сп}} h_{\text{сп1}} + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi_0} \right) \times \operatorname{tg}^4 \left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} \right)$$

$$q_{\text{сеп1}} = \frac{q_{0_1} + q_{\text{сп1}}}{2}$$

16.

$$\varphi_{\text{зч}} = 0$$

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

$$\times b_1 (H_{\text{max}} - Z_{\kappa})^{\frac{m_1+1}{m_1}} + \frac{m_1 (f_{\text{он}} + \operatorname{tg} \varphi) (q_{\text{сп1}} - q_{0,1})}{(2m_1 - n_1 + 1) a_1} k_{\text{нер}} \left(\frac{\eta_1}{b_1} \right)^{\frac{1-n_1}{m_1}} \times$$

$$\times (H_{\text{max}} - Z_{\kappa})^{\frac{2m_1-n_1+1}{m_1}} + \frac{m_1 (1 - f_{\text{он}} \cdot \operatorname{tg} \varphi) (q_{\text{сп1}} - q_{0,1})}{(2m_1 - n_1) a_1} k_{\text{нер}} \left(\frac{b_1}{\eta_1} \right)^{\frac{n_1}{m_1}} \times$$

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

17.

Вивести: $k_2 \rightarrow \text{МПа}, \dot{Z}_{\kappa}, (Z_{\kappa}, h_{\text{кр1}}, h_{\text{кр2}},$
 $y_1, y_2, y_{\text{к2}}) \rightarrow \text{М}, P \rightarrow \text{МН}$

18.

Кінець

Рис. 3.4. Блок-схема алгоритму визначення форми та параметрів двох'ярусного безвідвального ЗРО (закінчення):

$c, \varphi, \varphi_0, \gamma_{\text{гр}}, a_1, n_1, a_2, n_2, K_y, f_{\text{он}}, k_{\text{пер}}, k_2, H_{\text{max}}, h_{\text{кр1}}, h_{\text{кр2}}, \psi_2$ (див. рис. 3.3); η_1, m_1 – коефіцієнти апроксимації поздовжнього профілю ножа у верхньому ярусі; η_2, m_2 – коефіцієнти апроксимації поздовжнього профілю ножа у нижньому ярусі; $\varphi_{\text{зч}}$ – коефіцієнт зчеплення ходового обладнання з опорною поверхнею ($\varphi_{\text{зч}} = 0,6 \dots 0,9$); d – максимальний діаметр лінійно-

протяжного об'єкту (ЛПО), що укладається, м; t_{cm} – товщина бокових стінок ножа, м; δ_3 – зазор між боковими стінками ножа та ЛПО ($\delta_3 = 0,01 \dots 0,02$ м), м; α_{p1}, α_{p2} – кути різання ножів відповідно у верхньому та нижньому ярусах ($\alpha_{p1} = 25^\circ \dots 45^\circ$; $\alpha_{p2} = 20^\circ \dots 30^\circ$), град; \dot{Z}_K – похідна функції верхнього профілю в точці K ; 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_{K2} – величина зміщення верхнього ЗРО відносно нижнього по горизонталі, м; P – сумарна сила різання двоярусним ЗРО, МН

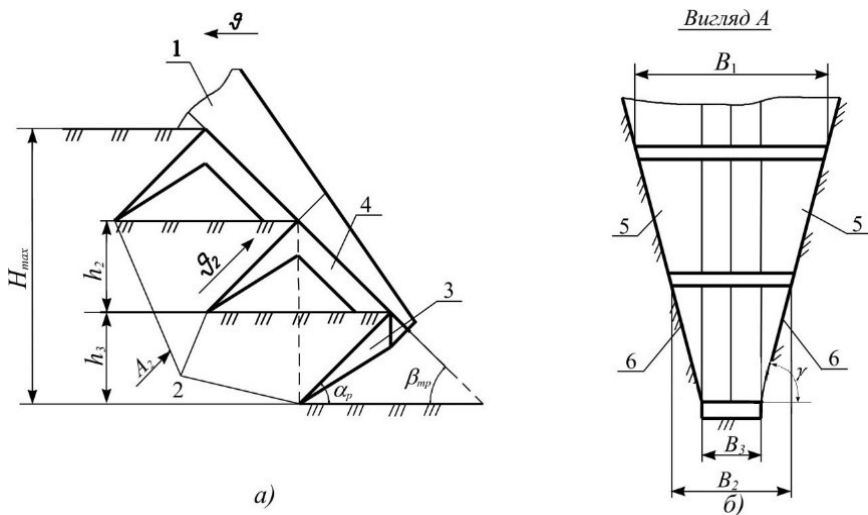


Рис. 3.5. Принципова схема багаторярусного ЗРО, що працює за принципом рівності об'ємних витрат ґрунту: а – профільна проекція; б – фронтальна проекція (вигляд по стрілці А)

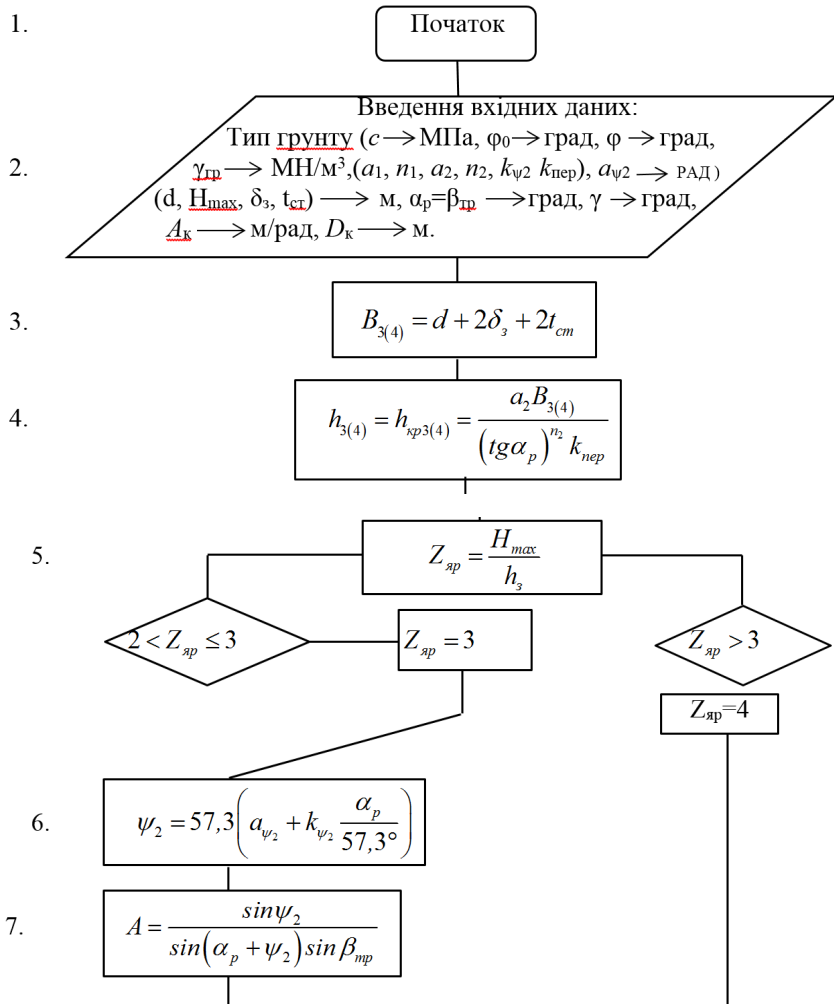


Рис. 3.6. Блок-схема алгоритму визначення параметрів багатоярусних безвідвальних ЗРО, що працюють за принципом рівності об'ємних витрат ґрунту

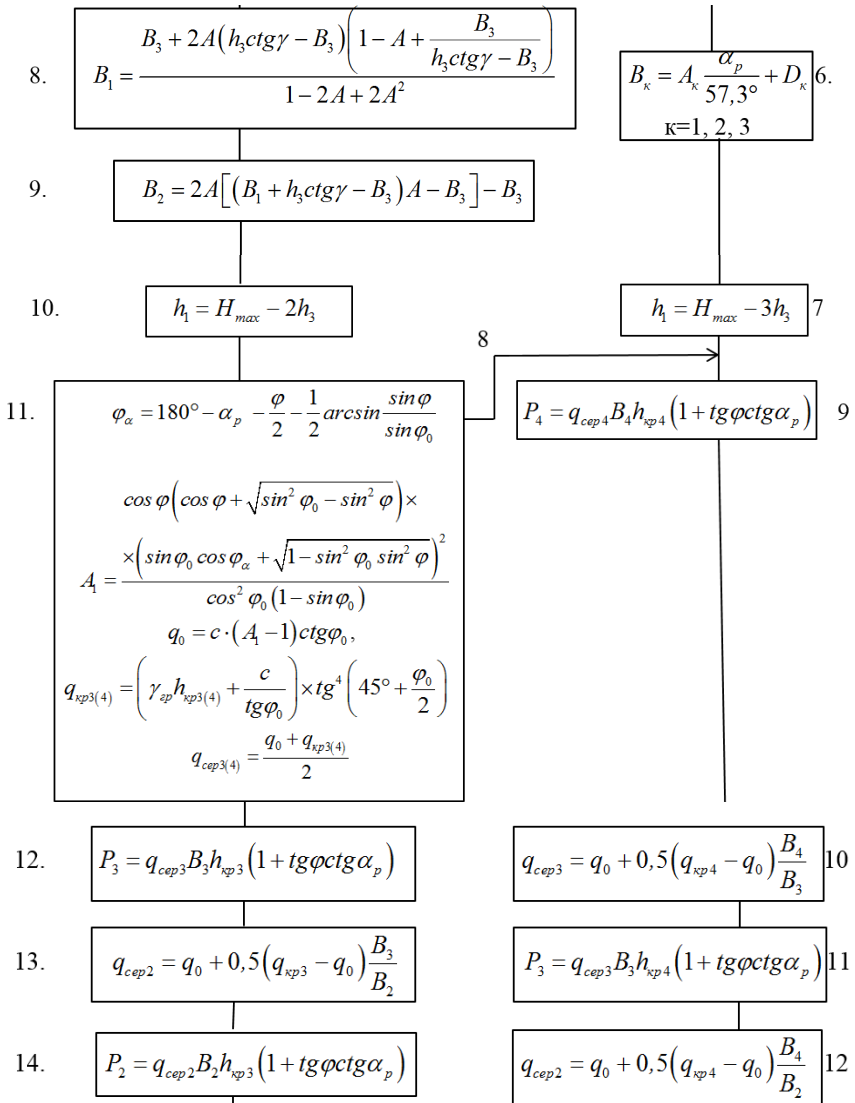


Рис. 3.6. Блок-схема алгоритму визначення параметрів багатоярусних безвідвальних ЗРО, що працюють за принципом рівності об'ємних витрат ґрунту (продовження)

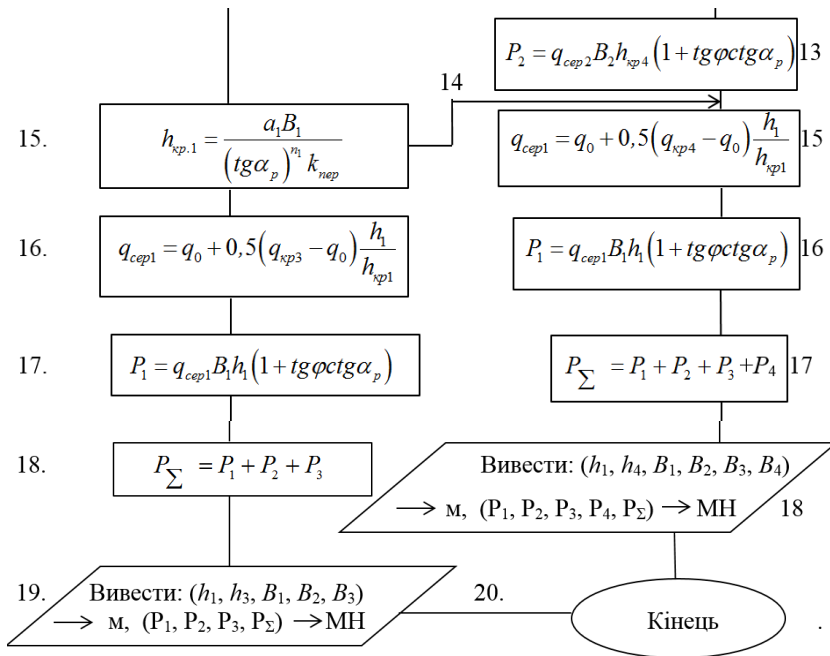


Рис. 3.6. Блок-схема алгоритму визначення параметрів багоярусних безвідвальних ЗРО, що працюють за принципом рівності об'ємних витрат ґрунту (закінчення):

c – коефіцієнт зчеплення ґрунту, МПа; φ, φ_0 – кути зовнішнього та внутрішнього тертя ґрунту, град; γ_{zp} – питома сила тяжіння ґрунту, МН/м³; 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; $a_{\psi 2}, k_{\psi 2}$ – коефіцієнти інтерполяції для кута сколювання ґрунту в нижніх ярусах; 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; δ_3 – зазор між бічними стінками ЗРО і ЛПО, м ($\delta_3 = 0,01 \dots 0,02$ м); t_{cm} – товщина бічних стінок ЗРО, м; H_{max} – максимальна глибина укладання ЛПО, м; $h_{xp3(4)}$ – критична глибина різання для третього та четвертого ґрунторозробного органу відповідно для триярусного та чотириярусного ЗРО ($h_{xp3(4)} = h_{3(4)}$); α_p – кут різання ґрунторозробних органів, ($\alpha_p = 20 \dots 30^\circ$) град; k_{nep} – відношення глибини зони гарантованого сколювання ґрунту h_c до критичної глибини різання h_{xp} ($k_{nep} = 0,90 \dots 0,95$); β_{mp} – кут нахилу несучої рами до горизонту ($\beta_{mp} = \alpha_p$), 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; B_1, B_2, B_3, B_4 – ширини ґрунторозробних органів чотириярусного ЗРО, м; $P_1, P_2, P_3, P_4, P_\Sigma$ – сила різання у відповідному ярусі та сумарна сила різання триярусного ЗРО, МН

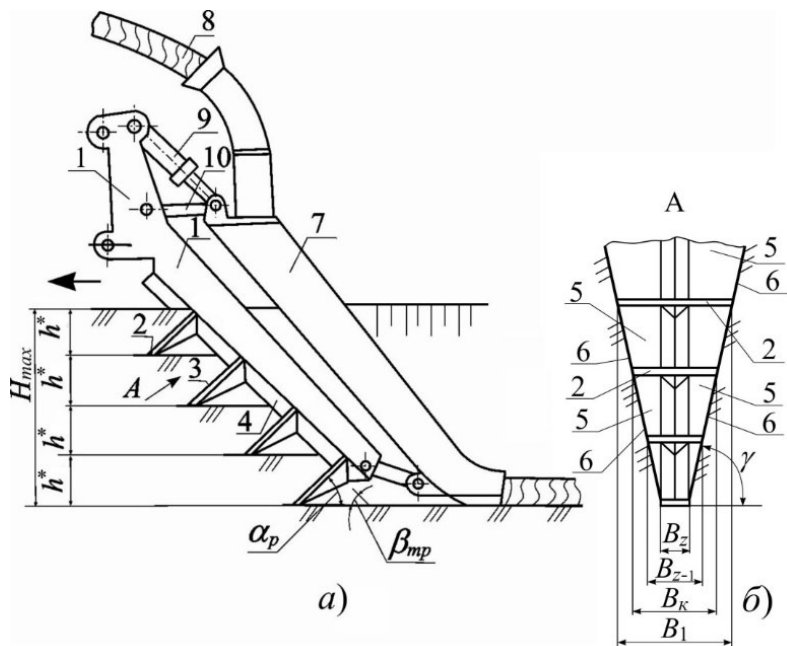


Рис. 3.7. Принципова схема багатоярусного безвідвального ЗРО, що працює за принципом рівності масових витрат ґрунту:
 а) у профільній площині; б) у фронтальній площині

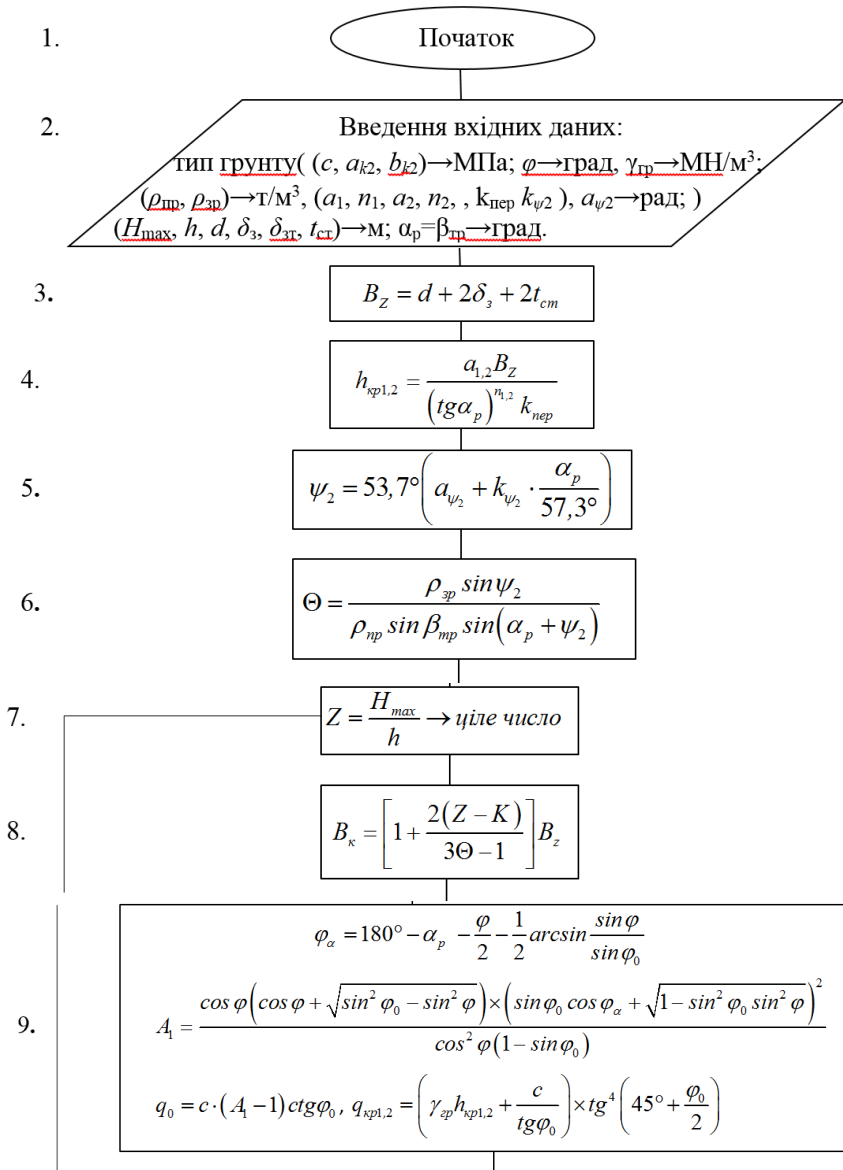


Рис. 3.8. Блок-схема алгоритму визначення параметрів багатоярусних безвідвальних ЗРО, що працюють за принципом рівності масових витрат ґрунту

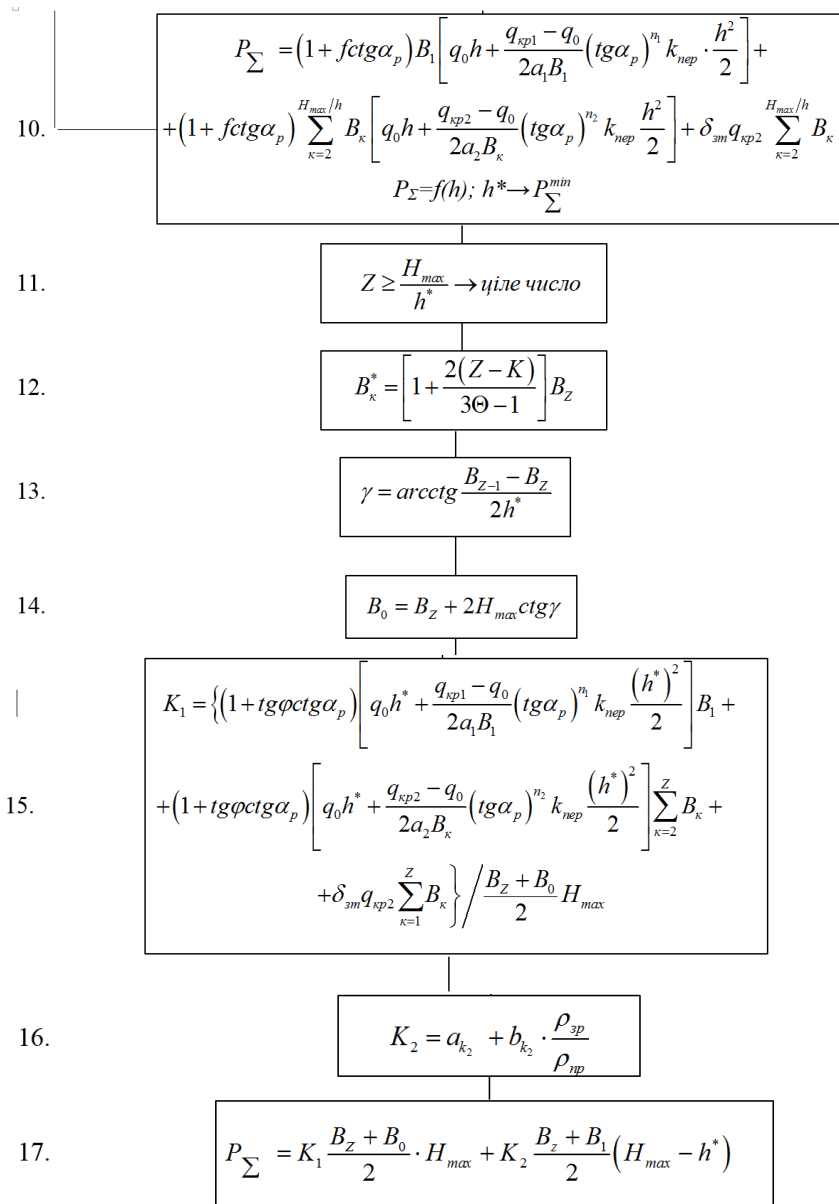


Рис. 3.8. Блок-схема алгоритму визначення параметрів багатоярусних безвідвальних ЗРО, що працюють за принципом рівності масових витрат ґрунту (продовження)

18.

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

19.

Кінець

Рис. 3.8. Блок-схема алгоритму визначення параметрів багатоярусних безвідвальних ЗРО, що працюють за принципом рівності масових витрат ґрунту (закінчення):

$c, \varphi, \gamma_{гр}, a_{\psi 2}, k_{\psi 2}, a_1, n_1, a_2, n_2, H_{\max}, d, \delta_3, t_{ст}, \alpha_p, k_{пер}$ – (див. рис. 3.7); $\rho_{пр}, \rho_{зр}$ – щільність ґрунту в природному та зруйнованому стані, т/м³ ([1], табл. 1.2); a_{k2}, b_{k2} – коефіцієнти інтерполяції питомого зусилля деформування ґрунтів багатоярусним ЗРО, МПа; α_p – кут різання ($\alpha_p = 20 \dots 30^\circ$), град; $\beta_{пр}$ – кут нахилу несучої рами ЗРО до горизонту ($\beta_{пр} = \alpha_p$), град; Z – кількість ярусів; 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; δ_{zm} – висота затуплення різальних кромek, м ($\delta_{zm} = 0,005 \dots 0,01$ м); K – порядковий номер ярусу, рахуючи зверху вниз ($K = 1, 2, 3, 4$); P_Σ – сумарне зусилля переміщення багатоярусного ЗРО, МН

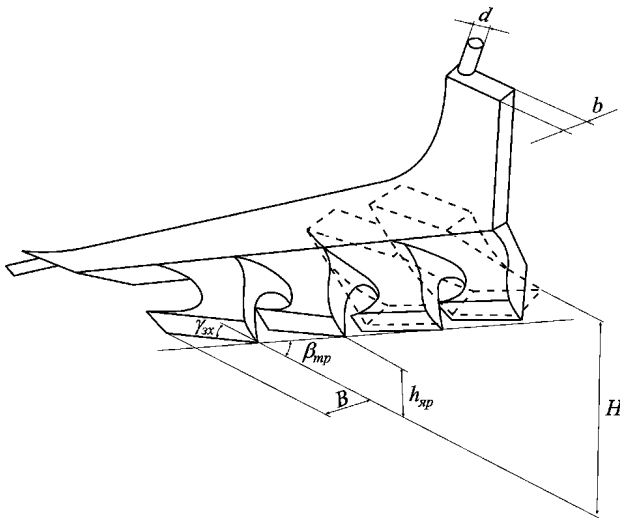


Рис. 3.9. Схема багатоярусного робочого органу відвального типу

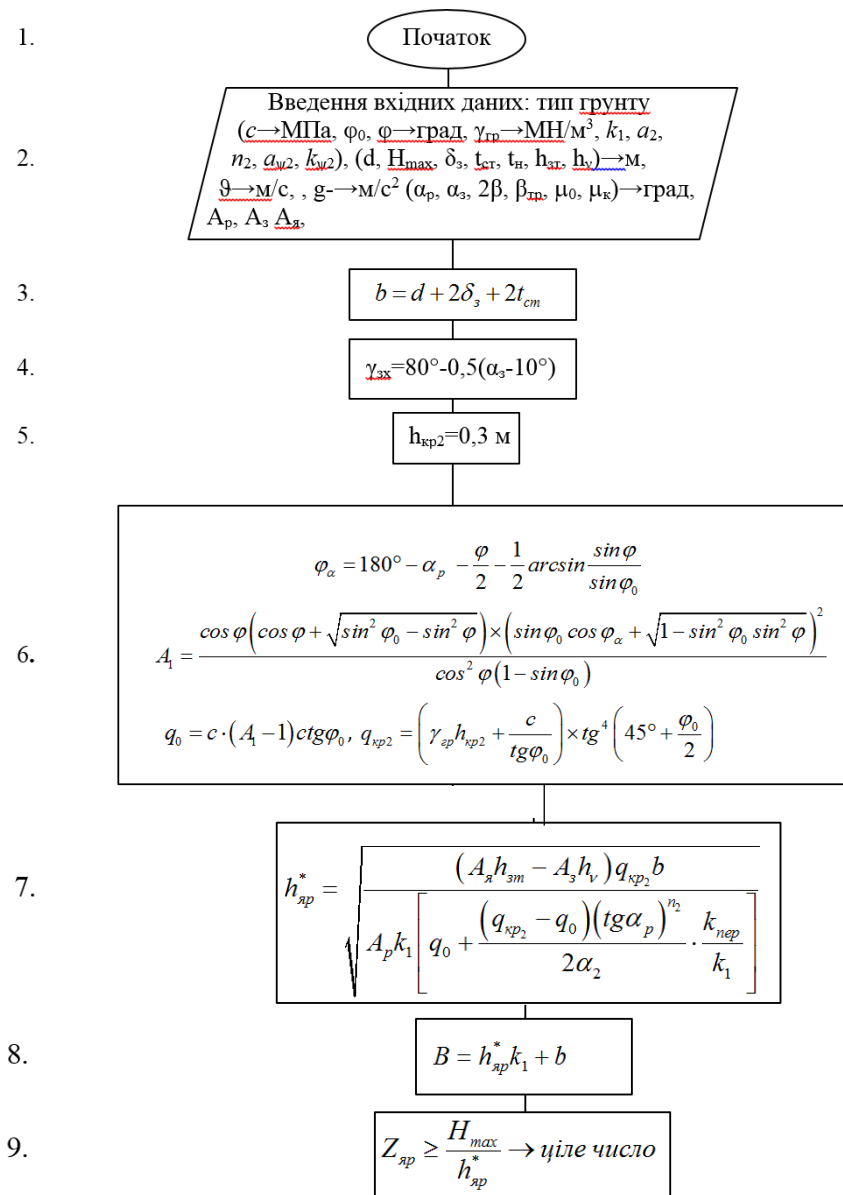


Рис. 3.10. Блок-схема алгоритму визначення основних параметрів і форми відвалів багатоярусних ЗРО відвального типу

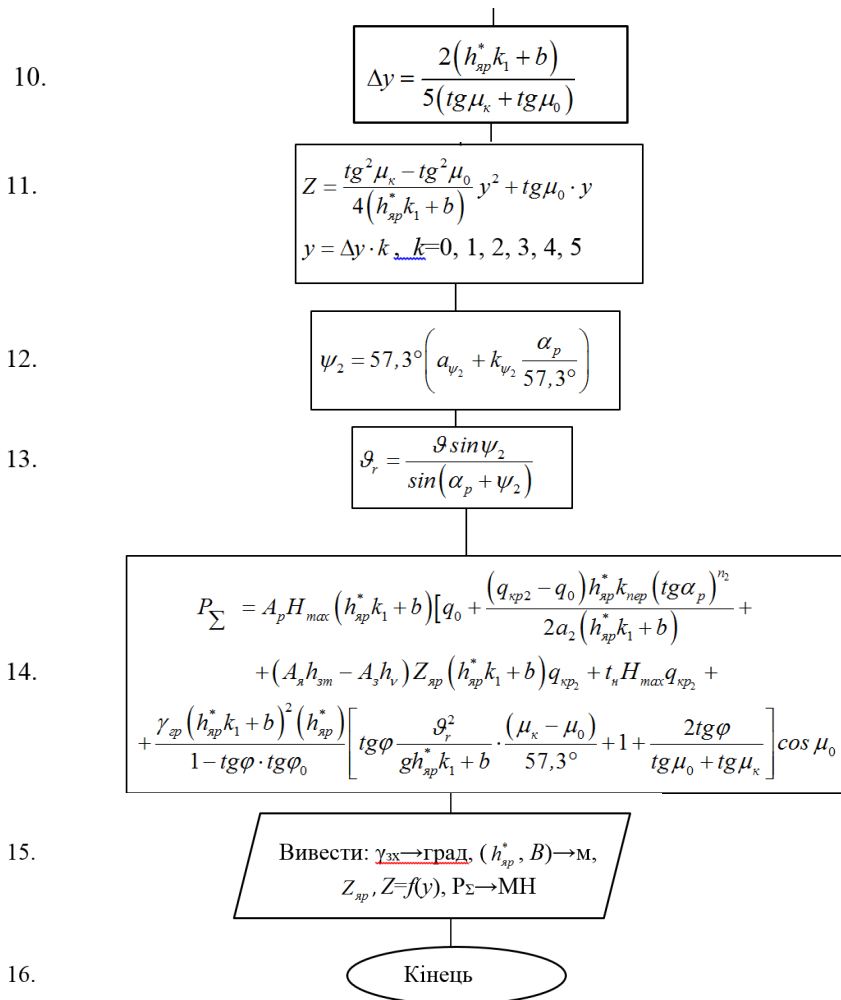
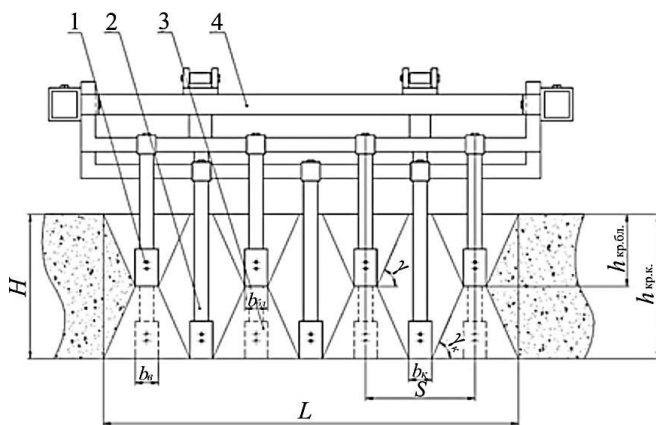


Рис. 3.10. Блок-схема алгоритму визначення основних параметрів і форми відвалів багоярусних ЗРО відвального типу (закінчення):

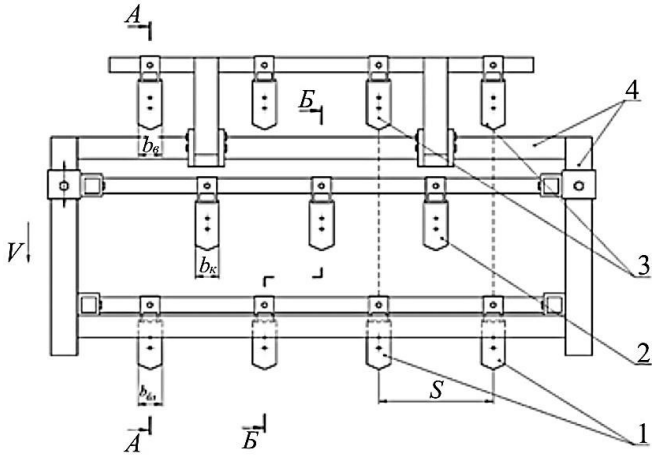
c – коефіцієнт зчеплення ґрунту, МПа; φ, φ_0 – кути зовнішнього та внутрішнього тертя ґрунту, град; γ_{ep} – питома сила тяжіння ґрунту, МН/м³); a_2, n_2 – коефіцієнти апроксимації критичної глибини різання для нижніх ярусів; a_{ψ_2}, k_{ψ_2} – коефіцієнти інтерполяції для кута зсуву ґрунту в нижніх ярусах; d – діаметр лінійно-протяжного об'єкта (ЛПО), що укладається, м; δ_3 – зазор між бічними стінками ЗРО і ЛПО, м; t_{cm} – товщина бічних стінок ЗРО, м; H_{max} – максимальна глибина укладання ЛПО, м; β_{mp} – кут нахилу

несучої рами ЗРО до горизонту, град; α_p – кут різання ґрунторозробних органів, град. ($\alpha_p = 25 \dots 35^\circ$); k_1 – коефіцієнт збільшення висоти ґрунтового пласта у процесі відокремлення його від масиву ($k_1 = 1,2 \dots 1,3$); α_z – задній кут ґрунторозробних органів ($\alpha_z = 15 \dots 20^\circ$), град; β_{mp} – кут нахилу робочого органу до горизонту ($\beta_{mp} = 24 \dots 26^\circ$), град; 2β – кут загострення вертикального ножа ($2\beta = 45 \dots 50^\circ$), град; \mathcal{G} – робоча швидкість ЗРО, м/с (до 1,0 м/с); h_{zt} – висота затуплення різальних кромок; h_v – вертикальне переміщення робочого органу, м (залежить від мікрорельєфу місцевості); A_p, A_z, A_y – розрахункові коефіцієнти впливу кута різання, ґрунтового ядра ущільнення та заднього кута на опір різанню; 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 ($\mu_0 = 35 \dots 50^\circ$; $\mu_k = 60 \dots 65^\circ$), град; γ_{zx} – кут захвату ґрунторозробних органів, град; $h_{яp}^*$ – 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 відвала ЗРО, м; P_Σ – сумарний опір переміщенню багоярусного ЗРО відвального типу, МН; g – прискорення вільного падіння, м/с² ($g = 9,81$ м/с²)



a)

Рис. 3.11. Розрахункова схема для визначення основних параметрів двоярусного критичноглибинного ґрунторозпушувача



б)

Рис. 3.11. Розрахункова схема для визначення основних параметрів двоярусного критичноглибинного ґрунторозпушувача (закінчення): а) – вигляд спереду; б) – вигляд зверху; 1, 2, 3 – ґрунторозробні органи, що працюють відповідно при блокованому, комбінованому, вільному різанні ґрунту; 4 – основна рама

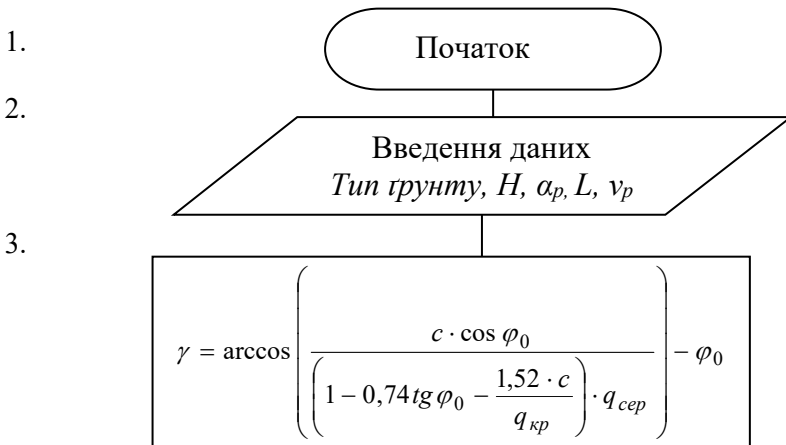


Рис. 3.12. Блок-схема алгоритму визначення параметрів двоярусного критичноглибинного розпушувача при заданій ширині захвату

4.

$$\varphi_\alpha = \pi - \alpha_p - \frac{\varphi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0},$$

$$\cos \varphi \left(\cos \varphi + \sqrt{\sin^2 \varphi_0 - \sin^2 \varphi} \right) \times$$

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

$$A_1 = \frac{\cos^2 \varphi_0 (1 - \sin \varphi_0)}{q_0 = c \cdot \operatorname{ctg} \varphi_0 (A_1 - 1),}$$

$$q_{\text{кр}} = \left(\gamma_{\text{зр}} h_c + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi_0} \right) \operatorname{tg}^4 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right),$$

$$q_{\text{сер}} = 0,5(q_0 + q_{\text{кр}}), \quad q_\epsilon = q_0 \cdot \left(1 + \frac{h_\epsilon}{b_\kappa} \cdot \operatorname{ctg} \gamma \right).$$

5.

$$b_{\bar{\delta}l} = b_\epsilon = \frac{H \cdot (\operatorname{tg} \alpha_p)^n}{2a} k_{\text{неп}} \quad b_\kappa = \frac{H \cdot (\operatorname{tg} \alpha_p)^{n_\kappa}}{a_\kappa} k_{\text{неп}}$$

6.

$$h_{\text{кр.}\bar{\delta}l} = \frac{a \cdot b_{\bar{\delta}l}}{(\operatorname{tg} \alpha_p)^n} k_{\text{неп}}, \quad h_{\text{кр.}\kappa} = \frac{a_\kappa \cdot b_\kappa}{(\operatorname{tg} \alpha_p)^{n_\kappa}} k_{\text{неп}}.$$

7.

$$s = b_{\bar{\delta}l} + b_\kappa + 2(h_{\text{кр.}\kappa} - h_{\text{кр.}\bar{\delta}l}) \cdot \operatorname{ctg} \gamma$$

8.

$$\psi_{\bar{\delta}l} = \alpha_\psi + k_{\psi} \cdot \alpha_p,$$

$$\psi_\kappa = \alpha_{\kappa,\psi} + k_{\kappa,\psi} \cdot \alpha_p,$$

$$\psi_\epsilon = 90^\circ - \frac{\alpha_p + \varphi + \varphi_0}{2}$$

Рис. 3.12. Блок-схема алгоритму визначення параметрів двоярусного критичноглибинного розпушувача при заданій ширині захвату (продовження)

$$9. \quad \rho = \arccos \left(\sqrt{1 - \left(\frac{\operatorname{ctg} \gamma}{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi} \right)^2} \right) \quad \lambda = \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p \operatorname{ctg} \gamma}{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi} \right)^2}}$$

$$\delta = \arccos \left(1 - 2 \left(\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi \right)^2 \sin^2 \psi \sin^2 \frac{\rho}{2} \right)$$

$$10. \quad l_c = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A},$$

$$\begin{cases} A = -c \sin^2 \alpha_p (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) \\ B = 2c \sin \alpha_p (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) h_{\text{кр.}\bar{\delta}l} - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0} b q_{\text{cep}} \\ C = \frac{c h_{\text{кр.}\bar{\delta}l}}{\sin \psi} (b + \rho h_{\text{кр.}\bar{\delta}l} \operatorname{ctg} \psi) \end{cases}$$

$$11. \quad P_{\bar{\delta}l} = \frac{-h_{\text{кр.}\bar{\delta}l} b_{\bar{\delta}l} \left(q_0 + \frac{q_{\text{кр}} - q_0}{2} k_{\text{неп}} \right) \left(\begin{array}{l} (\operatorname{tg} \varphi_0 \cdot \cos \psi_{\bar{\delta}l} + \sin \psi_{\bar{\delta}l}) \times \\ \times \cos(\alpha_{p,\bar{\delta}l} + \varphi + \psi_{\bar{\delta}l}) \end{array} \right)}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_{p,\bar{\delta}l}} +$$

$$+ h_{\text{кр.}\bar{\delta}l}^2 \cdot c \cdot \left(\begin{array}{l} (\operatorname{ctg} \alpha_{p,\bar{\delta}l} + \operatorname{ctg} \psi_{\bar{\delta}l}) \times \\ \times \left(\rho \cdot \operatorname{ctg} \psi_{\bar{\delta}l} + \frac{\cos \delta \cdot \cos \psi_{\bar{\delta}l}}{\cos \lambda} \right) \end{array} \right) + c \cdot h_{\text{кр.}\bar{\delta}l} b_{\bar{\delta}l} \operatorname{ctg} \psi_{\bar{\delta}l}$$

Рис. 3.12. Блок-схема алгоритму визначення параметрів двоярусного критичноглибинного розпушувача при заданій ширині захвату (продовження)

12.

$$P_{\kappa} = -\frac{\cos(\alpha_{p,\kappa} + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_{p,\kappa}} b_{\kappa} \cdot \left(h_6 \cdot q_0 \cdot \left(1 + \frac{h_6}{2b_{\kappa}} \operatorname{ctg} \gamma \right) + \right. \\ \left. + (h_{\text{кр},\kappa} - h_6) \left(q_6 + \frac{q_{\text{кр}} - q_6}{2} k_{\text{нр}} \right) \right) \times \\ \times (\operatorname{tg} \varphi_0 \cos \psi + \sin \psi) + c \cdot \left(\frac{-2h_6^2 \operatorname{ctg} \gamma_{\kappa} + 2h_6 h_{\text{кр},\kappa} \operatorname{ctg} \gamma_{\kappa}}{-h_6^2 \operatorname{ctg} \gamma + b_{\kappa} h_{\text{кр},\kappa}} \right) \operatorname{ctg} \psi + \\ + (h_{\text{кр},\kappa} - h_6)^2 (\operatorname{ctg} \alpha_{p,\kappa} + \operatorname{ctg} \psi) \cdot c \cdot \left(\rho \cdot \operatorname{ctg} \psi + \frac{\cos \delta \cdot \cos \psi}{\cos \lambda} \right)$$

13.

$$P_g = -(\sin \psi + \operatorname{tg} \varphi_0 \cos \psi) \frac{b_g h_g}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_{p,g}} q_0 \cdot \left(1 + \frac{h_g}{2b_g} \operatorname{ctg} \gamma \right) \times \\ \times \cos(\alpha_{p,g} + \varphi + \psi) + c \cdot b_g h_g \cdot \operatorname{ctg} \psi + h_g^2 c \rho (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) \operatorname{ctg} \psi$$

14.

$$n_{\bar{\sigma}l} = n_g \leq \frac{L - 2b_{\bar{\sigma}l} \cdot h_{\text{кр},\bar{\sigma}l} \operatorname{ctg} \gamma}{s} \\ \lceil n_{\bar{\sigma}l} \rceil, \quad n_{\kappa} = n_{\bar{\sigma}l} - 1$$

15.

$$L' = n_{\kappa} \cdot s + 2b_{\bar{\sigma}l} \cdot h_{\text{кр},\bar{\sigma}l} \operatorname{ctg} \gamma$$

16

Суцільне
розпушуванняСмугове
розпушування

Рис. 3.12. Блок-схема алгоритму визначення параметрів двоярусного критичноглибинного розпушувача при заданій ширині захвату (продовження)

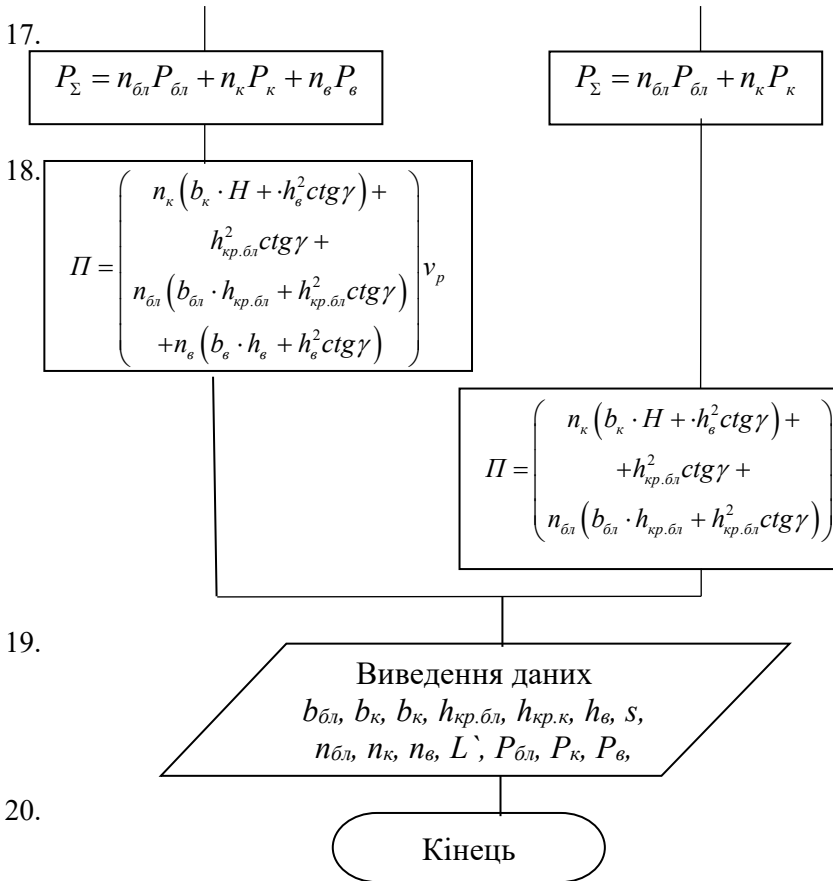


Рис. 3.12. Блок-схема алгоритму визначення параметрів двоярусного критичноглибинного ґрунторозпушувача при заданій ширині захвату (закінчення):

H – максимальна глибина розпушування, м; $h_{кр. \bar{b}_l}, h_{кр. \kappa}$ – критична глибина, відповідно при блокованому та комбінованому різанні ґрунту, м; h_e – глибина вільного різання ґрунту, м; $b_{\bar{b}_l}, b_{\kappa}, b_{\bar{b}_e}$ – ширина ріжучої частини робочого обладнання при блокованому, комбінованому та вільному різанні ґрунту, м; l_c – довжина лемешів, м; $k_{нер}$ – відношення глибини гарантованого сколювання ґрунту до критичної глибини різання; α_p – кут різання ґрунторозробного органу, град.; $\psi_{\bar{b}_l}, \psi_{\kappa}, \psi_{\bar{b}_e}$ – відповідно кути поздовжнього зсуву ґрунту при блокованому, комбінованому і вільному різанні, град.; c – коефіцієнт зчеплення ґрунту, МПа; φ, φ_0 – відповідно

кути зовнішнього і внутрішнього тертя ґрунту, град.; γ_p – питома сила тяжіння ґрунту в природному стані, кН/м^3 ; q_0 , $q_{кр}$, $q_{сер}$ – відповідно мінімальний, максимальний і середній тиск ґрунту на лобову поверхню ножа по глибині, МПа; ξ – коефіцієнт бічного тиску; γ – кут нахилу бічних стінок прорізу до горизонту, град.; γ_k – кут зміщення ґрунторозробних органів другого ярусу, що працюють при комбінованому різанні, відносно ґрунторозробних органів у першому ярусі град.; ρ , δ , λ , – кути які утворюються боковою площиною сколювання з вертикальною площиною, град.; a , n , a_k , n_k – коефіцієнти апроксимації критичної глибини відповідно при блокованому і комбінованому різанні ґрунту; L – ширина захвату двоярусного критичноглибинного розпушувача, м; L' – уточнена ширина захвату двоярусного критичноглибинного розпушувача, м; T – тягове зусилля трактора, кН ; a_ψ , k_ψ , $a_{к.\psi}$, $k_{к.\psi}$ – коефіцієнти інтерполяції кута повздожнього зсуву ґрунту відповідно при блокованому і комбінованому різанні; s – крок розташування ґрунторозробних органів у горизонтальній площині, м; $P_{бл}$, P_k , P_e – максимальні сили блокованого, комбінованого та вільного різання ґрунту, МН; $n_{бл}$, $n_{ком}$, n_e – кількість робочих органів, що здійснюють розробку при блокованому, комбінованому і вільному різанні ґрунту; $n_{р.о.}$ – кількість ґрунторозробних органів; n_m – кількість модулів ґрунторозробних органів; \mathcal{G}_p – робоча швидкість машини, м/год

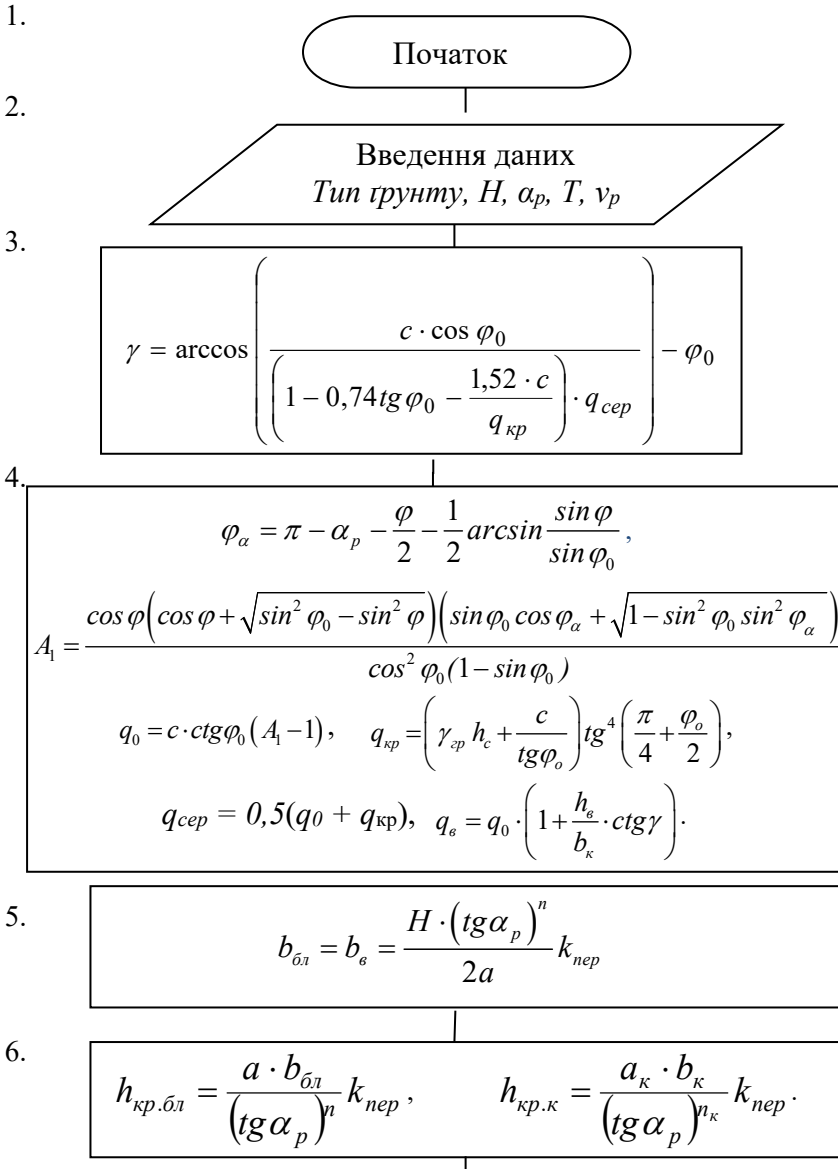


Рис. 3.13. Блок-схема алгоритму визначення параметрів двоярусного критичноглибинного ґрунторозпушувача при заданому тяговому зусиллі тягача

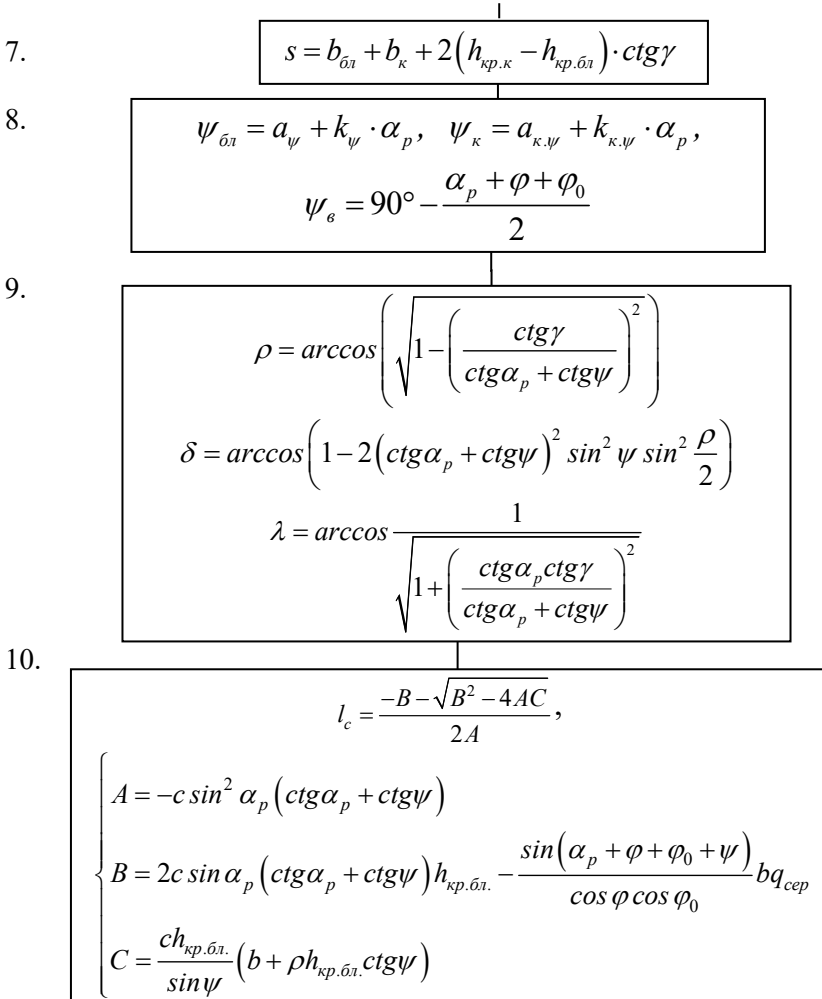


Рис. 3.13. Блок-схема алгоритму визначення параметрів двоярусного критичноглибинного ґрунторозпушувача при заданому тяговому зусиллі тягача (продовження)

11.

$$P_{\bar{\sigma}l} = \frac{-h_{kp,\bar{\sigma}l} b_{\bar{\sigma}l} \left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{2} k_{nep} \right) \left((tg \varphi_0 \cdot \cos \psi_{\bar{\sigma}l} + \sin \psi_{\bar{\sigma}l}) \times \right.}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_{p,\bar{\sigma}l}} \times \left. \cos (\alpha_{p,\bar{\sigma}l} + \varphi + \psi_{\bar{\sigma}l}) \right) +$$

$$+ h_{kp,\bar{\sigma}l}^2 \cdot c \cdot \left(\left(ctg \alpha_{p,\bar{\sigma}l} + ctg \psi_{\bar{\sigma}l} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\rho \cdot ctg \psi_{\bar{\sigma}l} + \frac{\cos \delta \cdot \cos \psi_{\bar{\sigma}l}}{\cos \lambda} \right) \right) + c \cdot h_{kp,\bar{\sigma}l} b_{\bar{\sigma}l} ctg \psi_{\bar{\sigma}l}$$

12.

$$P_{\kappa} = - \frac{\cos (\alpha_{p,\kappa} + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_{p,\kappa}} b_{\kappa} \cdot \left(h_{\bar{\sigma}} \cdot q_0 \cdot \left(1 + \frac{h_{\bar{\sigma}}}{2b_{\kappa}} ctg \gamma \right) + \right. \\ \left. + (h_{kp,\kappa} - h_{\bar{\sigma}}) \left(q_{\bar{\sigma}} + \frac{q_{kp} - q_{\bar{\sigma}}}{2} k_{nep} \right) \right) \times$$

$$\times (tg \varphi_0 \cos \psi + \sin \psi) + c \cdot \left(-2h_{\bar{\sigma}}^2 ctg \gamma_{\kappa} + 2h_{\bar{\sigma}} h_{kp,\kappa} ctg \gamma_{\kappa} - \right. \\ \left. - h_{\bar{\sigma}}^2 ctg \gamma + b_{\kappa} h_{kp,\kappa} \right) ctg \psi +$$

$$+ (h_{kp,\kappa} - h_{\bar{\sigma}})^2 (ctg \alpha_{p,\kappa} + ctg \psi) \cdot c \cdot \left(\rho \cdot ctg \psi + \frac{\cos \delta \cdot \cos \psi}{\cos \lambda} \right)$$

13.

$$P_{\bar{\sigma}} = -(\sin \psi + tg \varphi_0 \cos \psi) \frac{b_{\bar{\sigma}} h_{\bar{\sigma}}}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_{p,\bar{\sigma}}} q_0 \cdot \left(1 + \frac{h_{\bar{\sigma}}}{2b_{\bar{\sigma}}} ctg \gamma \right) \times$$

$$\times \cos (\alpha_{p,\bar{\sigma}} + \varphi + \psi) + c \cdot b_{\bar{\sigma}} h_{\bar{\sigma}} \cdot ctg \psi + h_{\bar{\sigma}}^2 c \rho (ctg \alpha_{p,\bar{\sigma}} + ctg \psi) ctg \psi$$

Суцільне

Смугове

Тип

$$P_M = 2P_{\bar{\sigma}l} + P_{\kappa} + 2P_{\bar{\sigma}}$$

$$P_M = 2P_{\bar{\sigma}l} + P_{\kappa}$$

$$n_M \leq \frac{T}{2P_{\bar{\sigma}l} + P_{\kappa} + 2P_{\bar{\sigma}}}$$

$$n_M \leq \frac{T}{2P_{\bar{\sigma}l} + P_{\kappa}}$$

Рис. 3.13. Блок-схема алгоритму визначення параметрів двоярусного критичноглибинного ґрунторозпушувача при заданому тяговому зусиллі тягача (продовження)

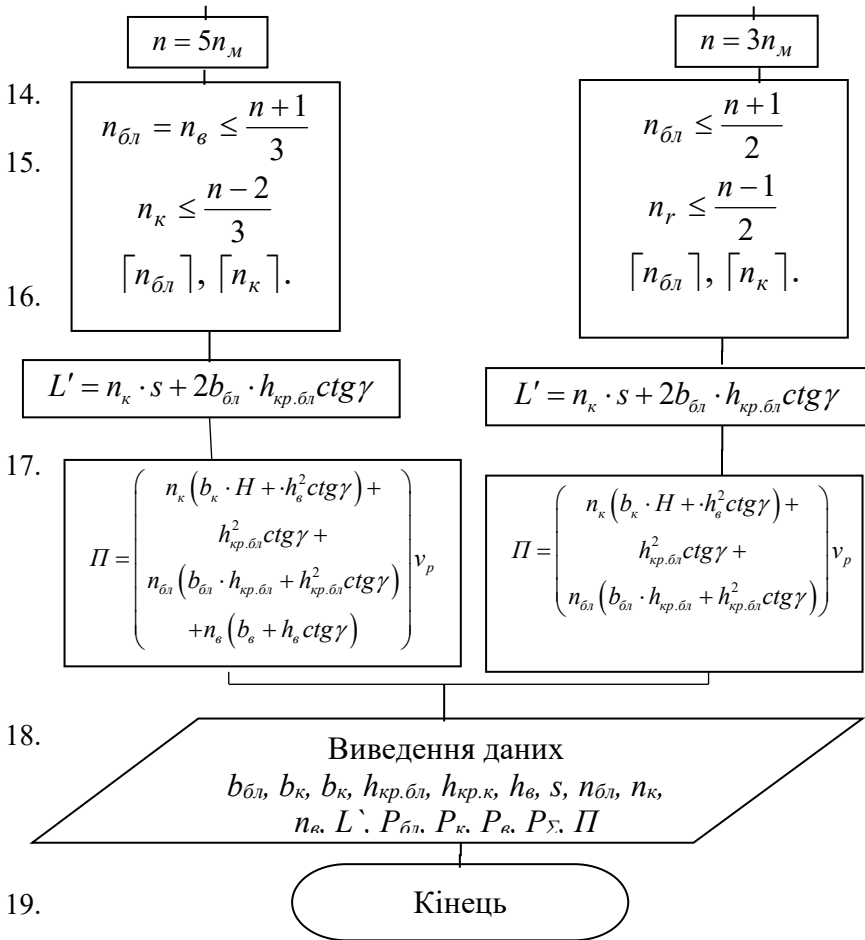


Рис. 3.13. Блок-схема алгоритму визначення параметрів двоярусного критичноглибинного ґрунторозпушувача при заданому тяговому зусиллі тягача (закінчення):

H – максимальна глибина розпушування, м; $h_{кр.δ л}, h_{кр.к}$ – критична глибина, відповідно при блокованому та комбінованому різанні ґрунту, м; h_e – глибина вільного різання ґрунту, м; $b_{\delta л}, b_{\kappa}, b_e$ – ширина ріжучої частини робочого обладнання при блокованому, комбінованому та вільному різанні ґрунту, м; l_c – довжина лемешів, м; $k_{нер}$ – відношення глибини гарантованого сколювання ґрунту до критичної глибини різання; α_p – кут різання ґрунторозробного органа, град.; $\psi_{\delta л}, \psi_{\kappa}, \psi_e$ – відповідно кути

поздовжнього зсуву ґрунту при блокованому, комбінованому і вільному різанні, град.; c – коефіцієнт зчеплення ґрунту, МПа; φ , φ_0 – відповідно кути зовнішнього і внутрішнього тертя ґрунту, град.; γ_p – питома сила тяжіння ґрунту в природному стані, кН/м³; q_0 , $q_{кр}$, $q_{сер}$ – відповідно мінімальний, максимальний і середній тиск ґрунту на лобову поверхню ножа по глибині, МПа; ξ – коефіцієнт бічного тиску; γ – кут нахилу бічних стінок прорізу до горизонту, град.; γ_k – кут зміщення ґрунторозробних органів другого ярусу, що працюють при комбінованому різанні, відносно ґрунторозробних органів у першому ярусі град.; ρ , δ , λ , – кути які утворюються боковою площиною сколювання з вертикальною площиною, град.; a , n , a_k , n_k – коефіцієнти апроксимації критичної глибини відповідно при блокованому і комбінованому різанні ґрунту; L – ширина захвату двоярусного критичноглибинного розпушувача, м; L' – уточнена ширина захвату двоярусного критичноглибинного розпушувача, м; T – тягове зусилля трактора, кН; a_ψ , k_ψ , $a_{k,\psi}$, $k_{k,\psi}$ – коефіцієнти інтерполяції кута поздовжнього зсуву ґрунту відповідно при блокованому і комбінованому різанні; s – крок розташування ґрунторозробних органів у горизонтальній площині, м; $P_{бл}$, P_k , P_e – максимальні сили блокованого, комбінованого та вільного різання ґрунту, МН; $n_{бл}$, $n_{ком}$, n_e – кількість робочих органів, що здійснюють розробку при блокованому, комбінованому і вільному різанні ґрунту; $n_{p.o.}$ – кількість ґрунторозробних органів; n_m – кількість модулів ґрунторозробних органів; \mathcal{V}_p – робоча швидкість машини, м/год.

3.2. НАТУРНІ ЗРАЗКИ БАГАТОЯРУСНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ

Для проведення апробації в реальних умовах було виготовлено натурні зразки багатоярусних робочих органів. Фото виготовлених натурних зразків машин з багатоярусними ЗРО наведено на рис. 3.14–3.22.

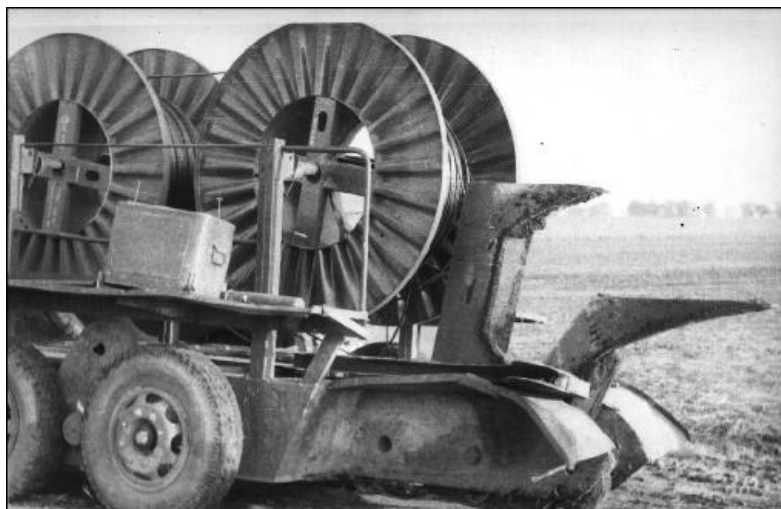


a



б

Рис. 3.14. Двоярусні безвідвальні укладачі ЛПО з плоскими та криволінійними різальними частинами ножів:
a – з плоскими; *б* – з криволінійними



a)



б)

Рис. 3.15. Кабелеукладачі з безвідвальними криволінійними різальними частинами ножів:

a – з шириною ножів 120 мм; *б* – з шириною ножів 100 мм



a



б

Рис. 3.16. Двоюрисний відвальний об'ємний ґрунторозпушувач:
a – в транспортному положенні; *б* – в робочому положенні



a



б

Рис. 3.17. Двоярусний безвідвальний критичноглибинний розпушувач:
a – в транспортному положенні; *б* – в робочому положенні



a

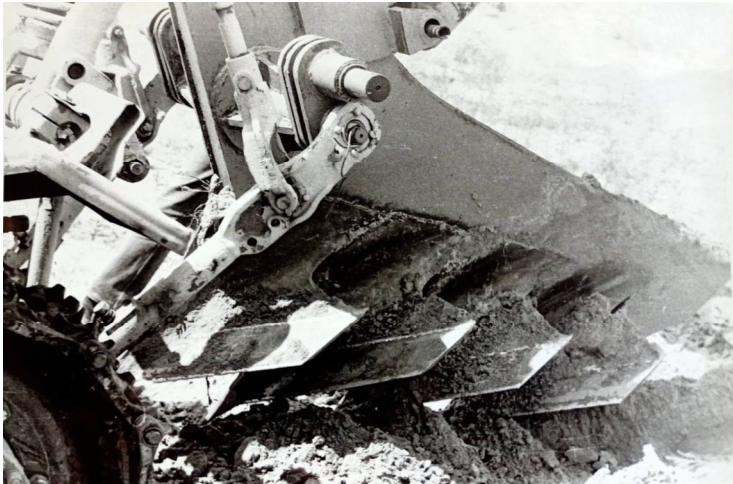


б

Рис. 3.18. Триярусні безвідвальний та відвальний укладачі ЛПО:
a – безвідвальний; *б* – відвальний



a



б

Рис. 3.19. Чотирирусний відвальний джгутоукладач: *a* – вид ззаду збоку; *б* – вид спереду зверху

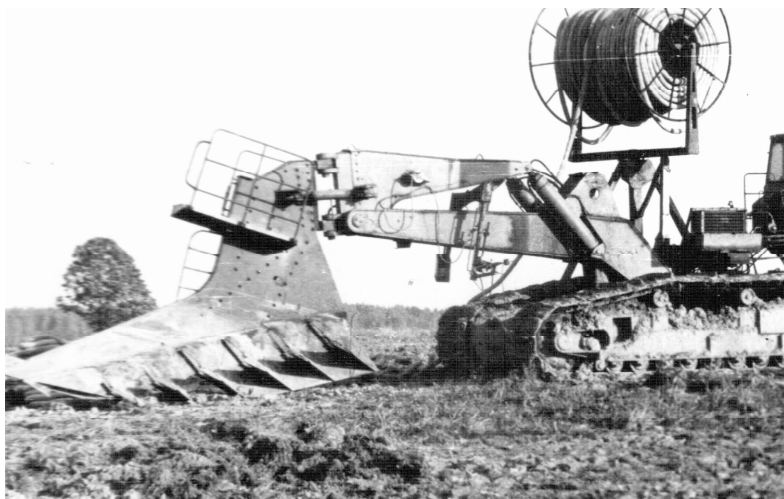


а

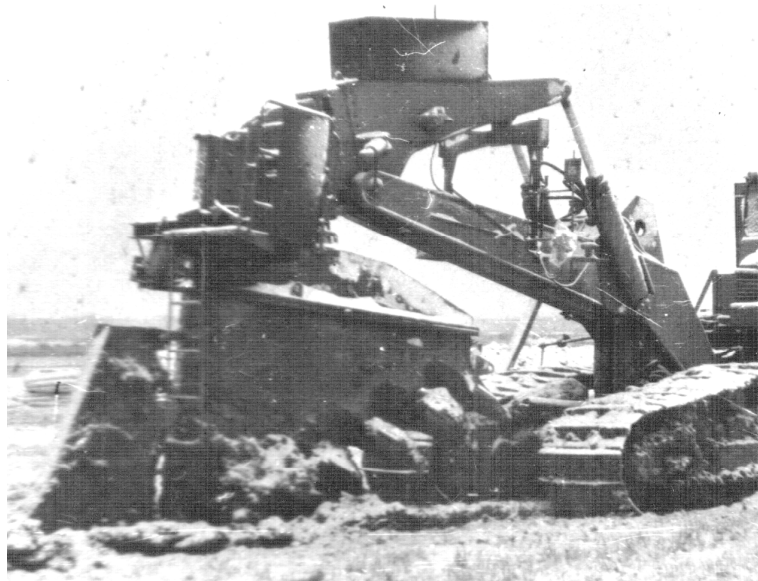


б

Рис. 3.20. Чотирярусний безвідвальний укладач ЛПО:
а – в транспортному положенні; *б* – в робочому положенні



a



б

Рис. 3.21. Шестиярусні відвальні укладачі ЛПО: *a* – в транспортному положенні; *б* – при заглибленні зі зміщеною ріжучою частиною



a



б

Рис. 3.22. Восьмирусний відвальний укладач ЛПО: *a* – загальний вигляд на фоні чотирирусного укладача; *б* – робоча частина

4. АПРОБАЦІЯ БАГАТОЯРУСНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ

4.1. ПОЛЬОВІ ВИПРОБУВАННЯ БЕЗТРАНШЕЙНОГО ДРЕНОУКЛАДАЧА З ТРАДИЦІЙНИМ ОДНОЯРУСНИМ І ДВОЯРУСНИМИ НОЖАМИ

У результаті проведених аналітичних досліджень розроблена методика визначення оптимальних параметрів двоярусних ножів, а також робоча документація для їх виготовлення і проведення польових порівняльних випробувань традиційного та двоярусного робочого обладнання (див. рис. 3.14, а). на базі безтраншейного дреноукладача МД-12. Випробування проводилися на полігоні НВО «ВНДІ Земмаш» (у 1986 р.). Результати випробувань представлені на рис. 4.1 та в табл. 4.1.

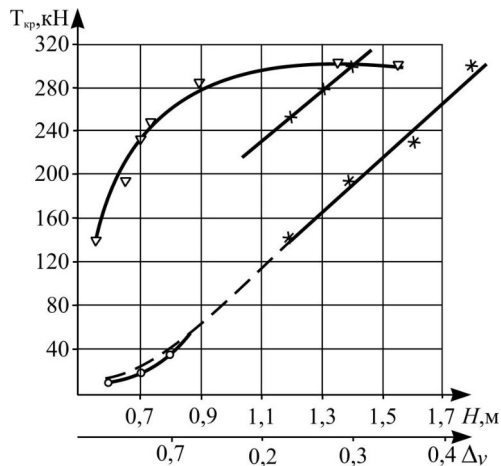


Рис. 4.1. Залежність тягового зусилля на крюку і величини буксування дреноукладача від глибини щілини, що нарізується (грунт – $\sigma_{cm} = 0,18 \dots 0,55$ МПа, $C_{y\delta} = 3 \dots 8$):

- \times - \times - \times – основного ножа; \circ - \circ - \circ – піонерного ножа;
- *-*-* – основного з піонерним; ∇ - ∇ - ∇ – крива буксування;
- - - – умовна залежність

Таблиця 4.1

Результати порівняльних випробувань безтраншейного
дреноукладача МД-12 з традиційним і двоярусним обладнанням

№ з/п	Оціночні показники	Од. вимір	МД-12 без піонерного ножа	МД-12 з піонерним ножем
1.	Глибина різання піонерного ножа	м	-	0,8
	основного ножа		1,2; 1,3; 1,4	0,4; 0,6; 0,8; 1,0
2.	Кут різання ножа піонерного ножа	град.	-	20–25
	основного ножа		35–40	35–40
3.	Ширина ножа піонерного ножа	м	-	0,22
	основного ножа		0,20	0,20
4.	Критична глибина різання піонерного ножа	м	-	0,80–0,85
	основного ножа		0,50–0,55	-
5.	Тягове зусилля на крюку (величина буксування) при глибині щілини, що нарізується	кН		
	H=1,2 м		244,4(0,076)	141,6(0,006)
	H=1,3 м		281,1(0,131)	-
	H=1,4 м		300,5(0,351)	193,5(0,049)
	H=1,6 м		-	232,2(0,067)
	H=1,8 м		-	301,9(0,283)
6.	Зниження тягового опору		-	31,4–42,1
7.	Щільність ґрунту по числу ударів динамічного щільноміра по глибині щілини, що нарізується	%	7–10	3–5

Аналіз експериментальних даних показав, що із збільшенням глибини різання на ґрунтах I, II категорії тягове зусилля на крюку зростає з деяким наближенням по лінійній залежності для традиційного і двоярусного обладнання. Однак, у другому випадку необхідне тягове зусилля значно менше. Так, при нарізанні щілини

двоярусним робочим обладнанням збільшення глибини різання від 1,2 до 1,8 м призвело до зростання тягового зусилля з 131,6 до 301,9 кН, а традиційним – з 244,4 до 300,5 кН при заглибленні ножа від 1,2 до 1,4 м. Зниження тягового зусилля склало 31,4–42,1%. Величина буксування дреноукладача з традиційним робочим обладнанням змінювалася від 0,076 до 0,351, а з двоярусним – від 0,006 до 0,283. Робоча (дійсна) швидкість руху дреноукладача складала 0,067–0,176 м/с, причому більші значення робочої швидкості зареєстровані для дреноукладача з двоярусним робочим обладнанням.

Зниження тягового зусилля для двоярусної схеми розробки пояснюється тим, що піонерний ніж розробляє ґрунт у верхньому ярусі на критичну глибину і утворює відкриту поверхню для виходу ґрунту по лемешу основного ножа. Крім того, на зниження тягового зусилля впливає неодночасність сколювання ґрунту ножами. Піонерний ніж зсовує робочий процес не тільки в просторі, але і в часі.

Із зниженням глибини різання процент зниження тягового зусилля зменшується, тому що при заглибленні основного ножа в закритичну зону питомий опір різанню зростає через ущільнення ґрунту в бічні стінки щілини. У такому випадку необхідна оптимізація форми і параметрів не тільки піонерного, але й основного ножа якщо застосовується двоярусна схема розробки, яка направлена на усунення закритичної зони.

Тягове зусилля піонерного ножа (див. рис. 4.1) із збільшенням глибини різання від 0,6 до 0,85 м зростає по параболічному закону

від 9,2 до 55 кН. Критична глибина різання дорівнює 0,80–0,85 м для кута різання 20–25° і ширини піонерного ножа 0,22 м.

Крім того, в ході випробувань встановлено (див. табл. 4.1), що двоярусна схема розробки щілини дозволяє знизити щільність бічних стінок з 7–10 до 3–5 ударів динамічного щільноміра і динамічні навантаження на робоче обладнання, покращує тягово-зчіпні властивості ходового обладнання, підвищує плавність ходу дрепоукладача і якість робочого процесу.

4.2. ВИРОБНИЧІ ВИПРОБУВАННЯ КАБЕЛЕУКЛАДАЧА З ТРАДИЦІЙНИМ ОДНОЯРУСНИМ І ДВОЯРУСНИМИ НОЖАМИ

На основі результатів аналітичних досліджень розроблена методика побудови оптимальних поздовжніх профілів двоярусних ножів (див. рис. 3.15, *а, б*), а також робоча документація для їх виготовлення і проведення виробничих порівняльних випробувань традиційного і двоярусного робочого обладнання кабелеукладача КУ-120В.

Двоярусна конструкція ножа з криволінійними різальними частинами пройшла порівняльні виробничі випробування при прокладанні кабелю на трасі Мізоч – Рівне. У результаті випробувань встановлено, що конструкція двоярусного кабелеукладального ножа дозволяє знизити необхідне тягове зусилля кабелеукладача КУ-120В у 1,8–1,9 рази. На ґрунтах II категорії при глибині прокладання кабелю 1,2 м середній опір переміщенню кабелеукладального візка з ножами двоярусної і

традиційної конструкції з шириною лобової поверхні 0,12 м відповідно дорівнював 103 і 198 кН. Зниження тягового опору склало 48%. Розрахункове значення опору переміщенню двоярусного ножа в напівтвердому суглинку II категорії – 98 кН.

У ході випробувань також вивчався вплив робочих процесів на ґрунтове середовище. Для цього в поперечному перерізі щілини по горизонтах через 0,2 м заміряли щільність ґрунту після проходження робочого органа традиційної і двоярусної конструкції.

У верхньому ярусі щілина в поперечному перерізі має вигляд трапеції висотою 65 см з основами 13 см внизу і 53–57 см на денній поверхні. По боках ножа утворюються валки висотою біля 23 см і шириною 60–80 см. У нижньому ярусі висотою 55 см щілина має вертикальні стінки з шириною дна – 13 см. Весь поперечний переріз щілини заповнений розпушеним ґрунтом. Крок сколювання елементів стружки у верхньому ярусі – 60 см.

Кабелепрокладальний ніж традиційної конструкції в нижній частині щілини на глибині більше 60 см утворює кротову порожнину, яка майже не заповнена ґрунтом. Успішні спроби вільного витягування кабелю із такої щілини підтверджують сказане. Верхня частина щілини має також вигляд трапеції, заповненої зруйнованим ґрунтом.

За зміною щільності ґрунту в щілині видно, що традиційний ніж кабелеукладача КУ-120В на глибині більше 0,6 м працює за принципом ущільнення ґрунту в бічні стінки щілини, а двоярусний ніж розпушує ґрунт по всій її глибині, тим самим забезпечує

необхідне менше тягове зусилля.

4.3. ПОЛЬОВІ ВИПРОБУВАННЯ БАГАТОЯРУСНИХ БЕЗВІДВАЛЬНИХ ЗЕМЛЕРИЙНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ

Для реалізації лабораторно-польових досліджень виготовлений чотириярусний робочий орган безтраншейного укладача підземних трубопроводів з параметрами, відповідно до розробленої методики розрахунку, і змонтований на базі трактора Т-170 (див. рис. 3.20).

Під час проведення польових досліджень також встановлено, що заглиблення трубопроводу можна виконати поступовим заглибленням робочого органа з денної поверхні без приямка. Безтраншейне прокладання трубопроводу методом заглиблення з денної поверхні не потребує подальшої засипки, а борозна, що утворюється після проходження робочого органа, вирівнюється з часом під впливом атмосферних чинників. При нагальній необхідності вирівнювання денної поверхні цього можна легко досягти одноразовим проходом гусениці трактора по борозні.

Після укладання трубопроводу даним робочим органом родючий шар ґрунту зберігається без проведення рекультивації ґрунту.

У результаті виконання лабораторно-польових досліджень отримані графічні залежності силових характеристик багатоярусного різання ґрунтового середовища від висоти ярусів h та ширини ґрунторозробних органів B при розробці ґрунту (твердий супісок) на глибину 1 м (рис. 4.2).

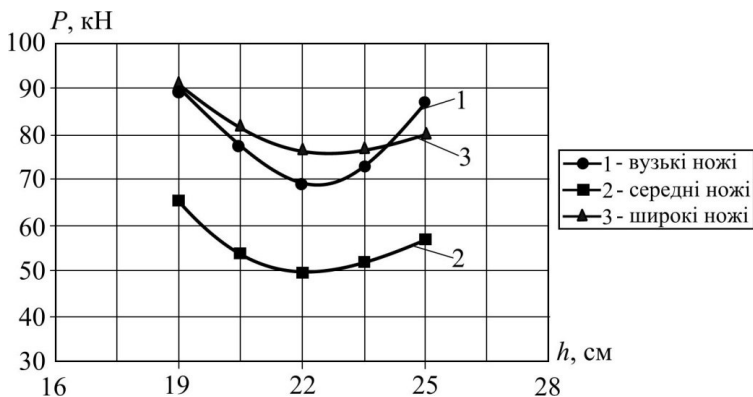


Рис. 4.2. Графічні залежності експериментальних досліджень багатоярусного різання від висоти ярусів h та ширини ґрунторозробних органів B :

1 – вузькі ножі з параметрами: $B_4 = 0,12$ м, $B_3 = 0,19$ м, $B_2 = 0,258$ м, $B_1 = 0,328$ м; 2 – середні (розрахункові) ножі з параметрами: $B_4 = 0,12$ м, $B_3 = 0,222$ м, $B_2 = 0,324$ м, $B_1 = 0,426$ м; 3 – широкі ножі з параметрами: $B_4 = 0,12$ м, $B_3 = 0,254$ м, $B_2 = 0,390$ м, $B_1 = 0,524$ м

Аналіз графічних залежностей (рис. 4.2) показав, що значно менший тяговий опір має дослідний зразок безвідвального багатоярусного землерийного робочого органа з комплектом середніх (розрахункових) ножів: $B_4 = 0,12$ м, $B_{к-3} = 0,222$ м, $B_{к-1} = 0,324$ м, $B_к = 0,426$ м, що, в свою чергу, підтверджує теоретичні розрахунки. Так, при висоті ярусів $h = 0,19$ м загальний тяговий опір безвідвального багатоярусного ЗРО складає 65,5 кН, при $h = 0,22$ м тяговий опір складає 49,8 кН, а при $h = 0,25$ м тяговий опір складає 57,2 кН. Також видно, що висота ярусів суттєво впливає на опір багатоярусного різання і для всіх комплектів лемешів має оптимальне значення $h = 0,22$ м. Збільшення тягового опору при використанні комплектів вузьких і широких ножів

свідчить про те, що в першому випадку збільшуються енерговитрати на ущільнення ґрунту в деформуючих камерах, а у другому випадку – на багатоярусне різання.

Проаналізувавши отримані дані, можна зробити висновок, що мінімальне значення тягового опору $P = 49,8$ кН має чотириярусний ЗРО з ширинами ґрунторозробних органів $B_4 = 0,12$ м, $B_3 = 0,222$ м, $B_2 = 0,324$ м, $B_1 = 0,426$ м та висотою ярусів $h = 0,22$ м.

Таким чином, підтверджена роботоздатність безвідвального багатоярусного робочого органа, визначено опори переміщенню робочого органа з різними параметрами, а також вплив багатоярусного робочого органа на ґрунтове середовище у зоні його дії. Отримані результати вказують на відповідність робочого процесу безвідвального багатоярусного робочого органа обов'язковим агротехнічним вимогам, що пред'являються до розробки ґрунту робочими органами пасивного типу.

4.4. ПОЛЬОВІ ТА ВИРОБНИЧІ ВИПРОБУВАННЯ БАГАТОЯРУСНИХ ВІДВАЛЬНИХ ЗЕМЛЕРИЙНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ

Результати першого етапу експериментальних досліджень, проведених у кар'єрі Любомирського силікатного заводу (Рівненська обл.), підтвердили теоретичні висновки, що стосуються залежності тягового опору від параметрів багатоярусного робочого органа (див. рис. 3.18). Результати досліджень загального і питомого опорів від ширини захвату робочого органа зображені на рис. 4.3.

Графічний аналіз показав, що при зміні ширини захвату і рознесення ґрунторозробних органів (висоти ярусів) по вертикалі відповідно в межах 0,35–0,50 і 0,2–0,3 м загальний і питомий опори при розробці ґрунту I і II категорії ($\sigma_{cm} = 0,2...0,57$ МПа, $C_{y\delta} = 3...8$) на глибину 1,0 м змінювалися відповідно від 190 до 110 кН і від 0,55 до 0,22 МПа. Мінімальні значення опорів мали місце для ширини захвату 0,5 м і висоти ярусів 0,3 м. При заглибленні робочого органа більше 1,0 м виникала виглибляюча сила, про що свідчив тиск у штокових порожнинах гідроциліндрів підйому робочого обладнання дреноукладача. Величина цієї сили на штоках гідроциліндрів складала 120–200 кН. Коефіцієнт розпушення ґрунту в щіліні становив: для піску – 1,10–1,20; для супіску – 1,15–1,25; для суглинку – 1,25–1,45; для глини – 1,25–1,40.

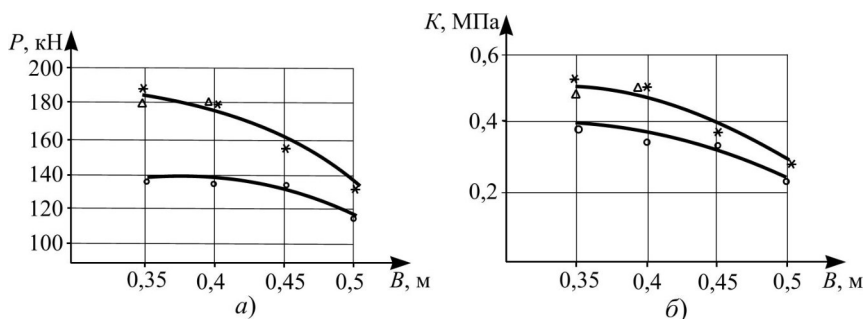


Рис. 4.3. Силкові залежності для багатоярусного робочого органа з постійною шириною захвату:

а) – загального опору; б) – питомого опору.

Δ – Δ – Δ – $h_{yp} = 0,2$ м; *–*–*– $h_{yp} = 0,25$ м; \circ – \circ – \circ – $h_{yp} = 0,3$ м
(ґрунт: $\sigma_{cm} = 0,2...0,57$ МПа, $C_{y\delta} = 3...8$)

Аналіз причин результатів досліджень, які отримані на цьому етапі, дозволив зробити ряд висновків і рекомендацій для

проведення експериментів на другому етапі. Однією із причин виглибляючого зусилля на робочому органі є від'ємний кут різання розрізаючого ножа і недостатній задній кут установа підножових плит. Крім того, за попередніми експериментальними даними (див. рис. 4.3) можна передбачити існування оптимальних значень ширини захвату і рознесення по вертикалі ґрунторозробних органів. Тому розширювати границі експериментальних досліджень доцільно на другому етапі.

Другий етап досліджень проводився на науково-навчальній базі НУВГП. Попередньо в розрізаючому ножі дослідного зразка в кожному ярусі зроблені вирізи таким чином, щоб усунути від'ємний кут різання, а також виготовлені лемеші з шириною захвату 0,65 м. Результати досліджень другого етапу представлені на рис. 4.4.

Залежність тягового опору від кута нахилу різальної частини до горизонту (див. рис. 4.4) має явно виражене мінімальне значення опору на всіх кривих. Оптимальний кут нахилу різальної частини до горизонту дорівнює $24\text{--}25^\circ$ (кут різання і задній кут становлять відповідно $31\text{--}32^\circ$ і $11\text{--}12^\circ$). При цьому куті мінімальне тягове зусилля для глибини розробки ґрунту 1,4 м залежно від висоти ярусів складає 155–180 кН. Зменшення або збільшення кута нахилу від оптимального значення призводить до зростання тягового опору, оскільки відповідно збільшуються або зменшуються кути різання і задні кути установа підножових плит, які суттєво впливають на тяговий опір.

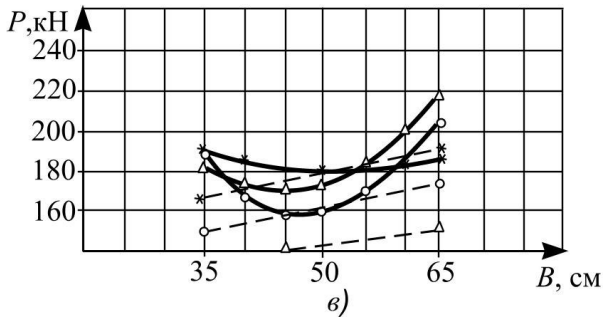
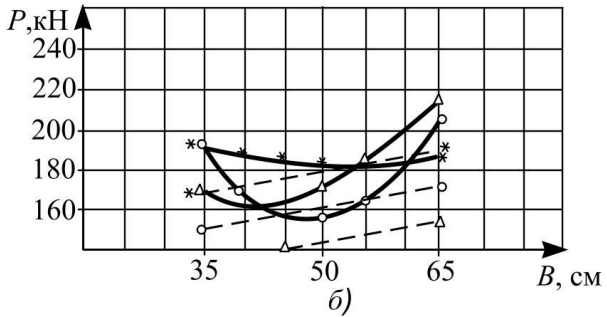
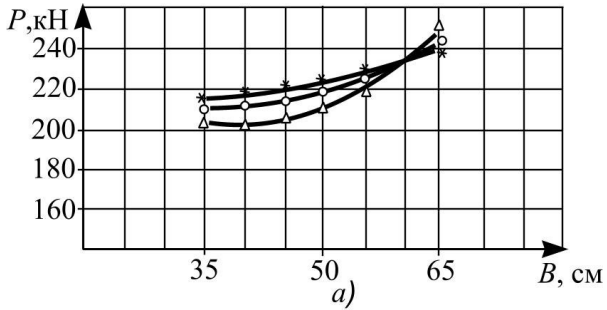


Рис. 4.4. Залежність опору переміщенню багатоярусного робочого органа від ширини його захвату: (грунт: $\sigma_{cm} = 0,05 \dots 0,85$ МПа, $C_{yo} = 3 \dots 15$)
 а) – $\beta_{mp} = 21^\circ$; б) – $\beta_{mp} = 23,5^\circ$; в) – $\beta_{mp} = 26^\circ$;
 $\Delta - \Delta - \Delta - h_{yp} = 0,2$ м; $\circ - \circ - \circ - h_{yp} = 0,25$; $\ast - \ast - \ast - h_{yp} = 0,3$ м
 — - експериментальна; - - - - теоретична

У межах оптимального значення кута нахилу β_{mp} мінімальне значення тягового опору в 155 кН має місце при ширині захвату 0,45–0,50 м (див. рис. 4.4) і рознесенні ґрунторозробних органів по

вертикалі 0,25 м (див. рис. 4.4). У цьому випадку тиск у штокових порожнинах гідроциліндрів підйому робочого обладнання досягав 0,1–0,5 МПа, а в поршневих порожнинах гідроциліндрів повороту коромисла дорівнював 1,8–2,2 МПа. Збільшення ширини захвату понад 0,5 м призводить до зростання лобової складової і загального опору.

При зменшенні ширини захвату зростає доля складових опору, які не залежать від ширини лобової поверхні інструменту. А це при незмінній висоті ярусів є причиною збільшення довжини перехідної зони (довжини контакту лобової поверхні робочого органа з ґрунтом непорушеної структури). Крім того, зменшується ширина прохідних вікон ($B-b$), нерівність $B-b \geq hk_1$ порушується, проходить пресування ґрунту у вікнах та їх забивання. Якщо висота ярусів 0,3 м і більше при незмінній їх ширині також порушується вище приведена нерівність, що призводить до аналогічного результату. Забиваються прохідні вікна і при зменшенні висоти ярусів до 0,15–0,2 м. Внаслідок пресування ґрунту в прохідних вікнах виникає додатковий опір.

Розбіжність між експериментальними і розрахунковими значеннями опору (див. рис. 4.4), не перевищує 22% для лівої граничної ширини захвату ($B = 0,35$ м) і 28% для правої границі ($B = 0,65$ м). Найменша розбіжність у 17% має місце для оптимальних параметрів робочого процесу, коли здійснюється принцип рівності площ і відсутнє пресування ґрунту в прохідних вікнах робочого органа. Значний відсоток розбіжності для граничних точок пояснюється виникненням у ході експериментів

додаткового опору від пресування ґрунту. Цей опір не враховує аналітична модель, оскільки це суперечить суті ґрунтозахисного процесу, який описує модель. Крім того, розбіжність пояснюється відмінністю реального і змодельованого ґрунтового середовища. Реальний ґрунт характеризується змінними фізико-механічними властивостями як по глибині, так і по довжині смуги захвату, а розрахунки проведені для однорідної моделі ґрунту.

Дослідженнями також встановлено, що перевід гідроциліндрів робочого обладнання із замкненого положення в плаваюче збільшує максимальну глибину розробки ґрунту від 1,4–1,5 м до 1,7 м. Якщо гідроциліндри знаходяться у замкненому положенні, робоче обладнання жорстко з'єднане з базовою машиною і мікрорельєф опорної поверхні викликає вертикальні переміщення багатоярусного робочого органа тим більші, чим більший його виліт. Також лемеші задніми гранями опираються на ґрунт, що призводить до часткової втрати зчіпної ваги і тягового зусилля. Залежність вертикальної складової повного опору різанню від кута нахилу різальної частини до горизонту (кута різання і заднього кута) для глибини розробки ґрунту 1,4 м зображена на рис. 4.5.

Із неї випливає, що для заданого вильоту дослідного зразка на робочий орган діє виглибляюча сила (вертикальна складова з від'ємним знаком). Ця сила тим більша, чим більша сумарна довжина задніх граней і менший задній кут ґрунторозробних органів.

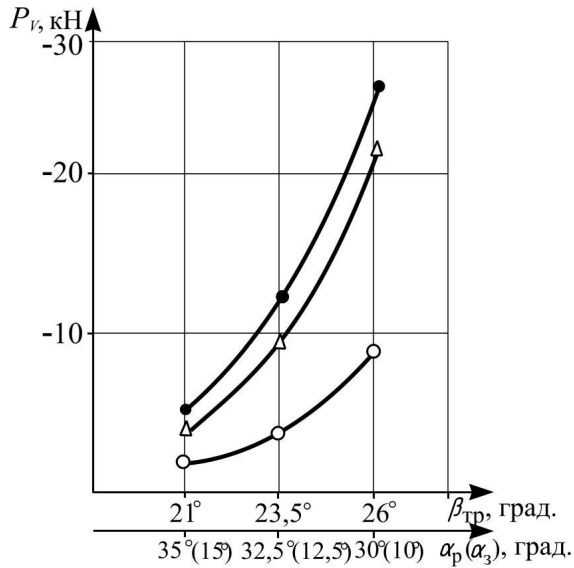
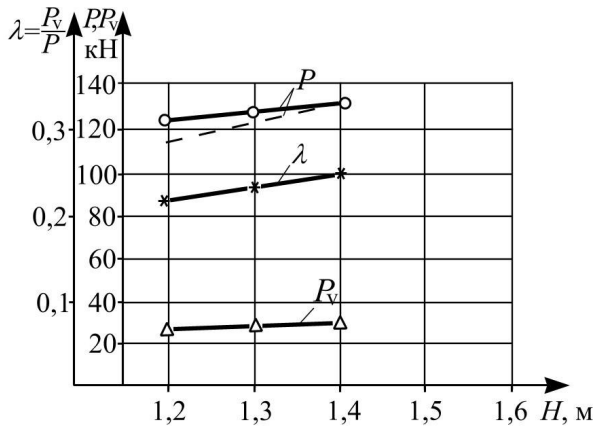
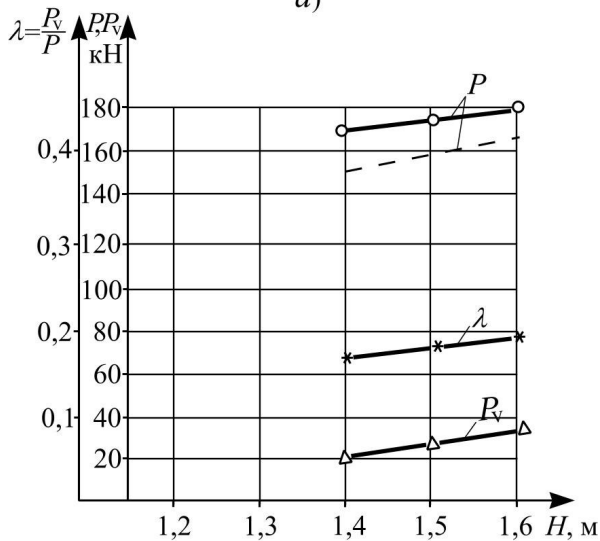


Рис. 4.5. Залежність вертикальної складової повного опору різанню від кута нахилу різальної частини експериментального зразка:
 (грунт: $\sigma_{cm} = 0,2 \dots 0,57$ МПа, $C_{y0} = 3 \dots 8$)
 ○—○—○— $B=0,35$ м; Δ — Δ — Δ — $B = 0,45$ м; •—•—•— $B = 0,55$ м

На дослідному полігоні Північного науково-дослідного інституту гідротехніки і меліорації проведені дослідження багатоярусного робочого органа (див. рис. 3.21, б) із зміщеною вперед по ходу машини різальною частиною (зменшений виліт робочого органа). Величина зміщення – 1,2 м. Нахил різальної частини до горизонту складав 23–25°, кут різання – 30° і заданий кут – 20°. Результати досліджень наведені на рис. 4.6 для режиму автоматичного витримування похилу дна щілини.



a)



б)

Рис. 4.6. Залежність складових повного опору переміщенню багатоярусного робочого органа від глибини розробки ґрунту:
 а) – $\sigma_{cm} = 0,3 \dots 0,33$ МПа, $C_{\gamma\delta} = 3 \dots 4$; б) – $\sigma_{cm} = 0,34 \dots 0,36$ МПа, $C_{\gamma\delta} = 5 \dots 7$;
 — — експериментальна; - - - - теоретична

Встановлено, що збільшення глибини розробки ґрунту I, II категорії в межах 1,2–1,6 м призводить до зростання опору

переміщенню від 124 до 182 кН. Вертикальна складова опору різанню має позитивний знак (заглиблююча) і також зростає від 22 до 36 кН. Відношення вертикальної складової до горизонтальної збільшується від 0,17 до 0,25.

Таким чином, багатоярусний робочий орган із зменшеним вильотом (на 1,2 м) різальної частини, яка має рознесення ґрунторозробних органів по вертикалі 0,25 м, кут нахилу до горизонту 23–25°, ширину захвату 0,45 м, забезпечує позитивну вертикальну складову опору і збільшення глибини розробки ґрунту на 0,2–0,3 м при тому ж тяговому зусиллі. Це є результатом більш ефективного використання зчіпної маси машини.

У процесі будівництва меліоративного об'єкту «Юршино» об'єднання «Псковмеліорація» проведені виробничі випробування чотири- і восьмиярусних робочих органів (див. рис. 3.22) для укладання дренажних ліній і проведення багатоярусної оранки із зворотнім обертанням пластів. У ході порівняльних випробувань визначені опори переміщенню багатоярусних і традиційних ЗРО безтраншейних дрепоукладачів, а також установлена меліоративна ефективність багатоярусних ЗРО відвального типу.

Результати досліджень тягового опору багатоярусних робочих органів наведені на рис. 4.7. Залежність опору переміщенню від глибини розробки ґрунту в першому наближенні можна прийняти лінійною. Зміна глибини розробки ґрунту від 0,17 м до 1,2 м збільшує опір переміщенню робочих органів від 7 до 113 кН на ґрунтах II категорії і від 28 до 160 кН на ґрунтах III категорії. При заглибленні робочого органа від 1,2 до 1,4 м

лінійний характер залежності порушується, що є наслідком зміни типу і структури робочого середовища.

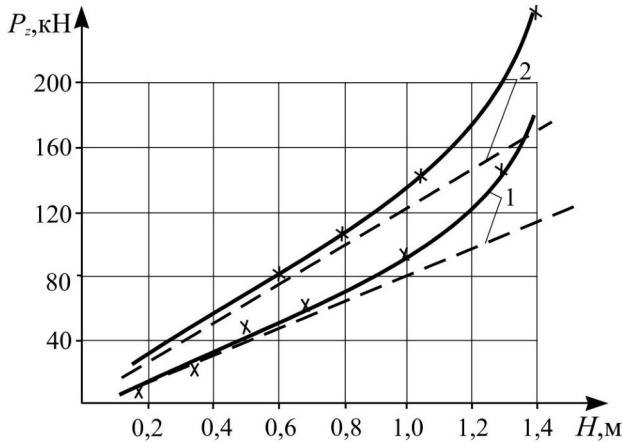


Рис. 4.7. Залежність опору переміщенню багатоярусного робочого органа з постійною шириною захвату ($B = 0,35$ м) від глибини розробки ґрунту: 1 – $\sigma_{cm} = 0,5 \dots 0,55$ МПа, $C_{y0} = 3 \dots 7$; 2 – $\sigma_{cm} = 0,52 \dots 0,67$ МПа, $C_{y0} = 8 \dots 12$
 — — експериментальна; - - - — теоретична

Під час порівняльних тягових випробувань дренаукладачів з багатоярусним і традиційним ЗРО, які проведені при глибині розробки 1,3 м ґрунту II категорії, спостерігалися значні коливання тягового зусилля на традиційному робочому органі від 110 до 168 кН. В ідентичних ґрунтових умовах тягове зусилля на багатоярусному робочому органі змінювалося в межах 130–140 кН. Питомий опір копанню ґрунту дорівнював: у першому випадку – 0,544 МПа; у другому – 0,31 МПа.

Крім того, в ході випробувань встановлено наступне:

- після укладання дренажу багатоярусним робочим органом щільність ґрунту в дренажній щілині зменшується

порівняно з природною щільністю ґрунту на 25–30% (з 2,0–2,2 г/см³ до 1,3–1,5 г/см³);

- *на ділянках з верхнім орним шаром товщиною 10–20 см над дренажною трубою, яка укладена багатоярусним робочим органом, утворюється водонепроникна стінка товщиною 5–10 см із незв'язних з кореневою системою частинок гумусного горизонту;*
- *заміна традиційного способу нарізання дренажної щілини багатоярусною оранкою дозволила знизити коливання навантажень на робочому органі і відповідно підвищити плавність ходу дреноукладача і якість витримування похилу, відхилення якого від проектного не перевищує $\pm 0,0005$;*
- *об'єм розпушеного ґрунту в зоні дії багатоярусного робочого органа в 1,6–1,8 рази більший, ніж у зоні дії ЗРО традиційної конструкції;*
- *порівняно з траншейним способом укладання дренажу спосіб багатоярусної оранки дозволяє значно знизити втрати гумусного шару, сумістити операції з укладання і зворотної засипки дренажу, укласти дренаж у нестійких ґрунтах, підвищити надійність і продуктивність дреноукладачів.*

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження визначення критичної глибини різання та розроблені алгоритми розрахунку основних параметрів багатоярусних ЗРО відкривають перспективу максимального збільшення питомої продуктивності землерийних машин для ґрунтозахисної (без перемішування ґрунтових шарів) та енергозберігаючої розробки ґрунту через оптимізацію конструкції робочого органа і схеми руйнування ґрунтового середовища.

Критична глибина для напівблокованого різання у 2 рази більша за критичну глибину блокованого різання ґрунтів. Відносна критична глибина при комбінованому різанні ґрунту $h_{кр.к}/b_k$ наближено рівна сумі двох критичних глибин блокованого різання $h_{кр.бл}/b_{бл}$ ($2h_{кр.бл} \approx h_{кр.к}$ і $b_k \approx b_{бл}$). Критична глибина напівблокованого різання крайніми боковими різцями у верхньому ярусі в 2 рази більша за критичну глибину різання асиметричного блокованого різання у нижньому ярусі, якщо $\gamma = \pi/2$.

Розроблені нові принципи створення багатоярусних ЗРО, які дають вигоду в тяговому зусиллі до 2 разів, в яких робота ярусів базується на принципах незалежності роботи попередніх ґрунторозробних органів, рівності витрат ґрунту в суміжних ярусах і рівності площ поперечного перерізу зрізаного шару ґрунту і прохідних вікон.

ІНФОРМАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА

1. Кравець С. В. Ґрунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладки підземних комунікацій. (Основи теорії, проектування та створення) : навч. посіб. Рівне : Вид-во РДТУ, 1999. 278 с. ISBN 966-7447-09-X.
2. Ткачук В. Ф., Кравець С. В., Романовский А. Л. Тенденции развития рабочих органов бестраншейных дреноукладчиков. *Гидромелиорация и гидротехническое строительство*. Львов : Вища школа, 1988. Вып. 16. С. 90–93.
3. Dinglinger E. Über dem Grabewiderstand. *Fördertechnik*. 1929. В. 22.
4. Ветров Ю. А., Баладинский В. Л. Машины для специальных земляных работ : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Строительные и дорожные машины и оборудование». Киев : Вища школа, 1980. 192 с.
5. Кравець С. В., Кованько В. В., Лук'янчук О. П. Наукові основи створення землерийно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв : монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 322 с.
6. Ткачук В. Ф., Кравець С. В., Кравець Л. Б. Определение критической глубины резания грунта ножом. *Горн., строит., дор. и мелиорат. Машины* : респ. межвед. науч.-техн. сб. К. : Техніка, 1987. Вып. 40. С. 22–28.
7. Rathje I. Der Schnittvorgang im Sande. *Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*. 1931. Н. 350.
8. Godwin R. I., Spoor G. J. Soil failure with narrow tines. *Agric Eng Res*. 1977. Vol. 22. Pp. 213–228.

9. Кравець С. В., Кирикович В. Д., Блажієвський В. С. Визначення критичної глибини різання при напівблокованому різанні ґрунту. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2007. Вип. 3(39). Ч. 2. С. 220–225.
10. Критичноглибинні двоярусні ґрунторозпушувачі: монографія / С. В. Кравець, М. П. Скоблюк, О. В. Стіньо, Р. В. Зоря ; за заг. ред. С. В. Кравця. Рівне : НУВГП, 2018. 235 с. ISBN 978-966-327-384-6
11. Мусійко В. Д., Коваль А. Б. Теорія та створення інноваційних землерийних машин безперервної дії : монографія. Вид. 2-е, допов. Київ : Вид-во Людмила, 2018. 280 с. ISBN 978-966-7638-47-5
12. Кравець С. В., Стіньо О. В. Визначення критичної глибини різання при комбінованому поярусному руйнуванні ґрунту. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Интенсификация. раб. проц. строит. и дор. Машин.* Дн-ск : ПГАСА, 2013. Вып. 72. С. 128–137.
13. Станевский В. П. Совершенствование рабочего процесса землеройных машин. К. : Вища школа. Изд-во при КГУ, 1984. 128 с.
14. Кравец С. В., Романовский А. Л. Перспективные направления в области создания бестраншейных дренажников. *Повышение эффективности использования мелиоративных земель* : тез. докл. респ. научн.-техн. конф. (Ровно, ноябрь 1984). Ровно, 1984. Ч. III. С. 81.

15. Кравец С. В., Ткачук В. Ф., Маланчук З. Р. Многоярусное разрушение массива горных пород : монография. Ровно : НУВГП, 2007. 272 с. ISBN 966-327-074-8
16. Multi-tier Plough Patent AU5352690 (A) E02B 11/02; E02F 5/10, 1991-04-08. URL: <https://www.patentguru.com/AU5352690A> (дата звернення: 10.02.2024).

Наукове видання

*Кравець Святослав Володимирович
Лук'янчук Олександр Петрович
Нечидюк Анатолій Анатолійович*

**ГРУНТОЗАХИСНІ ТА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ РОБОЧИ
ПРОЦЕСИ ЗЕМЛЕРИЙНО-ЯРУСНИХ МАШИН**

Монографія

Друкується в авторській редакції

Технічний редактор

Галина Сімчук

Підписано до друку 29.03.2024 р. Формат 60×84 ¹/₁₆.

Ум.-друк. арк. 7,0. Обл.-вид. арк. 7,3.

Тираж 300 прим. Зам. № 5633.

*Видавець і виготовлювач
Національний університет
водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до
державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.*