

**А.С. КОБЕЦЬ  
Б.А. ВОЛИК  
А.М. ПУГАЧ**

**ГРУНТООБРОБНІ МАШИНИ:  
ТЕОРІЯ, КОНСТРУКЦІЯ, РОЗРАХУНОК**

**МОНОГРАФІЯ**

**ДНІПРОПЕТРОВСЬК ♦ 2011  
«СВИДЛЕР А.Л.»**

**УДК 631.31**  
**ББК 40.722**  
**К 55**

**РЕЦЕНЗЕНТИ:**

**Л.М. ТЩЕНКО**, член-кор. УААН, д.т.н., професор (Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка);

**Л.М. ВАСИЛЬЄВ**, д.т.н., професор (Інститут геотехнічної механіки імені Н.С. Полякова НАН України)

*Друкується за рішенням вченої ради Дніпропетровського державного аграрного університету (протокол № 9 від 28 травня 2011 р.)*

**КОБЕЦЬ А.С.** Грунтообробні машини: теорія, конструкція, розрахунок: монографія / **А.С. КОБЕЦЬ, Б.А. ВОЛИК, А.М. ПУГАЧ**. – Дніпропетровськ : Вид-во «Свидлер А.Л.», 2011. – 140 с.

Наведено теорію взаємодії робочого органа довільної геометричної форми з ґрунтом і на її основі методики розрахунку конструктивних параметрів ґрунтообробних знарядь. Матеріали є результатом багаторічних аналітичних та експериментальних досліджень, виконаних при кафедрі сільськогосподарських машин Дніпропетровського державного аграрного університету. Викладено методики визначення механіко-технологічних властивостей ґрунту та теоретичні основи його розпушення.

Представлені матеріали базуються на основних положеннях землеробської механіки і є її подальшим логічним розвитком.

Монографія буде корисною спеціалістам, які працюють у галузі сільськогосподарського машинобудування, викладачам, аспірантам, магістрам.

**УДК 631.31**  
**ББК 40.722**

ISBN

© **А.С. КОБЕЦЬ,**  
**Б.А. ВОЛИК,**  
**А.М. ПУГАЧ,**  
**2011**

## ВСТУП

*Дослідження ґрунтообробних робочих органів та машин на їх основі являють собою досить складну задачу. Складність аналітичного дослідження обумовлена перш за все багатofакторністю процесів, що описуються, та їхнім імовірнісним характером. Відсутність чіткої математичної моделі у свою чергу ускладнює розрахунок та проектування машини. Як наслідок, основна частка відпрацювання конструктивних параметрів припадає на польові та лабораторні випробування.*

*Сучасні вимоги до ґрунтообробних знарядь потребують створення їх на базі технологій, що передбачають максимальну адаптацію до технологічного процесу з урахуванням конкретних ґрунтово-кліматичних умов роботи. Основна мета при цьому полягає в забезпеченні необхідних показників якості розпушення, під якими передусім розуміють отримання ґрунтових агрегатів певного розміру та покращенні техніко-економічних результатів роботи.*

*Забезпечити отримання на проектному етапі з достатньою часткою ймовірності саме необхідного розміру агрегатів можливо за умови якомога повно розробленої математичної моделі взаємодії робочої поверхні знаряддя з оброблюваним середовищем. Це перш за все передбачає наявність математичних моделей ґрунту та самого робочого органа.*

*Найбільш близько до створення моделі взаємодії знаряддя довільної геометричної форми зі середовищем підійшов у своїх наукових розробках А.М. Панченко [3], який створив аналітичну теорію розрахунку ступеня розпушення ґрунту для різних складників різального периметра, включаючи різні варіанти орієнтації у просторі. Методика базується на тому, що для формування ґрунтового агрегату необхідно подолати внутрішню напругу, яка залежить від результуючої сил зчеплення та кута укладання часток. Останні два параметри легко визначаються аналітично зі залученням мінімуму експериментальних даних.*

*У монографії, що пропонується, розглянуто теоретико-практичні проблеми проектування та експлуатації ґрунтообробних машин на основі досліджень, виконаних кафедрою сільськогосподарських машин Дніпропетровського державного аграрного університету протягом 2000–2011 років у співробітництві з ДП «Гуляйпільський механічний завод» ВАТ «Мотор-Січ».*

# 1. МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГРУНТУ

Грунтами називають пухкі гірські породи, що утворилися в результаті фізичного та хімічного вивітрювання літосфери (кам'яної оболонки землі). Визначальна особливість ґрунтів – малі зв'язки між частками, що його утворюють, порівняно з міцністю самих часток. Верхній шар природних ґрунтів збагачений гумусом і має важливу властивість – родючість.

Ґрунт складається з твердої, рідинної та газової фаз. Тверду фазу прийнято поділяти на дві великі групи за приведеним діаметром часток. Частки, діаметром більші за 0,01 мм, формують структуру (каркас) ґрунту та утворюють пори. Частки, розміром менші за 0,01 мм, виконують роль, яка аналогічна ролі білка у живому організмі – забезпечують обмін між твердою та рідинною фазами, утримують на собі поживні речовини та значну кількість води.

Поровий простір між частками заповнений рідиною або газом. Рідинна фаза, і перш за все ґрунтова волога, переносить поживні речовини від ґрунтових часток до кореня рослини. У воді перебігають різноманітні реакції. Вона підтримує колоїди (мінеральні частки розміром менш 100 нм) у легкодоступному стані. Проте якщо всі пори будуть зайняті вологою і повітря в них буде відсутнім, то корінь рослин почне пригнічуватись і поступово відмирати.

Вільні від води пори зайняті повітрям. Його склад відрізняється від складу повітря атмосфери, в першу чергу збільшеним вмістом вуглекислого газу. Виділяють його мікроорганізми, що існують у рештках рослинного та тваринного походження, коренях рослин. Уночі, коли ґрунт охолоджується, його пори всмоктують повітря з атмосфери, вдень, навпаки, пори його «видихають». У такий спосіб відбувається обмін з атмосферою: ґрунт поглинає кисень і азот, виділяє вуглекислий газ. Окремі мікроорганізми поглинають азот і саме так фіксують його у ґрунті. Фіксація азоту є одним з найголовніших ґрунтових процесів.

Обов'язковий компонент ґрунту – живі організми. Саме вони перетворюють гірську породу на ґрунт. Рослини синтезують органічну речовину з неорганічних сполучень, використовуючи енергію сонця, виробляють первинну біологічну масу. Під час відмирання на рештках рослин розселяються мікроорганізми та гриби.

Мікроорганізми переводять поживні речовини, законсервовані в рештках рослинного та тваринного походження, у рухому форму, перетворюючи їх на гумус. Саме діяльність мікроорганізмів сприяє накопиченню гумусу в ґрунті. Як і всі органічні речовини, гумус безпосередньо рослинами не засвоюється. Маючи велику ступінь поглинання, він утримує харчові мінеральні елементи в легкодоступній формі. Гумус також бере участь у створенні ґрунтової структури. Він склеює окремі мінеральні гранули, утворюючи пористі ґрунтові агрегати. Чим більше у ґрунті гумусу, тим ґрунтові агрегати міцніші і мають більшу пористість. Ґрунтові агрегати добре поглинають вологу та чинять опір розпилюванню. Отже, у твердій фазі ґрунту потрібно відрізнити гранули і агрегати. Гранула – це обособлена мінеральна частка, молекули якої пов'язані хімічно. Ґрунтові агрегати – пористі зерна, утворені шляхом склеювання гумусом елементарних ґрунтових часток.

Особливо велике значення для ґрунту мають черв'яки. Вони переробляють весь поверхневий шар, пропускаючи його через свій організм. Проходячи по кишковому тракту, ґрунт насичується слизю і стає агрегатованим. Утворюються так звані копроліти: агрегати розміром 1–2 мм, збагачені гумусом та мікроорганізмами. Утворений такими агрегатами ґрунт має найвищу продуктивність.

Таким чином, ґрунт є багатокомпонентним середовищем, властивості якого здебільшого залежать від складового співвідношення утворюючих його компонентів. Але якщо його сприймати як квазіоднорізнотну структуру, можна виділити ряд загальних властивостей, які з достатнім ступенем імовірності будуть його характеризувати.

Принципова відмінність механіко-технологічних властивостей ґрунту від матеріалів іншого походження полягає саме в багатокомпонентності його складу. У результаті наявності трьох фаз при прикладанні сили процес деформування буде супроводжуватися нерівномірним розподілом тиску. Таке деформоване середовище в термодинамічному розумінні є неурівноваженим. Якщо його після навантаження залишити сам по собі, то розпочнеться вирівнювання напруги в системі з розсіюванням енергії. Розсіювання енергії є наслідком переходу частини енергії у тепло, змінням щільності, порового тиску вологи та повітря, а також положення агрегатів.

Процес поступового розсіювання накопиченої енергії має назву релаксація. Час, протягом якого накопичена напруга зменшується в « $e = 2,71$ » раз, має назву час релаксації.

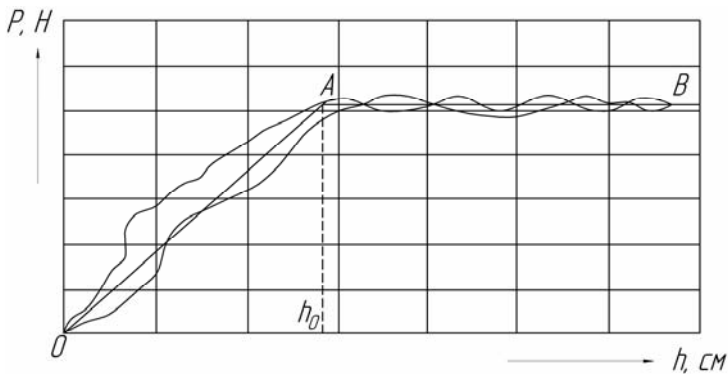
Характер поведінки ґрунту значною мірою залежить від співвідношення часу дії навантаження і часу релаксації. Якщо час дії навантаження перевищує час релаксації, то відбувається накопичення енергії, якщо навпаки – то накопичення відсутнє.

Як результат багатоконпонентності у ґрунті прийнято відрізняти окремо об'ємну і питому вагу. Об'ємна вага – це вага одиниці об'єму абсолютно сухого ґрунту в природному стані (з порами). Питома вага – це вага твердої складової ґрунту (без пор).

### 1.1. ТВЕРДІСТЬ ҐРУНТУ

Принцип дії більшості ґрунтообробних знарядь передбачає змінання ґрунту у процесі роботи. Тому опір ґрунту змінанню є однією з основних його механічних характеристик. Опір змінанню отримав назву *твердість*, під якою розуміють середнє питоме зусилля, яке потрібне для занурення у ґрунт штампа на обумовлену глибину.

У разі занурення у ґрунт, наприклад конічного штампа, опір зануренню змінюється за кривою, зовнішній вигляд якої представлено на рис. 1.1.



**Рис. 1.1. Діаграма змінання ґрунту:**  $h$  – глибина занурення штампа;  $P$  – опір зануренню

На відрізку  $OA$ , що відповідає глибині  $h_0$ , опір змінанню зростає пропорційно глибині занурення. Починаючи з точки  $A$ , штамп продовжує занурюватись у ґрунт за постійного зусилля, що відповідає межі несучої спроможності. Тому за вказаним графіком мож-

на визначити дві характеристики: твердість і коефіцієнт об'ємного змінання. Твердість в довільно взятій точці на ділянці  $OA$  визначається за формулою

$$p = P_i / S,$$

де  $P_i$  – зусилля;

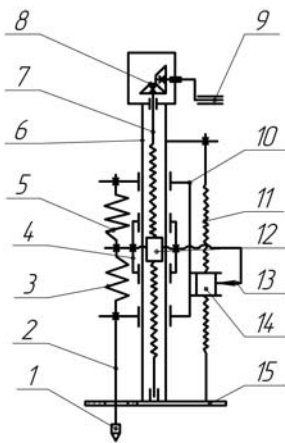
$S$  – площа перетину штампу.

Коефіцієнт об'ємного змінання визначається на відрізку  $AB$

$$Q = \frac{P_{AB}}{S \cdot h_0},$$

де  $P_{AB}$  – середнє зусилля на відрізку  $AB$ .

Для визначення твердості застосовують різні за конструкцією твердоміри. Найбільш поширеними з них є конструкції ВІСГОМ, Рев'якіна, Качинського [1, 2]. Твердомір конструкції ВІСГОМ (рис. 1.2) складається з трубчастого стояка 1, закріпленого на платформі 2. Черв'як 3 через конічні шестерні 4 приводиться в обертання від рукояті 5. На черв'як насаджено напрямну втулку 7, яка приєднана до внутрішньої каретки 6. Зовнішня каретка 12 охоплює внутрішню каретку і з'єднана з нею пружинами 8 і 9. На зовнішній каретці закріплено шток 10 з плунжером 11 і стрічкопротяжний механізм, барабан 13 якого обертається при переміщенні по черв'яку 15. Олівець 14 пишучого механізму системою тяг пов'язаний з внутрішньою кареткою 6.



**Рис. 1.2. Схема твердоміру ВІСГОМ:**

1 – стояк; 2 – платформа; 3 – черв'як; 4 – шестерня конічна; 5 – рукоять; 6 – каретка внутрішня; 7 – втулка напрямна; 8, 9 – пружини; 10 – шток; 11 – плунжер; 12 – каретка зовнішня; 13 – барабан стрічкопротяжного механізму; 14 – олівець пишучого механізму; 15 – черв'як

Прилад працює у такий спосіб. Під час обертання черв'яка 3, що здійснюється від рукояті 5, починає рухатися напрямна втулка 7, яка у свою чергу переміщує внутрішню каретку 6. Якщо плун-

жер 11 має опір на занурення, пружина 9 стискується, а пружина 8 розтягується пропорційно їхньому коефіцієнту пружності. Це сприяє переміщенню кареток 6 і 12 одна відносно одної, що фіксує олівець самописця. Знаючи коефіцієнт пружності (калібр пружини) та величину відносного переміщення кареток, можна визначити миттєве зусилля для довільної точки

$$P_i = k \cdot Y,$$

де  $k$  – калібр пружини, Р/мм;

$Y$  – відносне переміщення кареток, мм.

У ґрунтових умовах Дніпропетровської області середня твердість ґрунту до обробітку становить 1,27–3,50 МПа, після обробки плоскорізом – 0,40–0,60 МПа, після обробітку плугом – 0,18 МПа.

## 1.2. ПИТОМЕ ЗЧЕПЛЕННЯ ЧАСТОК

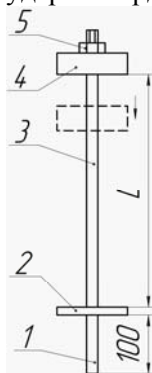
Дослідження процесу різання ґрунтів робочими органами різної геометричної форми показує, що від леза інструмента поширюється лінії сколювання (тріщини) вперед за ходом знаряддя і вбік. При цьому утворюється площа сколювання, яка значною мірою (до 80 %) визначає тяговий опір знаряддя. Опір сколюванню обчислюють за формулою

$$T = C_n \cdot F,$$

де  $C_n$  – питома зчеплення часток;

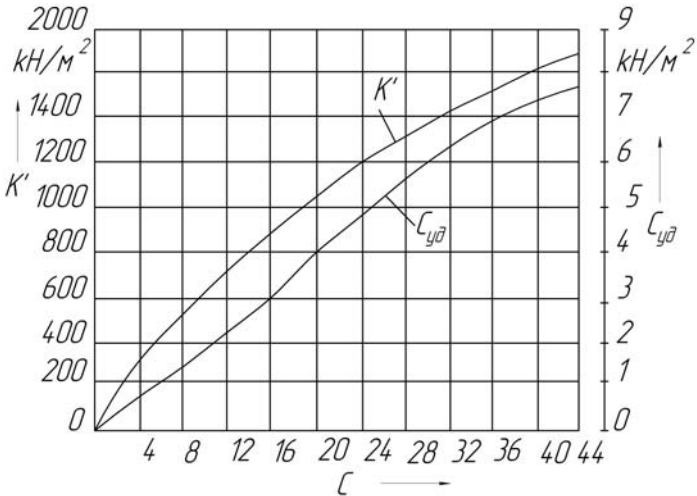
$F$  – площа сколювання.

Знаючи закономірності поширення ліній сколювання, можна обчислити його площу з використанням відомих геометричних співвідношень. Питоме зчеплення часток визначають за кількістю ударів твердоміра ДорНДІ (рис. 1.3).



**Рис. 1.3. Твердомір ДорНДІ:** 1 – напрямна  
2 – обмежувач; 3 – наконечник; 4 – вантаж;  
5 – гайка

Суть полягає у підрахунку кількості ударів вантажу 4 до повного занурення на глибину 100 мм наконечника 3 твердоміра. При цьому робота, яку виконує вантаж за кожен удар, повинна дорівнювати 1 кг·м. До особливостей конструкції можна віднести те, що наконечник 3 твердоміра виконано циліндричної форми і працює виключно на зминання.



**Рис. 1.4.** Залежність питомого зчеплення часток та межі несучої спроможності від кількості ударів щільноміра ДорНДІ [3]

Далі, відповідно до графіка (рис. 1.4), якого побудовано на базі експериментальних даних, за кількістю ударів вантажу визначають питоме зчеплення часток ( $C_{уд}$ ). Додатково можна визначити і межу несучої спроможності ( $K'$ ).

У ґрунтових умовах Дніпропетровської області питоме зчеплення часток ґрунту знаходиться в межах 2–5 кН/м<sup>2</sup>.

### 1.3. КОЕФІЦІЄНТ ЗОВНІШНЬОГО ТЕРТЯ

Коефіцієнт зовнішнього тертя – це коефіцієнт пропорційності у рівнянні Кулона, що пов'язує між собою силу тертя і нормальний тиск

$$F = f_1 \cdot N, \quad (1.1)$$

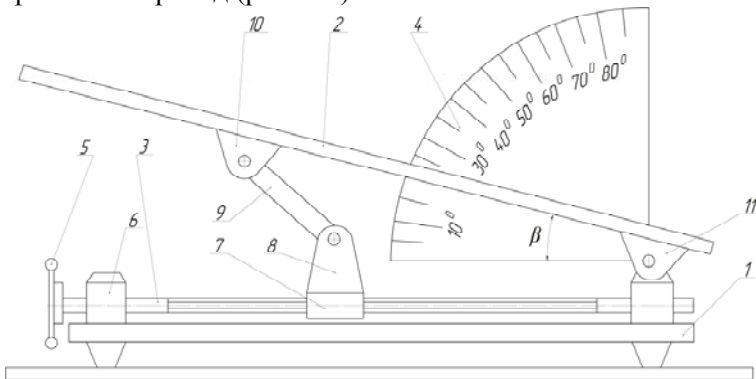
де  $F$  – тангенційне зусилля, необхідне для переміщення;  
 $N$  – нормальний тиск;  
 $F_f$  – коефіцієнт тертя.

Сили  $F$  і  $N$  можна визначити експериментально, тоді коефіцієнт тертя матиме вигляд відношення:  $f_f = F / N$ .

Але визначити коефіцієнт  $f_f$  можна і без виміру сил  $F$  і  $N$ . Рівняння (1.1) являє собою пряму лінію, що проходить через початок координат під кутом до осі  $OX$ . Легко побачити, що тангенс цього кута дорівнює коефіцієнту  $f_f$ . З викладеного випливає, що коефіцієнт тертя можна обчислити, знаючи напрямки рівнодіючої  $R$  і нормальної  $N$  сил.

Відрізняють два різновиди коефіцієнтів тертя: коефіцієнт тертя спокою і коефіцієнт тертя ковзання. Дія першого коефіцієнта поширюється на систему доти, доки тіло не почало рух по поверхні. Іншими словами, цей коефіцієнт визначає зусилля, необхідне для початку руху. Далі діє коефіцієнт тертя ковзання, який завжди менше коефіцієнта тертя спокою і визначає силу, потрібну для підтримки руху. У загальному випадку коефіцієнт тертя ковзання залежить від швидкості руху. Але для швидкостей, на яких працюють сільськогосподарські машини, його можна вважати постійним.

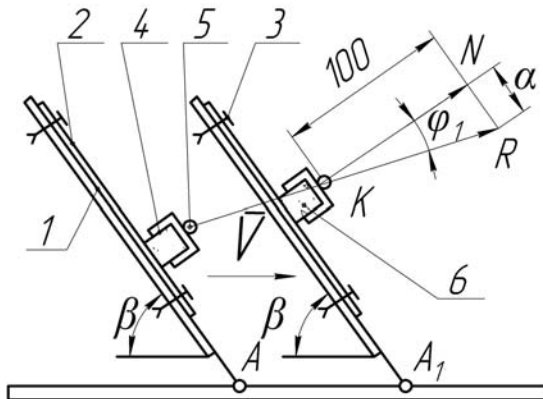
Для визначення коефіцієнта тертя спокою можна використати найпростіший прилад (рис. 1.5).



**Рис. 1.5.** *Схема приладу для визначення коефіцієнта тертя спокою: 1 – плита; 2 – рухома поверхня; 3 – гвинт; 4 – шкала; 5 – рукоятка; 6 – опора; 7 – гайка; 8 – кронштейн приводу; 9 – тяга; 10 – кронштейн рухомої поверхні; 11 – кронштейн опорний*

На горизонтальній плиті 1 закріплено дві опори 6, у яких встановлено з можливістю обертання гвинт 3. На гвинті розміщено гайку 7, яка кронштейном 8 і тягою 9 зв'язана з кронштейном 10 рухомої поверхні 2. Правий за схемою кінець поверхні 2 кронштейном 11 опирається на опору 6.

При обертанні гвинта 3, що здійснюється рукояткою 5, кут нахилу рухомої поверхні 2 змінюється у діапазоні  $0-9^\circ$ . Відлік значення кута виконується за шкалою 4. На поверхні 2 у процесі експерименту закріплюється смуга одного з досліджуваних матеріалів. Тому до комплекту установки входить струбцина (на схемі не показано). Початок руху досліджуваного матеріалу по рухомій поверхні 2 відповідає моменту, коли  $\beta = \varphi_1$ , де  $\varphi_1$  – кут зовнішнього тертя спокою.



**Рис. 1.6. Схема приладу Желіговського:**

1 – лінійка; 2 – смуга з досліджуваного матеріалу; 3 – струбцина;  
4 – каретка; 5 – олівець; 6 – проба досліджуваного матеріалу

Коефіцієнт тертя ковзання визначається за допомогою спеціальних приладів різної конструкції. Найпростішим з них є прилад системи Желіговського (рис. 1.6). Прилад складається зі звичайної креслярської дошки, яку встановлено горизонтально. На відміну від серійного креслярського обладнання (кульмана) лінійку 1 встановлено на полозках, що підтримує її на відстані 5–10 мм над поверхнею дошки. До комплекту входять дві струбцини 3, за допомогою яких до лінійки прикріплюють смугу 2 одного з пари досліджуваних матеріалів, та каретка 4 зі закріпленим олівцем 5. У каретку встановлено пробу 6 іншого з досліджуваних матеріалів. Карет-

тка має кулькові опори, що дозволяє їй рухатися по поверхні без контакту проби і самої каретки з дошкою.

Визначення кута зовнішнього тертя ковзання розпочинають із встановлення креслярської дошки горизонтально і кріплення під лінійку 1 ползків. Струбцинами 3 з обох боків кріплять пластину 2 з досліджуваного матеріалу. Пластина 2 і лінійка не повинні торкатися поверхні дошки.

Кут  $\beta$  встановлюють у діапазоні 30–50°. У каретку 4 встановлюють пробу з іншого досліджуваного матеріалу. Поверхня проби повинна на 3–5 мм виступати за обріз каретки. Лінійку встановлюють у положення  $A$  і підводять до неї каретку, як показано на рис.1.6. Повільно переводять лінійку із положення  $A$  в положення  $A_1$ . При цьому олівець 5 намітить напрямок лінії  $R$ .

Намічають усереднене положення лінії  $R$  і з довільно вибраної точки  $K$  проводять нормаль  $N$  до поверхні лінійки.

З точки  $K$  на нормалі  $N$  відкладають відрізок 100 мм і з отриманої точки встановлюють перпендикуляр до перетину з  $R$ . Заміряють « $a$ » і обчислюють значення коефіцієнта тертя ковзання

$$\varphi_1^K = a / 100.$$

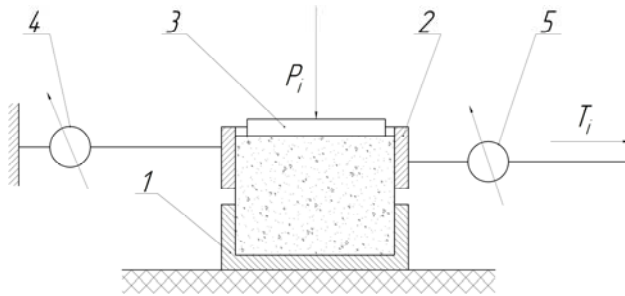
Кут зовнішнього тертя спокою для чорнозему становить 22–30°, кут зовнішнього тертя ковзання за правило дорівнює 70–85 % від кута тертя спокою.

#### 1.4. ГРАНИЧНИЙ ОПІР ҐРУНТУ НА ЗСУВ

Під зсувом розуміють переміщення однієї його частини по відношенню до іншої у результаті дії бокового (тангенціального) тиску. Опір ґрунту на зсув складається із зчеплення, зумовленого молекулярними та капілярними силами, і сил внутрішнього тертя. Залежність між згаданими величинами отримано в результаті проведення серії експериментів на зсув.

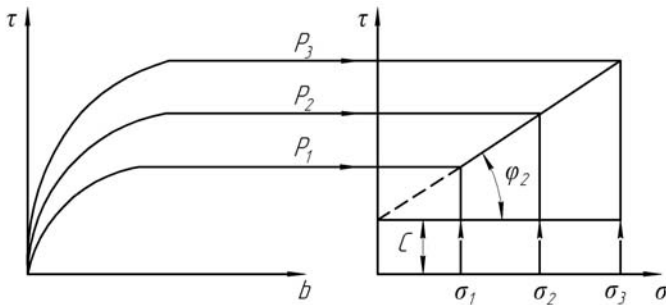
Зразок ґрунту поміщають у зсувний прилад (рис. 1.7). Після навантаження зразка силою  $P$  прикладають горизонтальне навантаження  $T$ . Поступово збільшуючи його, заміряють мікрометром 4 відносне переміщення  $b$  верхнього кільця 2 відносно нижнього 1, поки не відбудеться остаточне порушення ґрунту. Величину зусилля відраховують динамометром 5. Введять позначення:  $\tau = T / F$  –

зсувна напруга,  $\sigma = P / F$  – стискаюча напруга, де  $F$  – площа поперечного перетину зразка.



**Рис. 1.7. Схема лабораторної установки:** 1 – обойма нерухома; 2 – обойма рухома; 3 – кришка; 4 – мікрометр; 5 – динамометр

За результатами дослідів будують експериментальний графік залежності  $\tau$  від  $b$  за декількох значень стискаючої сили  $P$  (рис. 1.8, ліва частина). У правій частині графіка шляхом переносу будується залежність  $\tau$  від  $\sigma$ .



**Рис. 1.8. Графічна інтерпретація закону Кулона**

Як показали результати чисельних дослідів, залежність граничного опору зсуву від стискаючої напруги апроксимується прямою, поставленою під кутом  $\varphi_2$  до горизонталі. Ця пряма описується рівнянням

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg}(\varphi_2), \quad (1.2)$$

яке отримало назву закону Кулона.

## 1.5. КОЕФІЦІЄНТ ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ В'ЯЗКИХ МАТЕРІАЛІВ

Коефіцієнт внутрішнього тертя в'язких матеріалів доцільно визначати на підставі закону Кулона.

Рівняння (1.2) має два невідомих. Тому для визначення  $c$  і  $\varphi_2$  необхідно провести два зсувних експерименти з різними значеннями  $\sigma$  і заміряти  $\tau$ . Сила зчеплення на відміну від сили тертя не залежить від нормального тиску, тому отримаємо два рівняння з двома невідомими:

$$\tau_1 = c + \sigma_1 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_2);$$

$$\tau_2 = c + \sigma_2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_2).$$

Розв'язуючи систему рівнянь, отримуємо значення коефіцієнта внутрішнього тертя

$$f_2 = \operatorname{tg}(\varphi_2) = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\sigma_2 - \sigma_1}. \quad (1.3)$$

Відповідно зчеплення ґрунту дорівнюватиме

$$C = \tau_1 - \sigma_1 \cdot f_2 = \tau_2 - \sigma_2 \cdot f_2. \quad (1.4)$$

## 1.6. ЛИПКІСТЬ

*Липкість* – це здатність ґрунту прилипати до предметів, що його торкаються. Проявляється вона тоді, коли сили зчеплення між частками ґрунту менше, ніж між ґрунтом і матеріалом предмета, що його торкається. Липкість визначається як відношення

$$\tau = P / S, \quad (1.5)$$

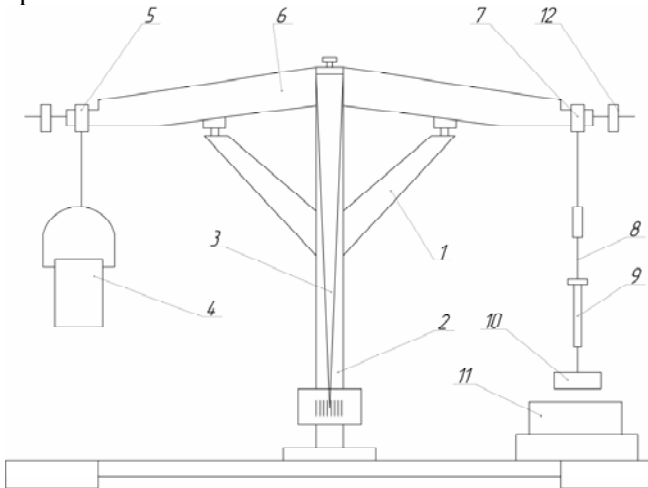
де  $P$  – зусилля, необхідне для відриву предмета, Н;

$S$  – площа контакту, м<sup>2</sup>.

Липкість залежить від гранулометричного, хімічного і мінералогічного складу, від структури і вологості ґрунту. Ґрунти глинисті і безструктурні прилипають сильніше, ніж легкі та структурні. Підвищення вологості до певної межі липкість збільшує, а потім зменшує. У структурних ґрунтах, наприклад чорноземах, липкість починає проявлятися за 60–80 % загальної вологості. Проявлення липкості пов'язано з вертикальним тиском на контактуючі поверхні. Тому для характеристики липкості і практичного використання даних її досліджують залежно від вологості і нормального тиску.

Для визначення липкості на практиці найчастіше використовують прилад Качинського (рис. 1.9).

Прилад являє собою видозмінені технохімічні терези, права чашка котрих замінена спеціальним підвісним стержнем 9, на кінці якого закріплено диск 10 площею перерізу  $10 \text{ см}^2$ . Диск і стержень урівноважені ємкістю 4. Підвісний стержень має гвинтове кріплення 8, що дає можливість змінювати його довжину. Коромисло 6 встановлено на нерухому колонку 2, закріплену на металевій плиті. Опорою для призми коромисла слугує сталева подушка верхньої частини колонки. Тяга всередині колонки піднімає і опускає аретир 1.



**Рис. 1.9. Схема лабораторної установки для визначення липкості ґрунту:** 1 – аретир; 2 – колонка; 3 – стрілка балансування; 4 – ємність для піску; 5 – начіпка ліва; 6 – коромисло; 7 – начіпка права; 8 – гвинтове кріплення; 9 – підвісний стержень; 10 – диск; 11 – ємність для досліджуваного матеріалу; 12 – гвинт балансування

Щоб визначити липкість, на сітчасте дно формочки 11 кладуть фільтрувальний папір і зверху – досліджуваний зразок ґрунту. Формочку встановлюють у ванну з водою для насичення до повної вологомісткості, після чого переносять її на плиту приладу і розміщують під диском 10. Змінюючи довжину стержня 9, диск приводять у контакт із зразком ґрунту. Диск довантажують гирею, поки він остаточно не прилипне до зразка. У стакан 4 тонкою струмин-

кою сиплють пісок до моменту відриву диска. Пісок зважують і за формулою (1.5) визначають липкість ґрунту.

Досліджуваний зразок підсушують і повторюють дослідження за іншої вологості. На основі отриманих даних будують графік залежності липкості від вологості ґрунту.

## 1.7. ВОДОПРОНИКНІСТЬ

Під *водопроникністю* розуміють здатність вбирати та пропускати крізь товщу горизонтів і шарів воду з поверхні. Вода в момент надходження на поверхню ненасиченого ґрунту вбирається і рухається вниз та в горизонтальному напрямку. Цей рух відбувається під впливом градієнтів сорбційних і меніскових сил, гідростатичного напору. Чим важчий ґрунт за гранулометричним складом, чим більше в ньому капілярних пор, чим він сухіший, – тим більше води проникає. Весь процес характеризується *коефіцієнтом вбирання*.

Проходження води через водонасичені (до повної вологомісткості) шари ґрунту під впливом гравітації та градієнта напору називається *фільтрацією* і характеризується *коефіцієнтом фільтрації*. Після припинення надходження води зверху відбувається перерозподіл її в ґрунтовій товщі – стікання в нижні горизонти і шари. Цей процес характеризується *коефіцієнтом водовіддачі*.

Приведені коефіцієнти прийнятні як до всієї досліджуваної товщі, так і окремих горизонтів для визначення методів і норм поливу, міждренної відстані, глибини зволоження. У природних умовах усі три процеси взаємопов'язані, відокремити їх один від одного практично неможливо. Наприклад, фільтрацію у чистому вигляді можна спостерігати на дні водоймищ або у випадку тривалого надходження на поверхню ґрунту великих потоків води, коли всі шари аж до ґрунтових вод повністю насичені. На практиці частіше за все спостерігають вбирання, оскільки для експерименту воду подають в обмеженій кількості. Кінцем вбирання і початком фільтрації в польових умовах вважають момент встановлення рівномірної витрати води.

На величину та характер водопроникності здебільшого впливає порозність ґрунту, величина, форма і направленість пор, що у свою чергу пов'язано з гранулометричним складом. У ґрунтах лег-

кого гранулометричного складу, наприклад піщаних і супіщаних, водопроникність залежить лише від складу гранулометричних елементів. У структурних ґрунтах вона обумовлена розмірами агрегатів, їх розташуванням і головне – водоміцністю. Згодом водопроникність зменшується, бо при насиченні ґрунту водою відбувається порушення структури і поступове ущільнення за рахунок замулювання порового простору.

Рух вільної води по ґрунту зверху вниз обумовлений різницею напору на початку і наприкінці фільтрувального шару, швидкість руху води зростає із збільшенням різниці напору і зменшенням довжини фільтрувального шляху, оскільки з останнім пов'язаний опір, який відчуває вода при русі. Залежність швидкості фільтрації від величини напору була виявлена Дарсі у 1856 році

$$Q = k \cdot S \cdot t \cdot H / L, \quad (1.6)$$

де  $Q$  – витрати води, м<sup>3</sup>;

$k$  – коефіцієнт фільтрації, м/с;

$t$  – час фільтрації, с;

$H$  – різниця гідростатичного тиску на верхньому і нижньому рівнях фільтрувального шару, м;

$L$  – довжина шляху фільтрації, м.

Відношення втрати напору  $H$  до довжини шляху фільтрації  $L$  носить назву *гідравлічного градієнта*

$$J = H / L. \quad (1.7)$$

Підставляючи формулу (1.7) у рівняння (1.6), одержимо, що

$$Q = k \cdot S \cdot t \cdot J. \quad (1.8)$$

Тоді коефіцієнт фільтрації має бути записаний так:

$$k = \frac{Q}{S \cdot t \cdot J}.$$

Швидкість фільтрації –

$$V = k \cdot J.$$

При градієнті напору  $J = 1$  коефіцієнт фільтрації  $k$  дорівнює швидкості фільтрації.

Величина коефіцієнта фільтрації залежить не тільки від властивостей ґрунту, а і від в'язкості фільтрувальної рідини. В'язкість у свою чергу залежить від температури і мінералізації. Тому для порівняння дані з водопроникності прийнято приводити до єдиної температури +10° за Цельсієм, використовуючи для розрахунків коефіцієнт Хазена

$$i = 0,7 + 0,03 \cdot t^{\circ},$$

де  $t^{\circ}$  – температура використаної води, град.

З урахуванням поправки на температуру коефіцієнт фільтрації дорівнює

$$k_{10} = \frac{Q}{(0,7 + 0,03 \cdot t^{\circ}) \cdot S \cdot t \cdot J}$$

У процесі визначення водопроникності треба враховувати, що коефіцієнт Хазена працює в досить вузькому діапазоні температур, приблизно від 10 до 30 °С.

Водопроникність частіше всього прийнято виражати в міліметрах водяного стовпчика за одиницю часу. Для оцінки водопроникності ґрунту використовують шкалу Качинського (табл. 1.1), для польового визначення водопроникності найбільш поширений метод заливних площ і його різновид – метод заливних рам. Для польових досліджень використовують рамки з листового металу завтовшки 2–3 мм і висотою 200–250 мм.

Таблиця 1.1

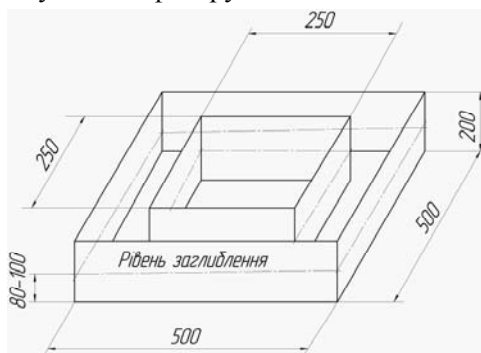
**Оцінка водопроникності ґрунтів за Качинським  
(напір води 5 см за температури 10 °С)**

Водопроникність за першу годину змочування, мм/год	Оцінка
>1000	Провальна
1000–500	Надлишково висока
500–100	Найкраща
100–70	Добра
70–30	Задовільна

Необхідно мати дві рамки: зовнішня 500×500 мм і внутрішня 250×250 мм. Нижній торець рамок заточують для полегшення заглиблення у ґрунт. Зовнішня рамка захисна – обмежує розтікання води з внутрішньої облікової. Рамки заглиблюють у ґрунт, як показано на рис. 1.10, в них заливають воду і обчислюють інтенсивність вбирання за постійного чи змінного напору в окремі інтервали часу. Встановлюють певний порядок виконання заміру. Для цього вибирають місце для проведення експерименту на типовій ділянці поля. У радіусі двох метрів від вибраного місця не повинно бути ям, які можуть відігравати роль дренажів. Встановлюють зовнішню захисну рамку. Ве-

лику рамку розміщують на вибраній ділянці. Із внутрішньої сторони ножем намічають межу рамки. Рамку знімають, по межі прорізають ножем щілину на глибину 8–10 см і втискують рамку в ґрунт. Із внутрішньої сторони рамки ґрунт притискують до стінки, із зовнішньої його добре утрамбовують. В аналогічному порядку симетрично зовнішній розміщують внутрішню рамку. У кожену рамку встановлюють мірну лінійку. Термометр достатньо встановити в одну з рамок.

Рамки заповнюють водою почергово, до рівня 5 см в обох рамках. На початковому етапі воду не ллють безпосередньо на землю, а на покладену на дно фанеру.



**Рис. 1.10. Схема врізання рамок для визначення водопроникності методом заливних площ**

У міру вбирання воду в рамки підливають так, щоб рівень її залишався постійним. Витрати води у внутрішній рамці реєструють кожні 10 хв протягом однієї години. Облік витрати води у великій рамці вести не потрібно.

Водопроникність підраховують для кожного інтервалу часу за формулою

$$k = \frac{10 \cdot Q}{S \cdot t}, \quad (1.9)$$

де  $k$  – водопроникність за даної температури, мм/хв;

$Q$  – кількість долитої води, см<sup>3</sup>;

$S$  – площа рамки, см<sup>2</sup>;

$t$  – час, хв.

Одержані значення коефіцієнтів водопроникності приводять до температури 10 °С та визначають середню водопроникність за контрольну годину.

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗПУШЕННЯ ҐРУНТУ

Схематично процес взаємодії знаряддя довільної геометричної форми з ґрунтом можна поділити на три етапи:

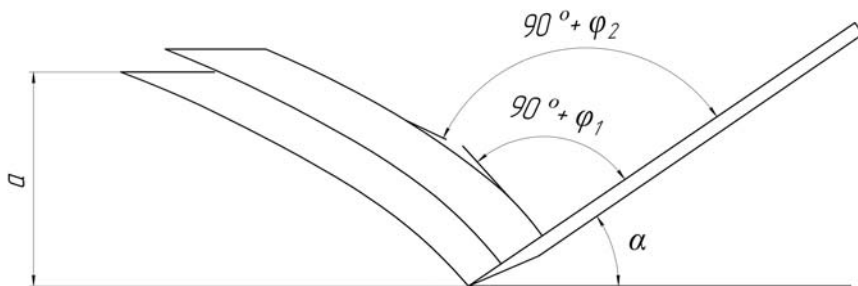
- підрізання і відділення від загального масиву шару ґрунту;
- розпушення відділеної частини;
- укладання розпушеного шару.

Характер перебігу означених процесів залежить як від конструктивних і кінематичних параметрів знаряддя, так і від властивостей оброблюваного середовища.

### 2.1. ЗАКОНОМІРНОСТІ ПОШИРЕННЯ ЛІНІЙ СКОЛЮВАННЯ У ҐРУНТІ

Практично будь-яке ґрунтообробне знаряддя можна уявити як систему з певним чином зорієнтованих у просторі елементарних лемешів. Тому основні принципи взаємодії з ґрунтом такого лемеша можна за певних умов перенести й на реальне знаряддя.

У процесі руху лемеша у ґрунті утворюються лінії сколювання (тріщини), які поширюються вперед за ходом та в боки.



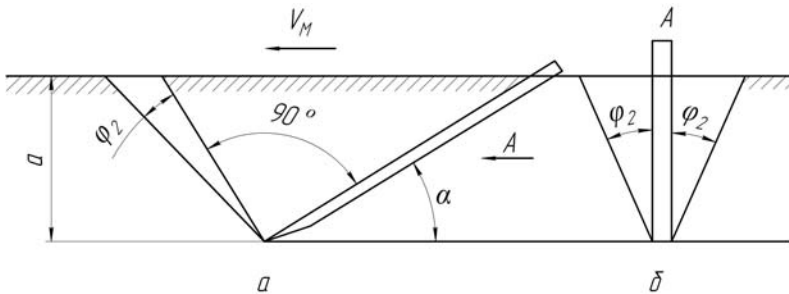
**Рис.2.1. Теоретичне подовження ліній сколювання в повздовжньо-вертикальній площині:**

*a* – глибина ходу лемеша;  $\alpha$  – кут атаки лемеша

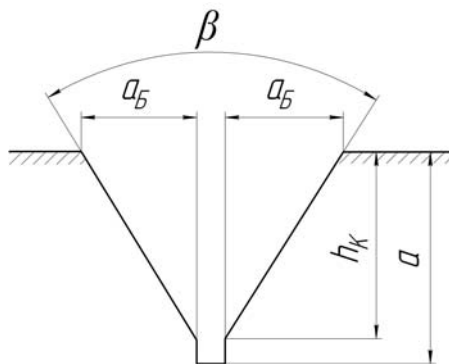
**Повздовжньо-вертикальна площина.** На початковому етапі, коли силове поле, що утворюється лезом, ще не розсіяне, діє закон найбільшої дотичної напруги і лінії сколювання подовжуються під кутом  $90^\circ + \varphi_1$ , де  $\varphi_1$  – кут зовнішнього тертя. Далі, зі збільшенням відстані від леза, силове поле зменшується і дія кута

внутрішнього тертя  $\varphi_2$  стає пріоритетною. Лінія сколювання довшає під кутом  $90^\circ + \varphi_2$ . Враховуючи те, що коефіцієнт зовнішнього тертя для ґрунту більше за коефіцієнт зовнішнього тертя по сталі, картина відділення ґрунтових призм набуде такого вигляду – рис. 2.1. Проте, як показали досліди, поправкою, що вносить початковий етап, можна нехтувати і вважати, що лінія сколювання з самого початку подовжується під кутом  $90^\circ + \varphi_2$  (рис. 2.2,а).

*Поперечно-вертикальна площина.* Подовжування ліній сколювання у цій площині носить дещо інший характер. Відділення стружки від ґрунтового масиву відбувається під кутом внутрішнього тертя до вертикалі, але тільки до глибини, що отримала назву критичної (рис. 2.2,б). Подальше заглиблення лемеша утворить профіль нової форми (рис. 2.3).



**Рис. 2.2.** Подовжування ліній сколювання у ґрунті від елементарного лемеша



**Рис. 2.3.** Профіль борозни у поперечно-вертикальній площині:  $a$  – глибина ходу;  $h_K$  – критична глибина;  $a_B$  – дальність подовжування у поперечно-вертикальній площині;  $\beta$  – кут поширення

Основні параметри профілю пов'язані між собою залежністю

$$h_K = \frac{a_B \cdot \cos(\beta - i + \varphi_1)}{\mu \cdot \cos[0,5 \cdot (\beta - i + \varphi_1 + \varphi_2)]}, \quad (2.1)$$

де  $i$  – кут загострення леза;

$$\mu = 0,95.$$

Для визначення відстані між двома послідовними лініями сколювання розглянемо розрахункову схему (рис. 2.4). Початкове положення лемеша характеризується точкою з координатами  $X_0$ ,  $Y_0$  та кутом нахилу лемеша  $\alpha$ .

Виріжемо по осі лемеша нескінченно тонкий шар ґрунту і розглянемо фізику процесів, що відбуваються.

З початком руху зминається зона 4 ґрунту до моменту сколювання, після чого розпочинається зрушення сколотої частини. Для подовжування лінії сколювання треба подолати силу зчеплення часток

$$T_i = C_i \cdot F_c, \quad (2.2)$$

де  $C_i$  – питоме зчеплення часток,  $\text{кН/м}^2$ ;

$F_c$  – площа сколювання,  $\text{м}^2$ .

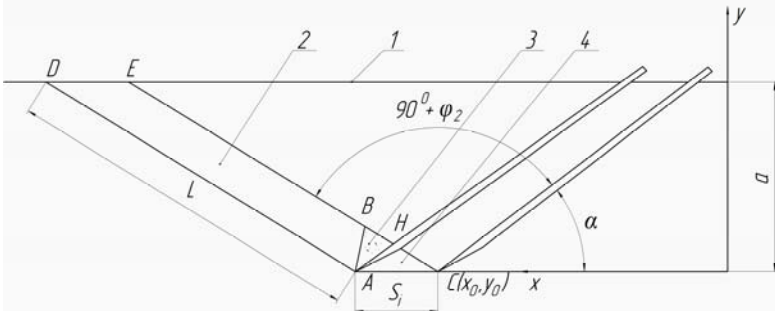
$$F_c = L \cdot dz = \frac{a}{\cos(\alpha + \varphi_2)}, \quad (2.3)$$

де  $L$  – довжина лінії сколювання, м;

$dz$  – ширина вирізаного шару ґрунту, м;

$a$  – глибина обробітку, м;

$\varphi_2$  – кут внутрішнього тертя, град.



**Рис. 2.4. Розрахункова схема до визначення відстані між двома послідовними лініями сколювання:**

1 – рівень денної поверхні; 2 – зона пружної деформації; 3 – зона пластичної деформації; 4 – ділянка, що зминається

Сколота призма ґрунту має дві зони: зону 3 пластичної деформації і зону 2 пружної деформації. Сколювання відбувається за рахунок вивільнення енергії пружної деформації, накопичення енергії пружної деформації – за рахунок передачі зусилля від лемеша до зони 2 через зону 3. Із достатньою для розрахунків точністю можна вважати, що умова сколювання становитиме:  $T_i = T_{ABH}$ , де  $T_{ABH}$  – сила зминання ділянки  $ABH$ .

Стискання ділянки  $AHC$  можна вважати як ізотропне до моменту сколювання і початку руху сколотої частини. Процес ізотропного стискання характеризують модулем об'ємного стискання

$$K_V = \frac{\sigma}{\Delta V/V},$$

де  $\sigma$  – напруга, кН/м<sup>2</sup>;

$\Delta V$  – величина, на яку зменшується об'єм середовища, м<sup>3</sup>;

$V$  – початковий об'єм середовища, м<sup>3</sup>.

Модуль об'ємного зминання можна визначити експериментально або обчислити за формулою

$$K_V = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)},$$

де  $E$  – модуль пружності;

$\nu$  – коефіцієнт Пуасона.

Із розрахункової схеми (рис. 2.4) за теоремою синусів обчислюємо, що

$$AH = \frac{S_I \cdot \cos(\alpha + \varphi_2)}{\cos(\varphi_2)},$$

де  $S_I$  – переміщення носка лемеша від початку руху до моменту відколювання призми ґрунту.

Утворювана напруга по лінії  $AB$  дорівнюватиме

$$\sigma = \frac{T_I}{AH \cdot dz} = \frac{T_I \cdot \cos(\varphi_2)}{S_I \cdot \cos(\alpha + \varphi_2) \cdot dz}, \quad (2.4)$$

де  $dz$  – товщина вирізаного шару ґрунту.

З іншого боку, напруга, що виникає, представимо як

$$\sigma = K_V \cdot \varepsilon_V, \quad (2.5)$$

де  $\varepsilon_V = \Delta V/V$  – коефіцієнт об'ємної деформації за Коші.

Підставивши в рівняння (2.4) значення формул (2.2), (2.3) та (2.5), отримуємо, що

$$K_V \cdot \varepsilon_V = \frac{a \cdot C_{CP} \cdot \cos(\varphi_2)}{S_I \cdot \cos^2(\alpha + \varphi_2)}. \quad (2.6)$$

Остаточню

$$S_I = \frac{a \cdot C_{CP} \cdot \cos(\varphi_2)}{\cos^2(\alpha + \varphi_2) \cdot K_V \cdot \varepsilon_V} \cdot K_{CK}. \quad (2.7)$$

## 2.2. ОСНОВНІ ТЕОРІЇ РОЗПУШЕННЯ ҐРУНТУ

В області розпушення ґрунту відомі дві основополагаючі теорії: поверхнева Рітгінгера та об'ємна Бонда [3]. Відповідно до цих теорій робота розпушення пропорційна площі або об'єму утворених агрегатів. Об'ємна теорія точніша в разі утворення крупних агрегатів, поверхнева – відповідно для дрібних. Відома також теорія Бонда, яка об'єднує дві попередні. За цією теорією на початковому етапі, коли розпушення відбувається з утворенням більш крупних агрегатів і збільшення загальної поверхні мале, енергетичні витрати на збільшення поверхні можна не враховувати. Якщо ж утворені агрегати продовжують розпушуватися, то приріст поверхні стає суттєвим і ця складова дає більш суттєвий внесок в енергетичні витрати.

Робота розпушення одиниці ваги матеріалу для всіх трьох теорій

$$A = \int_{x_1}^{x_2} -C \cdot \frac{dx}{x^n}, \quad (2.8)$$

де  $x_1, x_2$  – початковий та кінцевий розміри агрегату;

$C$  – коефіцієнт, що характеризує властивості матеріалу;

$n = 2$  – за теорією Рітгінгера;  $n = 1,5$  – відповідно до теорії Бонда;

$n = 1$  – за Кіком.

Ребіндер [3] запропонував роботу розпушення визначати за формулою

$$A = \sigma \cdot V + p \cdot \Delta S, \quad (2.9)$$

де  $V$  – об'єм тіла, що розпушується;

$\Delta S$  – приріст поверхні;

$\sigma, p$  – константи матеріалу.

З наведеного виразу – частина роботи витрачається на деформацію матеріалу перед розпушенням (на пластичну деформацію), інша йде на приріст поверхні.

А.М. Панченко [3] за результатами експериментальних досліджень запропонував узагальнену формулу для визначення роботи, що витрачається на подрібнення,

$$A = C_3 \cdot [C_1 \cdot \lg(i)^3 + C_2 \cdot (i+1)], \quad (2.10)$$

де  $C_1, C_2, C_3$  – коефіцієнти, що визначаються експериментально;  
 $i$  – ступінь подрібнення.

Узагальнені формули (2.8), (2.9), (2.10) можна застосовувати для обробки експериментальних даних, проте виконувати проектні розрахунки за ними не рекомендовано.

А.М. Панченко [4] розробив аналітичний метод розрахунку ступеня подрібнення для різального периметра довільної геометричної форми. Використовуючи цей метод, можна у першому наближенні виконувати проектні розрахунки конструктивних параметрів ґрунтообробних робочих органів.

Метод базується на тому, що для формування агрегату в процесі розпушення долають внутрішню напругу, яка залежить від сил зчеплення та кута укладки ґрунтових часток. Останні два параметри можна визначають аналітично зі залученням мінімуму експериментальних даних. Суть методики полягає в такому. У разі відколювання елементарної ділянки ґрунту необхідно подолати внутрішню напругу, яка визначається за залежністю

$$G = \frac{R_C}{b \cdot a},$$

де  $R_C$  – результуюча сила зчеплення часток на ділянці сколювання;  
 $b, a$  – перетин стружки.

$$R_C = \frac{P_0 \cdot (1 - \cos \alpha)}{\sin \alpha},$$

де  $P_0$  – результуюча осьова сила зчеплення часток;  
 $\alpha$  – кут укладання часток.

Знаючи питоме зчеплення часток, яке у свою чергу розраховують за допомогою щільності ДорНДІ, знаходять результуючу осьову силу зчеплення.

Більш детально ознайомитися з методикою визначення  $G$  можна в роботі [3, 4].

Остаточний ступінь подрібнення обчислюють за формулою

$$i = \frac{2 \cdot K_p \cdot E}{G^2} + 1, \quad (2.11)$$

де  $K_p$  – питомий коефіцієнт різання ґрунту;

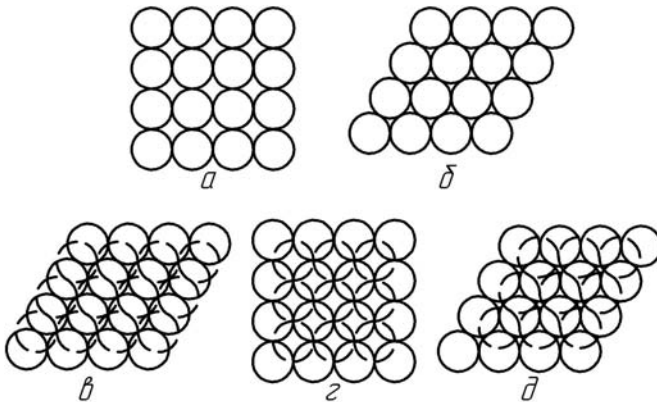
$E$  – модуль пружності ґрунту.

Питомий коефіцієнт різання ґрунту являє собою відношення опору різанню до площі поперечного перетину стружки.

### 2.3. УКЛАДАННЯ МАТЕРІАЛУ НА ДНО БОРОЗНИ

Після сходження з поверхні робочого органа в процесі удару в дно борозни кінетична енергія агрегату переходить у потенційну енергію розпушення. При цьому агрегати набувають більш округлої форми, як енергетично більш вигідної. Крупніші агрегати кришаться більш інтенсивно, тому середовище стає більш одноманітним за складом. Логічно уявити таке середовище у вигляді куль різного діаметра з хаотичною, проте сталою упаковкою.

Для куль одного діаметра можливо утворення 5 різних сталих укладань (рис. 2.5).



**Рис. 2.5. Варіанти сталого укладання однакових куль:**

*a – просте кубічне укладання; б – кубічно-тетрадральне; в – тетрадрально-сфероїдальне; г – пірамідальне; д – тетрадральне*

У кожному з укладань щільність не залежить від розміру куль за умови, якщо укладання поширене на нескінченно великий простір. Аналіз отриманих таким чином структур вказує на залежності, які можна використовувати у проектних розрахунках (табл. 2.1).

Найбільш можливе число куль, що знаходяться у контакті з довільно вибраним, становить 12 (координатне число). Моделювання на ПЕОМ різноманітних варіантів довільного укладання під-

тверджує, що це число залишається незмінним. Найменше координатне число для куль одного діаметра за сталості укладання становить 4. Отже, між щільністю ґрунту та кількістю контактів агрегатів, що його утворюють, існує пряма залежність.

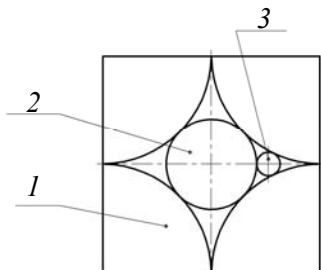
Таблиця 2.1

*Характеристики сталих укладань куль*

Тип укладання	Кількість контактів	Щільність	Пористість, %
Просте кубічне	6	$\pi/6$	47,64
Кубічно-тетраедральне	8	$\frac{\pi}{3} \cdot \sqrt{3}$	39,54
Тetraедрально-сфероїдальне	10	$2\pi/9$	30,19
Пірамідальне	12	$\frac{\pi}{3} \cdot \sqrt{2}$	25,95
Тetraедральне	12	$\frac{\pi}{3} \cdot \sqrt{2}$	25,95

Якщо розглянути суміш куль двох різних діаметрів, то можна відзначити, що сумарна щільність простору збільшується зі збільшенням різниці діаметрів куль.

У випадку суміші з трьох куль різного діаметра кулі поділяють за рівнем заповнення. Так, куля, що вміщується у сталу структуру (рис. 2.6) з максимальною кількістю контактів, становить другий рівень заповнення, наступна куля – третій рівень заповнення і так далі. Для такої суміші характерно, що найбільша щільність досягається при складанні: 70 % куль першого рівня, 10 % куль другого, 20 % куль третього рівня заповнення.



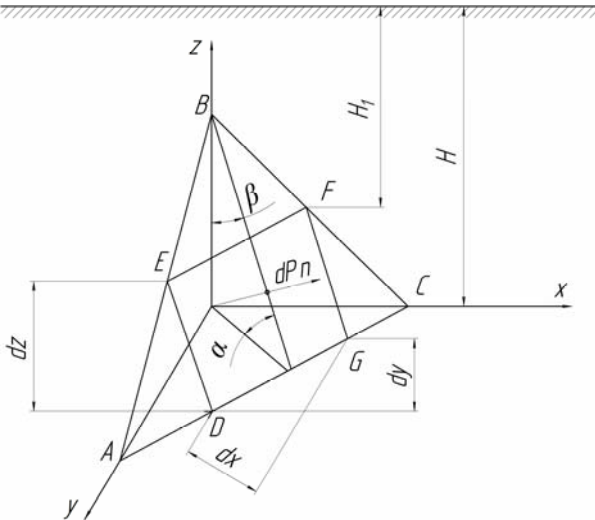
**Рис. 2.6. Рівні заповнення структури:**  
1 – перший; 2 – другий; 3 – третій

Таким чином, основні властивості ґрунту залежать від співвідношення розмірів агрегатів, що його утворюють, та координатного числа.

## 2.4. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЗАГАЛЬНОЇ РЕАКЦІЇ РІЗАННЯ ҐРУНТУ ПОВЕРХНЕЮ ДОВІЛЬНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ

Розглянемо механізм взаємодії з оброблюваним середовищем робочої поверхні довільної форми. Лінії  $AB$ ,  $BC$ ,  $CA$  на рис. 2.1 – сліди перетину робочої поверхні з площинами координат. Напрямок руху співпадає зі спрямуванням осі  $X$ . Приймаємо, що ділянка  $ABC$  нескінченно мала, що дає нам підставу вважати сліди прямолінійними.

Виріжемо на поверхні  $ABC$  нескінченно малу прямокутну площадку  $DEFG$ .



**Рис. 2.7. Розрахункова схема взаємодії елементарної площадки зі середовищем**

Таку елементарну площадку можна розглядати як підпорну стінку, на яку діє сила

$$P = P_n + P_{Tp} + P_D,$$

де  $P_n$  – підпорний боковий тиск;

$P_{Tp}$  – сила тертя;

$P_D$  – динамічна складова сил тиску.

Для нескінченно малої площадки рівняння підпорної стінки набуде вигляду (обґрунтування можливості застосування рівняння підпорної стінки на робочих швидкостях землерийних та ґрунтообробних машин дано у роботах [5–7]).

$$\begin{aligned} dP_n &= \frac{\gamma \cdot (H^2 - H_1^2)}{2} \cdot \left[ \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2 - \beta}{2} \right) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta \cdot (DG) = \\ &= \frac{\gamma \cdot (H + H_1) \cdot (H - H_1)}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \left[ \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2 - \beta}{2} \right) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta \cdot dy = \\ &= \frac{\gamma \cdot (2 \cdot H + dz) \cdot dz}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \left[ \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2 - \beta}{2} \right) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta \cdot dy, \end{aligned}$$

де  $DG = dy / \cos \alpha$ ;

$H - H_1 = dz$ ;

$\gamma$  – питома вага ґрунту;

$\beta$  – кут постановки площадки до вертикалі;

$H, H_1$  – глибина розташування відповідно нижнього та верхнього обрізів площадки.

Зважаючи на малість величини  $dz$  з достатнім ступенем точності, можна прийняти

$$dP_n = \frac{\gamma \cdot H}{\cos \alpha} \cdot \left[ \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2 - \beta}{2} \right) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta \cdot dy \cdot dz,$$

що надає можливості перейти до єдиної форми запису диференціальних рівнянь.

Динамічну складову визначаємо за формулою Ю.А. Ветрова

$$dP_d = b \cdot a \cdot \gamma \cdot \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 = \gamma \cdot \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \cdot dy \cdot dz, \quad (2.12)$$

де  $a, b$  – відповідно висота і ширина площадки;

$\alpha_p$  – кут різання;

$\theta$  – задній кут;

$V$  – швидкість руху.

Рівняння (2.12) справедливе для швидкості руху до 2,5 м/с. З урахуванням того, що методика пропонується для знарядь основного обробітку ґрунту, такий діапазон швидкості можна вважати задовільним.

Сумарний тиск, направлений по нормалі до площадки, дорівнює

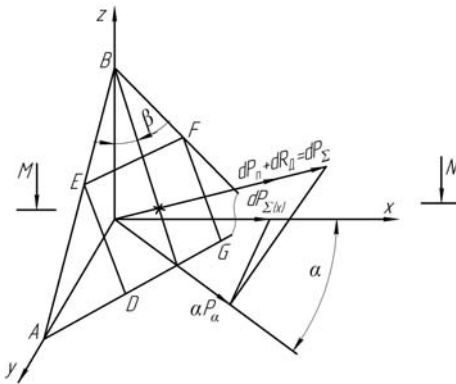
$$dP_n = \frac{\gamma \cdot H}{\cos \alpha} \cdot \left[ \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2 - \beta}{2} \right) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta \cdot dy \cdot dz + \gamma \cdot \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \cdot dy \cdot dz =$$

$$= \gamma \cdot \left\{ \frac{H}{\cos \alpha} \cdot \left[ \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2 - \beta}{2} \right) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta + \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \right\} \cdot dy \cdot dz.$$

З розрахункової схеми (рис. 2.8) проекція нормально діючих сил на напрямок руху (вісь  $X$ ) запишемо як

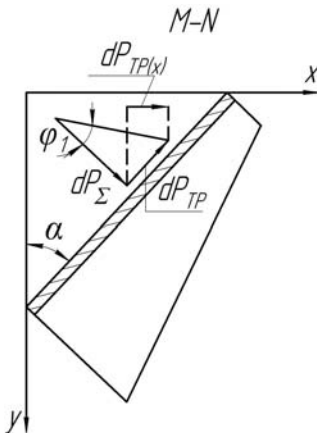
$$dP_{\Sigma(x)} = P_\alpha \cdot \cos \alpha = dP_\Sigma \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta = \gamma \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \times$$

$$\times \left\{ \frac{H}{\cos \alpha} \cdot \left[ \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2 - \beta}{2} \right) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta + \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \right\} \cdot dy \cdot dz.$$



**Рис. 2.8.** Розрахункова схема до визначення проекції на напрямок руху нормально діючих сил

Відповідно до розрахункової схеми побудуємо реакцію сил тертя (рис. 2.9)



**Рис. 2.9.** Реакція сил тертя

Сила тертя

$$dP_{Tp} = \gamma \cdot \left\{ \frac{H}{\cos\alpha} \cdot \left[ \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2 - \beta}{2} \right) + \operatorname{tg}\beta \right]^2 \cdot \cos\beta + \frac{\sin\alpha_p \cdot \cos\theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \right\} \cdot \operatorname{tg}\varphi_1 \cdot dy \cdot dz,$$

де  $\varphi_1$  – кут зовнішнього тертя ґрунту по сталі.

Проекція сили тертя на напрямок руху

$$dP_{Tp(x)} = \gamma \cdot \sin\alpha \cdot \left\{ \frac{H}{\cos\alpha} \cdot \left[ \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2 - \beta}{2} \right) + \operatorname{tg}\beta \right]^2 \times \right. \\ \left. \times \cos\beta + \frac{\sin\alpha_p \cdot \cos\theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \right\} \cdot \operatorname{tg}\varphi_1 \cdot dy \cdot dz.$$

Тоді проекція на напрямок руху всіх діючих сил матиме вигляд

$$dP = dP_{\Sigma(x)} + dP_{Tp(x)} = \gamma \cdot \left\{ \frac{H}{\cos\alpha} \cdot \left[ \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2 - \beta}{2} \right) + \operatorname{tg}\beta \right]^2 + \right. \\ \left. + \cos\beta + \frac{\sin\alpha_p \cdot \cos\theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \right\} \cdot (\cos\alpha \cdot \cos\beta + \sin\alpha \cdot \operatorname{tg}\varphi_1) \cdot dy \cdot dz. \quad (2.13)$$

Для визначення сумарної реакції поверхні робочого органа візьмемо інтеграл по поверхні від отриманого рівняння (2.13)

$$P = \gamma \cdot \iint_{\sigma} \left\{ \frac{H}{\cos\alpha} \cdot \left[ \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2 - \beta}{2} \right) + \operatorname{tg}\beta \right]^2 + \right. \\ \left. + \cos\beta + \frac{\sin\alpha_p \cdot \cos\theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \right\} \cdot (\cos\alpha \cdot \cos\beta + \sin\alpha \cdot \operatorname{tg}\varphi_1) \cdot dy \cdot dz, \quad (2.14)$$

де  $\sigma$  – рівняння поверхні.

### 3. МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЯКОСТІ ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

#### 3.1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ МЕТОДИКИ

Розроблена методика пропонується нами як така, що добре відпрацьована в ході польових досліджень

Кафедра сільськогосподарських машин Дніпропетровського державного аграрного університету сумісно з ДП «Гуляйпільський механічний завод» ВАТ «Мотор-Січ» проводила роботи з удосконалення ряду машин для основного обробітку ґрунту. У процесі відпрацювання конструктивних параметрів машини стало питання порівняльної оцінки якості обробітку ґрунту знаряддями різного типу. Дослідження показали, що існуюча система показників якості обробітку ґрунту не може дати об'єктивного уявлення про оптимальність застосування того чи іншого знаряддя. Тому про якість обробітку часто судять на основі візуального порівняння поверхневого стану ґрунту.

Аналізом наукових досліджень було встановлено, що під якістю розпушення розуміють перш за все співвідношення утворюваних агрономічно цінних агрегатів і таких, що під цю категорію не підпадають. Існує також методика А.М. Панченко [3], в якій пропонується оцінювати якість розпушення за коефіцієнтом різноподрібнення структурних агрегатів та коефіцієнтом кришення. Але останні коефіцієнти є суцільно теоретичними і методика їх практичного визначення відсутня.

Найбільш об'єктивно, на наш погляд, оцінювати якість розпушення за такими показниками [8]:

- коефіцієнт структурності  $K_{СТ}$  (характеризує абсолютну кількість агрономічно цінних агрегатів у шарі ґрунту);
- коефіцієнт подрібнення  $I$  (характеризує ступінь невідповідності структури оптимальній);
- коефіцієнт різноподрібнення структурних агрегатів  $K_P$  (показує нерівномірність розпушення);
- ущільнення дна борозни (свідчить про ступінь ущільнення дна борозни після проходу робочого органа);
- бриластість поверхні (характеризує наявність крупних брил на поверхні обробленої ділянки поля).

Вихідними даними для розрахунку перших трьох показників були результати просіювання взятих проб ґрунту на решітному класифікаторі.

За результатами розподілу фракцій будували огіву розподілу фракційного складу. Тому мета просіювання полягала в оптимальному розділенні суміші на фракції, що висуває певні вимоги до співвідношення діаметрів отворів решіт. Нами прийнято, що  $D = 150-100-75-50-25-10$  мм. Решета в наборі розташовували в порядку зменшення отворів. Ґрунт фракції менше 10 мм просівали на дно набору решіт. Обережними коливаннями решіт забезпечували розподіл (просівання) ґрунту на відповідні фракції. Кожну фракцію зважували з точністю до 10 г. Враховуючи те, що агрономічно цінними є агрегати в діапазоні 0,25–10,0 мм, на решітному класифікаторі відділяли фракції  $D > 10$  мм, а потім на окремому решеті відділяли фракцію  $D < 0,25$  мм. Проте, як показали досліди, просіювання на решетах 0,25 мм не є доцільним, бо похибка у визначенні коефіцієнта різноподрібнення не перевищує 0,5–1,0 %. Тому з достатньою точністю можна вважати агрономічно цінними всі агрегати, просіяні через решето з отворами  $D = 10$  мм.

Взяття проб виконували за допомогою спеціально виготовленої рамки  $1,0 \times 0,5$  м, яку накладали на оброблену поверхню, і в її межах знімали шар ґрунту до дна борозни. Знятий ґрунт висипали у верхнє решето решітного класифікатора і почергово просіювали на решетах. Окремі фракції зважували і підраховували кількість грудок у фракції. Проби брали тричі, за їх сумою знаходили відсотковий вміст фракції у взятій загальній пробі та середню приведену масу (г) однієї умовної грудки у пробі. Потім, виходячи із заміряного значення питомої маси ґрунту ( $\rho = 1,3$  г/см<sup>3</sup>), за формулою підраховували її умовний приведений діаметр

$$D = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot m}{\pi \cdot \rho}}; \quad (3.1)$$

Обчислювали коефіцієнт структурності

$$K_{CT} = M_{10} - M_{0,25} / M \quad (3.2)$$

де  $M_{10}$ ,  $M_{0,25}$  – маса ґрунту, що пройшла крізь отвори решіт, відповідно 10 мм та 0,25 мм;

$M$  – загальна маса взятої проби.

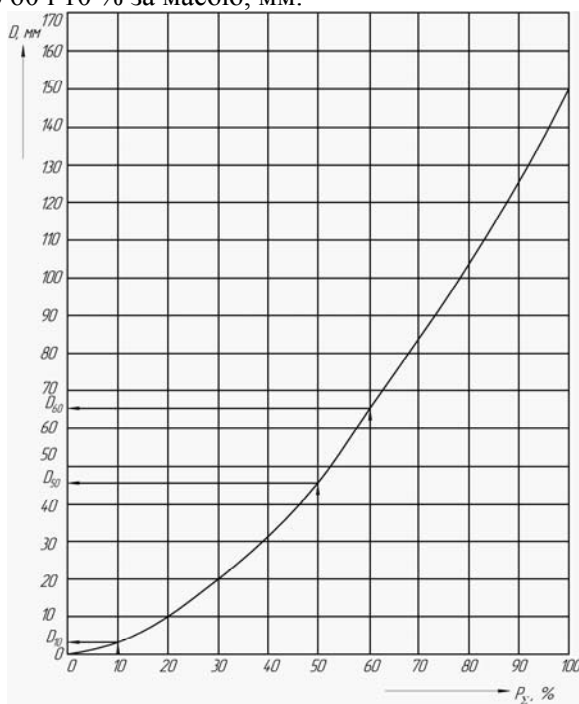
З достатнім ступенем точності формулу (3.2) можна спростити

$$K_{CT} = M_{10} - M. \quad (3.3)$$

Для визначення питомого коефіцієнта різання ґрунту  $K_p$  будували огіву накопленого вмісту діаметрів агрегатів (рис. 3.1) і на її основі знаходили співвідношення

$$K_p = D_{60} / D_{10},$$

де  $D_{60}$ ,  $D_{10}$  – середній приведений діаметр агрегатів, що складають відповідно 60 і 10 % за масою, мм.



**Рис. 3.1. Загальний вид огіви накопиченого вмісту та схема визначення величини приведених діаметрів**

Для цього на побудованих огівах розподілу визначали діаметри грудок, що відповідають вмісту (10 та 60 %). Ступінь подрібнення ґрунту являє собою відношення

$$I = D_H / D_K, \quad (3.4)$$

де  $D_H$  та  $D_K$  – відповідно середньостатистичні розміри структурних агрегатів до та після обробітку. При цьому  $D_H$  являє собою умовний приведений діаметр первісно відколотої призми ґрунту і визначається за формулою

$$D_H = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot K_L},$$

де  $a$ ,  $b$  – відповідно глибина оранки та ширина захвату;

$K_L$  – приведений коефіцієнт довжини шару ґрунту, який залежить від довжини лінії сколювання. Для глибини обробітку  $0,2 < a < 0,4$  м можна приймати  $K_L = 1,0$ . Знаючи глибину оранки,

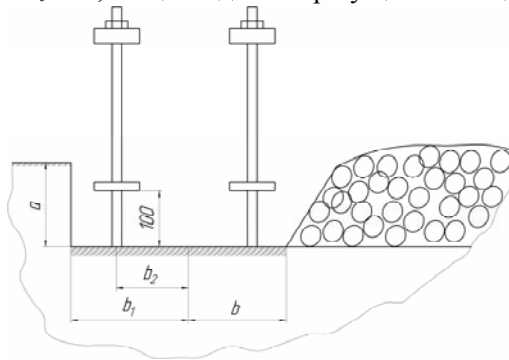
ширину захвату і визначивши за огівною розподілу фракційного складу  $D_K$ , за формулою (4) підраховуємо ступінь подрібнення.

Таким чином, отримано три показники: коефіцієнт структурності, коефіцієнт різноподрібнення структурних агрегатів та ступінь подрібнення, що дозволяє з достатнім ступенем точності оцінювати якість розпушення за різних режимів роботи робочого органа.

Ступінь ущільнення дна борозни  $K_Y$  відповідно до роботи [8] являє собою відношення середньої кількості ударів твердоміра ДорНДІ на глибині борозни до ( $C_1$ ) та після ( $C_2$ ) проходу знаряддя

$$K_Y = C_2 / C_1.$$

Якщо  $K_Y > 1,0$  – це свідчить про ущільнення дна борозни.



**Рис. 3.2. Схема контролю ущільнення дна борозни**

Для практичного визначення  $C_1$  та  $C_2$  треба після проходу агрегату розкрити дно борозни (ділянка  $b$ ), зняти шар ґрунту на необробленій частині поля (ділянка  $b_1$ ) та виконати заміри відповідно до схеми (рис. 3.2). Відстань  $b_2$ , на якій можна виконувати заміри твердоміромом, повинна становити  $b_2 > 100 \cdot \text{ctg} \varphi_2$ , де  $\varphi_2$  – кут внутрішнього тертя ґрунту.

Для визначення бриластості поверхні на поверхню поля наклали рамку  $0,5 \times 0,7$  м та визначали кількість брил в її межах, що за приведеним діаметром перебільшують 150 мм. Кожну брилу окремо зважували і визначали її приведену площу

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{6 \cdot m}{\pi \cdot \rho} \right)^{2/3},$$

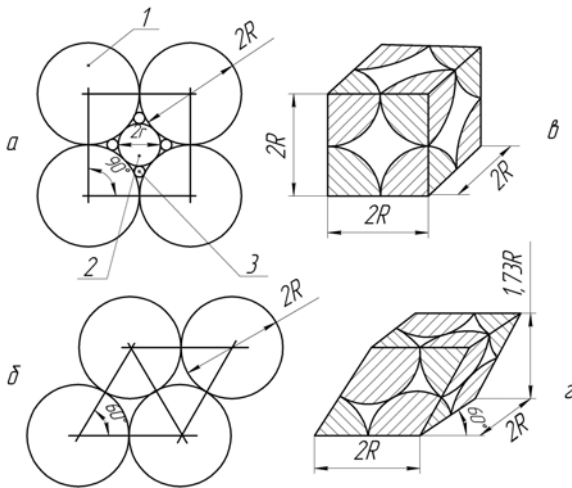
де  $m$  – маса окремо взятої брили;

$\rho$  – питома вага ґрунту.

Польові випробування дискового плуга, лушильника та плуга-букера показали, що використання даної методики дозволяє досить об'єктивно оцінити переваги та недоліки робочих органів.

### 3.2. СУТНІСТЬ КОЕФІЦІЄНТА РІЗНОПОДРІБНЕННЯ СТРУКТУРНИХ АГРЕГАТІВ

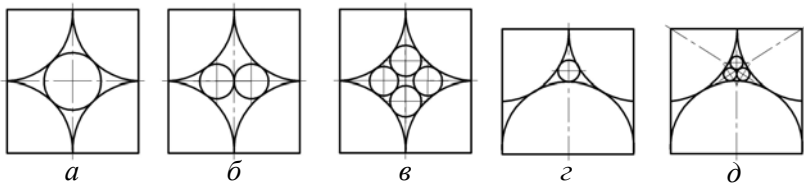
У наведеній групі показників коефіцієнт різноподрібнення структурних агрегатів є таким, що потребує додаткових пояснень і аргументації. Цей показник розроблено на основі аналітичних досліджень розпушення ґрунту з використанням цифрової імітаційної моделі [9]. Розглянемо схему, за якою ці дослідження виконано (рис. 3.3).



**Рис. 3.3. Схема моделі структури ґрунту:**

*1 – скелетотвірний шар; 2, 3 – шари подальших рівнів заповнення*

В імітаційній моделі агрегати, що утворюють структуру середовища, представлені у вигляді шарів різного діаметра. При цьому шари 1 максимального діаметра утворюють скелет ґрунту, а шари 2 і 3 – відповідно шари першого і другого рівнів заповнення. Різні комбінації розташування скелетотвірних агрегатів знаходяться між крайніми положеннями, одно з яких відповідає більш вільному розміщенню агрегатів (рис. 3.3,а), друге – більш ущільненому (рис. 3.3,б). Фіктивне пористе середовище розбито на елементарні блоки, з яких воно може бути складене (рис. 3.3,в, г). За вказаних крайніх конфігурацій об'єм скелетотвірних агрегатів у блоках становить відповідно 52,36 і 74,05 %.



**Рис. 3.4. Варіанти заповнення порового простору шарами**

Утворений скелетом поровий простір може мати різноманітні варіанти заповнення шарами першого рівня (рис. 3.4).

Як показує аналіз варіантів (табл. 3.1), об'єм пор залежить від співвідношення радіусів скелетотвірних і заповнюючих шарів. Скелетотвірні шари займають об'єм 52–74 %, заповнюючі – 14,4–2,7 %. Тобто об'єм пор визначається шарами, що складають приблизно 70 % об'єму середовища.

Таблиця 3.1

**Розрахункові параметри модельного середовища**

Параметр	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>
Радіус шарів першого рівня заповнення, <i>r</i>	0,41R	0,25R	0,217R	0,155R	0,101R
Об'єм скелета від об'єма блока, %	52,36	52,36	52,36	74,05	74,05
Об'єм заповнювача від об'єма блока, %	14,43	13,1	12,84	1,93	2,67
Пористість, %	33,21	34,54	34,8	24,02	23,28
Середній об'єм пор	0,17R <sup>3</sup>	0,09R <sup>3</sup>	0,04R <sup>3</sup>	0,07R <sup>3</sup>	0,02R <sup>3</sup>

Введення шарів другого і наступних рівнів, а також урахування нескінченної кількості варіантів конфігурації скелета і заповнення порового простору потребують використання статистичних моделей із застосуванням методу Монте-Карло. Суть методу полягає у розігруванні на ПЕОМ серії незалежних дослідів, у яких як випадкові величини моделюються діаметри шарів, їх місцерозташування і відсоткове співвідношення.

Як показує аналіз проведеного на обчислювальній машині розіграшу серії незалежних дослідів, об'єм скелетотвірних шарів становить у середньому 60,4 %, агрегатів першого рівня заповнення – 11,4 %. На підставі цього для оцінки якості розпушення було прийняте співвідношення (3.4).

## 4. ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ЛЕМІШНО-ПОЛИЦЕВОГО ПЛУГА

### 4.1. ТЕОРІЯ КЛИНА

В основу розрахунків робочих органів ґрунтообробних машин покладено робочу гіпотезу, що робочі органи являють собою систему певним чином зорієнтованих у просторі елементарних лемешів, або клинів.

Клини можуть бути плоскими (леміш, зуб борони) та з криволінійною поверхнею (полиці плугів, оочники). Клини поділяють на одно-, дво- та тригранні.

Одногранний плоский клин (рис. 4.1,*а*) під час переміщення в напрямку стрілки взаємодіє з оброблюваним середовищем тільки гранню  $AB$ . Враховуючи, що теоретично контакт з дном борозни відсутній, то і реакції дна борозни теж немає.

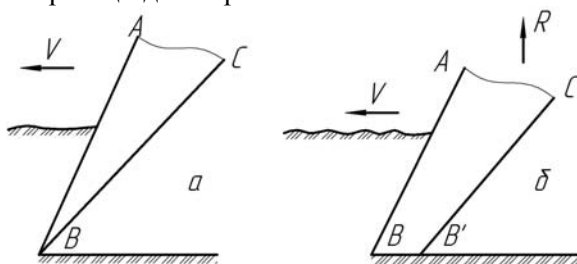


Рис. 4.1. Одно- та двогранний клини

Проте на практиці грань  $BB'$  (рис. 4.1,*б*) завжди має місце і такий клин стає двогранним. За наявності опорної грані виникає і реакція  $R$ .

Різальна кромка розглянутих клинів виконує два види різання середовища (рис. 4.2.).

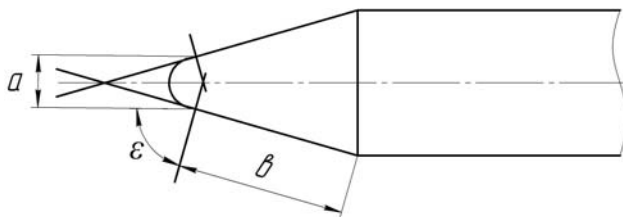


Рис. 4.2. Різальна кромка клина

Ділянка *a* являє собою безпосередньо лезо і руйнує матеріал унаслідок зминання. Ділянка *b* є фаскою, яка розводить матеріал убоки.

Залежно від постановки до напрямку руху можливі три варіанти взаємодії тригранного клину з ґрунтом (рис. 4.3).

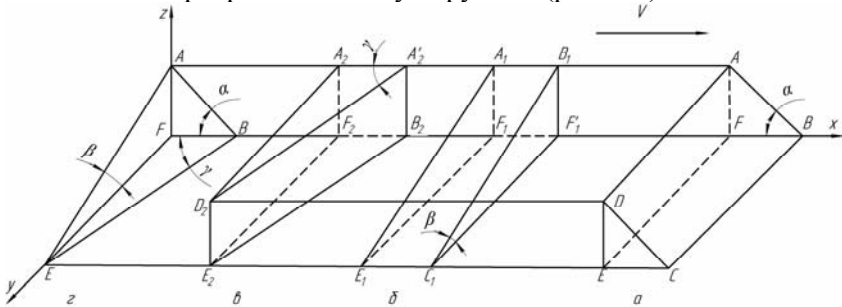


Рис. 4.3. Схема синтезу тригранного клину

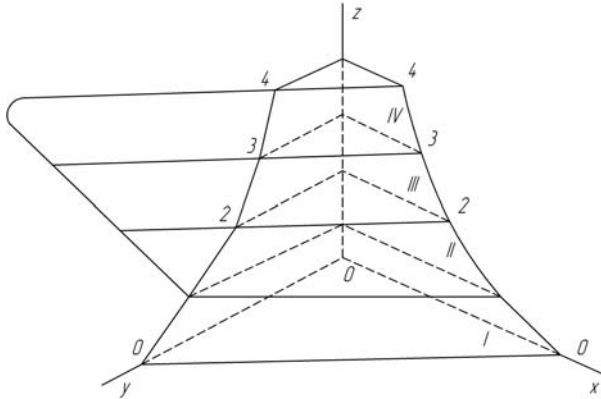
**Варіант а:** робоча грань –  $ABCD$ , опорна грань –  $EFBC$ . Різальне ребро розташоване перпендикулярно до руху під кутом атаки  $\alpha$ . Шар ґрунту підрізується лезом  $CB$ , після чого грань його піднімає шар, перегинає та розпушує. Інтенсивність розпушення залежить від кута нахилу грані до дна борозни. Тому кут  $\alpha$  отримав назву *кута розпушення*.

**Варіант б:** робоча грань –  $A_1B_1C_1E_1$ , опорна грань –  $E_1F_1F_1'C_1$ . Робоча грань нахилає шар та обертає його. Чим більше кут нахилу грані до дна борозни, тим шар обертається інтенсивніше. Тому кут  $\beta$  отримав назву *кута обертання*.

**Варіант в:** робоча грань –  $E_2D_2A_2'B_2$ , опорна грань –  $E_2F_2B_2$ . Робоча грань зрушує шар убік, одночасно його перегинаючи в горизонтальній площині, від чого він розпушується. Інтенсивність процесу напрямку залежить від кута постановки робочої грані до стінки борозни. Тому кут  $\gamma$  отримав назву *кута зсуву*.

Таким чином, для одночасного виконання операцій підрізання, розпушення, зсуву та обертання шару ґрунту необхідна сумісна дія трьох означених клинів. Проте існує варіант тригранного кута (рис. 4.3,з), який поєднує технологічні властивості трьох попередніх. Клин має одну робочу грань –  $ABE$  та дві опорні –  $ABF$  та  $FBE$ . Залежно від співвідношення кутів  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  тригранний клин буде інтенсивніше виконувати одну з операцій: розпушення, зсув чи обертання шару.

Як показує практика використання ґрунтообробних знарядь, краща якість розпушення відбувається тоді, коли в середовищі створюється сітка локальних зрушень, які викликають розгалуження малих тріщин. Для покращення процесу розпушення та обертання необхідно поступово збільшувати відповідні кути. У результаті утворюється поверхня, яка відповідає поверхні полиці плуга (рис. 4.4).



**Рис. 4.4. Розвиток поверхні тригранного клина у циліндроїдальну поверхню**

Розглянемо основні характеристики технологічного процесу, який виконує досліджувана поверхня.

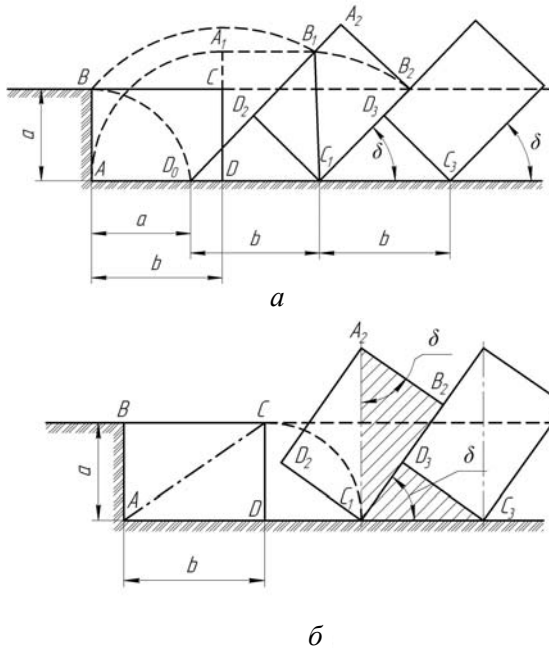
За поступового руху плуга кожен його корпус вирізає шар ґрунту прямокутного перетину, розміри якого залежать від ширини захвату і глибини оранки, розпушує його та укладає на дно борозни. При цьому виконується повне або часткове обертання шару ґрунту.

#### **4.2. СПІВВІДНОШЕННЯ ШИРИНИ ЗАХВАТУ КОРПУСА ТА ГЛИБИНИ ОРАНКИ**

Досліджуючи процес обертання шару в першому наближенні, вважають, що він не змінює своїх розмірів (рис. 4.5,а). Підрізаний у вертикальній площині дисковим ножом, а у горизонтальній – лемешем пласт  $ABCD$  при підйомі на полицю спочатку обертається довкола ребра  $D$  доти, поки не займе вертикального положення. Далі шар обертається довкола ребра  $C_1$  до кінцевого положення,

поки не ляже гранню  $C_1B_2$  на відвалений раніше шар. З розрахункової схеми знайдемо кут нахилу відваленого шару до горизонту  $\sin \delta = C_3D_3 / C_1C_3 = a / b = 1 / k$ ,

де  $a$  – глибина оранки, м;  
 $b$  – ширина захвату, м.



**Рис. 4.5.**  
**Схема обертання шару ґрунту корпусом з культурним типом полиці**

Вочевидь, що під час обертання шару положення, за якого його діагональ  $A_2C_1$  перпендикулярна дну борозни, буде нестійким, бо за незначного відхилення вліво шар повернеться в борозну. Встановимо, за якого значення відношення  $k = b / a$  шар займе стаке положення (рис. 4.5,б). Трикутники  $C_1A_2B_2$  та  $C_1D_3C_3$  подібні між собою. Тому

$$C_3D_3 / C_1B_2 = C_1C_3 / C_1A_2,$$

або

$$a / b = b / \sqrt{a^2 + b^2},$$

або

$$1 / k = 1 / \sqrt{(1 / k)^2 + 1}. \quad (4.1)$$

Розв'язавши рівняння (4.1), отримуємо  $k = 1,27$ . Тобто для сталого виконання технологічного процесу співвідношення  $k > 1,27$ .

### 4.3. РОЗСТАНОВКА КОРПУСІВ У ПОВЗДОВЖНЬОМУ НАПРЯМКУ

У першому наближенні розстановку корпусів на рамі плуга виконують у такий спосіб (рис.4.6). Передусім умовно вважають, що розосереджена сила опору  $R$ , що виникає у процесі роботи, має рівнодіючу, прикладену в центрі довжини леза лемеша. Напрямок дії цієї сили – під кутом тертя  $\varphi_1$  до площини, що перпендикулярна лезу. Ця сила передається на стінку борозни в точці обрізу (п'яти польової дошки) останнього корпусу. Якщо провести пряму, паралельну напрямку дії сили  $R$ , через носок переднього лемеша, то на ній на відстані  $\sqrt{b^2 + l^2}$  в точці  $A$  перетину зі стінкою борозни буде розташовано носок наступного корпусу і так далі. При цьому відстань між корпусами в повздовжньому напрямку дорівнюватиме

$$L = b \cdot \operatorname{tg}(\theta_0 + \varphi_1),$$

де  $\theta_0$  – кут нахилу леза лемеша до стінки борозни, град;  
 $b$  – ширина захвату корпусу, м.

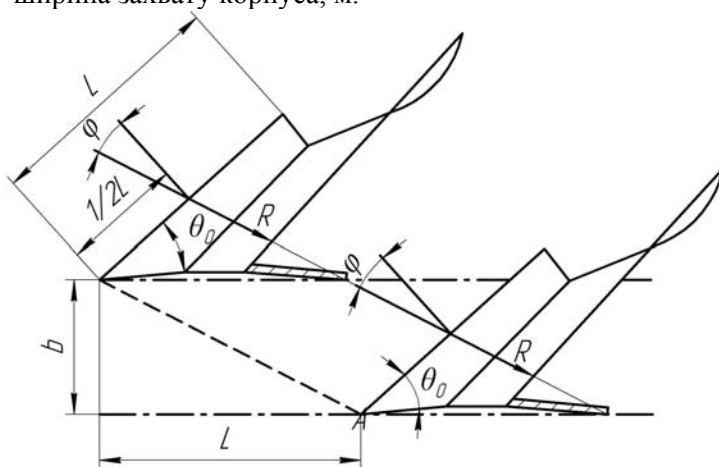


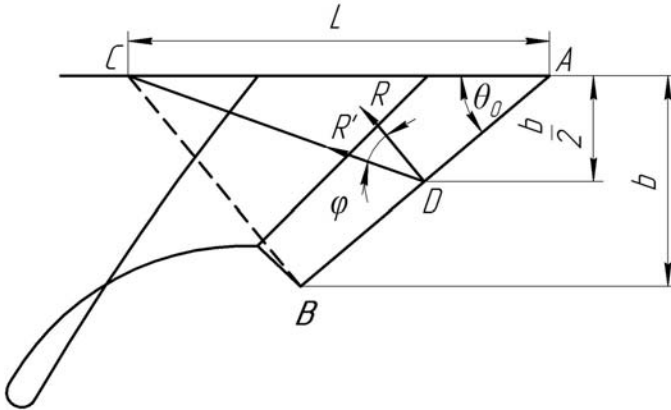
Рис. 4.6. Схема розстановки корпусів у повздовжньому напрямку

### 4.4. ПАРАМЕТРИ ПОЛЬОВОЇ ДОШКИ КОРПУСА

Сила тиску шару ґрунту на леміш та полицю постійно намагається змістити корпус уліво за ходом плуга. Для компенсації цього явища в конструкцію корпусу введено польову дошку. Її кріп-

лять на стояку паралельно стінці борозни. У процесі роботи корпус через польову дошку опирається на стінку та дно борозни, чим утворює сталість ходу в горизонтальній площині.

Довжину польової дошки визначають з умови, що вектор сили  $R$  опору ґрунту, подовжений до перетину зі стінкою борозни, обмежує її зону дії, а відповідно й довжину.



**Рис. 4.7. Схема до визначення довжини польової дошки**

З розрахункової схеми (рис. 4.7) за теоремою синусів

$$AC / \sin(90^\circ + \varphi_1) = AD / \sin[90^\circ - (\varphi_1 + \theta_0)],$$

або

$$AC / AD = \sin(90^\circ + \varphi_1) / \sin[90^\circ - (\varphi_1 + \theta_0)] = \cos\varphi_1 / \cos(\varphi_1 + \theta_0).$$

Але  $AC = L$ ;  $AD = b / (2\sin\theta_0)$ , де  $L$  – відстань від носка лемеша до обрізу польової дошки. Після підстановки отримуємо

$$L = \frac{b \cdot \cos \varphi_1}{2 \cdot \sin \theta_0 \cdot \cos(\varphi_1 + \theta_0)}.$$

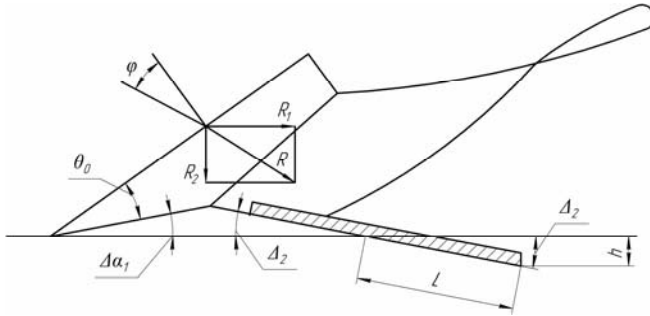
Для орієнтовних розрахунків ширини польової дошки виходять з вимоги обмеження допустимого тиску польової дошки на стінку борозни. Польову дошку, як правило, встановлюють під невеликим кутом ( $2-3^\circ$ ) до стінки дна борозни (рис. 4.8). Допустиме зминання ґрунту знаходиться у межах 5–10 мм.

Тиск польової дошки на стінку становитиме

$$q = \frac{q_0 \cdot h}{2},$$

де  $q_0$  – об'ємний коефіцієнт зминання ґрунту;

$h$  – допустима глибина зминання.



**Рис. 4.8. Схема до визначення ширини польової дошки**

Силу опору  $R$  можна представити у вигляді двох складових  $R_1$  і  $R_2$ . Складова

$$R_2 = R \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_1)$$

є тією силою, що занурює дошку в ґрунт. Значення цієї сили виражаємо через  $q$  та площу зминання

$$R_2 = 0,5 \cdot n \cdot L_2 \cdot q_0 \cdot h, \quad (4.2)$$

де  $n$  – ширина польової дошки;

$L_2 = h / \sin \Delta_2$  – довжина частини дошки, яка безпосередньо зминає ґрунт.

З рівняння (4.2) отримуємо робочу ширину польової дошки

$$n = \frac{2 \cdot R_2 \cdot \sin \Delta_2}{q_0 \cdot h^2}. \quad (4.3)$$

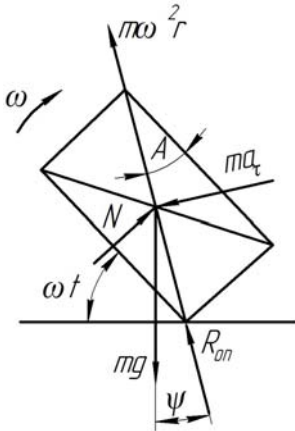
#### 4.5. ДОПУСТИМА РОБОЧА ШВИДКІСТЬ

Корпус стало укладає шар ґрунту за умови, що відсутній його відрив від дна борозни і закидання вбік. Розглянемо розрахункову схему (рис. 4.9).

Шар ґрунту представлено як паралелепіпед з перетином  $a \cdot b$  нескінченно малої товщини. Найбільша ймовірність відриву шару від дна борозни спостерігатиметься, якщо вектор відцентрової сили  $m\omega^2 r$  буде направлено по лінії центра мас, протилежно силі тяжіння. У цей момент кут між напрямком відцентрової сили та силою тяжіння  $\psi = 0$  і нормальна реакція робочої поверхні полиці  $N = 0$ . Тоді умова обертання шару без відриву

$$m \cdot \omega^2 \cdot r < m \cdot g$$

де  $m$  – маса виділеного нескінченно тонкого шару ґрунту;  
 $\omega$  – кутова швидкість обертання;  
 $r$  – миттєвий радіус обертання.



*Рис. 4.9. Розрахункова схема до визначення допустимої швидкості руху орного агрегату виходячи з умови відсутності відриву шару від дна борозни*

Тоді допустима кутова швидкість обертання становитиме

$$\omega < \sqrt{g/r}. \quad (4.4)$$

При переміщенні корпусу шар ґрунту буде знаходитись у контакті з його робочою поверхнею деякий час  $t = L / V$ , де  $V$  – робоча швидкість агрегату;  $L$  – довжина робочої поверхні.

За цей час шар обернеться на кут  $\beta = \omega \cdot t$ . Після розв’язання цього рівняння відносно  $t$  і підставивши його значення у попереднє рівняння, отримаємо

$$\omega = \frac{\beta \cdot V}{L}. \quad (4.5)$$

Вирішуючи сумісно вирази (4.4) та (4.5), знаходимо, що

$$V < \frac{L}{\beta} \cdot \sqrt{\frac{g}{r}}; \quad (4.6)$$

$$r = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (4.7)$$

де  $a$ ,  $b$  – відповідно глибина оранки і ширина захвату корпусу.

Відношення  $L / \beta$  можна розглядати як крок гвинтової поверхні. З аналізу отриманого рівняння (4.6) робимо висновок: чим більше крок гвинта, тим менше ймовірність відриву шару ґрунту від поверхні корпусу і тим більше допустима робоча швидкість

#### 4.6. ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ТА РОЗРАХУНКУ ПЛУГА-БУКЕРА

Як відомо, система точного землеробства спрямована на максимальну адаптацію виконуваних технологічних процесів до ґрунтово-кліматичних умов та біологічних особливостей культури. Окреме місце в цій системі займає мостове землеробство. Переваги його незаперечні [10]:

- ◆ підвищена точність позиціонування робочих органів;
- ◆ відсутність впливу ходової системи;
- ◆ повна відмова від двигунів внутрішнього згоряння.

Проте на початковому етапі впровадження мостове землеробство потребує суттєвих витрат, тому існує думка про його використання виключно в захищеному ґрунті.

Але, як показали результати досліджень, система повністю розкриває свої переваги за мостового прольоту 100–150 м. У разі такої довжини прольоту рамна конструкція дуже чутлива до навантаження, а втрата жорсткості зведе нанівець всі переваги. Тому робочі органи всіх без винятку машин, задіяних у технологічному процесі, повинні передавати мінімум навантаження на несучу конструкцію, бути легко керованими, мати малу інерційність та максимально можливу сталість ходу.

Усі відомі ґрунтообробні робочі органи проектувалися під мобільні агрегати, і їх стабілізація виконувалася шляхом введення в конструкцію компенсуючих елементів. У полицевому плузі, наприклад, це є польова дошка. Однак у випадку мостового застосування таке рішення не може бути прийнятним, бо створює додатковий тяговий опір і, як наслідок, додаткове навантаження на ферму. Треба шукати рішення, в якому елементи робочого органа самокомпенсували б неврівноваженість один одного.

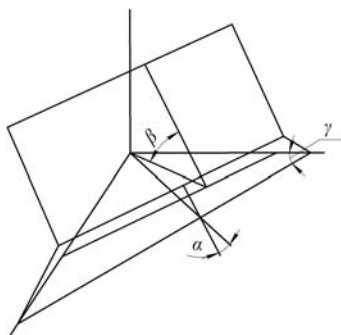
Підсумовуючи викладене, можна зробити деякі висновки.

Незважаючи на різні тенденції та погляди щодо системи землеробства, обробіток ґрунту з обертом шару найближчим часом буде практикуватись, у тому числі й в системі мостового землеробства. Використання для цього серійних робочих органів практично не можливе. Потрібен робочий орган, спеціально адаптований до цієї системи.

Історично букер був створений як машина для неглибокої оранки з одночасною сівбою під пласт і складався з багатокорпусного плуга (на 2–3–4 лемеші), ємкості для насіння та висівного

апарата. Ним сіяли по стерні, де букер одночасно виконував операції оранки і сівби. Букер підрізував бур'ян, створював на поверхні сипкий шар, який перешкоджав швидкому випаровуванню вологи з ґрунту, що дуже важливо для посушливих місцевостей, а крім того, зменшував кількість операцій під час сівби. Негативом була нерівномірна глибина загортання насіння, що знижувало схожість і призводило до перевитрат посівного матеріалу. Букер застосовували для очистки парів від бур'янів. У посушливих районах полиці відкидалися, а працювали тільки лемеші, що стало прообразом сучасних плоскорізів, які забезпечують безвідвальний обробіток. На початку ХХ століття були поширені сівалки-букери, луцильник-заорювач або, як тоді називали, плужниці. На Півдні України, у типовому степовому краї, букери частіше використовували, ніж плуги, незважаючи на те, що закордонні виробники активно впроваджували землеробські знаряддя Сакса та Екерта.

Особливість роботи букера полягає в тому, що він менш інтенсивно розпушує шар ґрунту і тим самим знижує ймовірність ерозії. Нами було помічено, що деякі господарства Півдня зі складними ґрунтовими умовами, продовжують використовувати цей вид плуга. І використовується він на глибинах до 15–18 см, тобто практично замість луцильника. Саме це наштовхнуло нас на думку дослідити шляхом порівняльних польових випробувань якісні показники роботи плуга-букера і звичайного полицевого луцильника.



**Рис. 4.10.**  
**Конструктивна схема корпусу**

До відмінностей конструкції плуга-букера слід віднести:

- 1) малий кут постановки лемеша до дна борозни;  $\alpha = 5-8^\circ$ ;
- 2) кут постановки лемеша до стінки борозни ( $\gamma = 63^\circ$ ) обраний з урахуванням мінімізації бокової складової загального опору корпусу;
- 3) полиця плоскої форми. Якщо провести аналогію з полицею звичайного плуга, то твірна полиця є пряма лінія з постій-

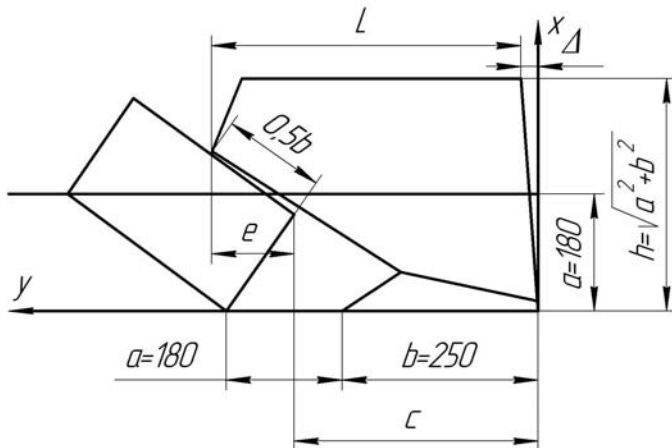
ним кутом  $\delta = 43^\circ$  до стінки борозни; напрямна твірної теж пряма лінія з постійним кутом  $\beta = 65^\circ$  до дна борозни;

4) відсутність польової дошки;

5) ширина захвату одного корпусу  $b = 25$  см.

Параметри полиці були аргументовані нами таким чином.

Для виконання розрахунків необхідно знати два основних конструктивних параметри – довжину  $L$  та висоту  $h$  полиці (рис. 4.11).



**Рис. 4.11. Розрахункова схема до визначення оптимальних параметрів корпусу плуга-букера**

Відповідно до розрахункової схеми

$$h = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{180^2 + 250^2} = 308.$$

Прийнято  $h = 310$  мм.

Як відомо, польовий обріз полиці повинен бути відхилений від вертикалі на кут  $3-5^\circ$ . Тому

$$\Delta = h \cdot \operatorname{tg}3^\circ = 308 \cdot 0,0524 = 16 \text{ мм.}$$

Далі, відповідно до розрахункової схеми,

$$C = a + b - a \cdot \cos 38^\circ = 180 + 250 - 180 \cdot 0,788 = 288 \text{ мм;}$$

$$e = 0,5 \cdot b \cdot \cos 52^\circ = 0,5 \cdot 250 \cdot 0,6137 = 77 \text{ мм.}$$

Остаточню

$$L = c + e - \Delta = 288 + 77 - 16 = 349 \text{ мм.}$$

Довжина крила полиці з урахуванням нахилу до стінки борозни  $\eta = 75^\circ$ , тобто

$$L_{\Pi} = L / \cos 75^\circ = 349 / 0,2588 = 1,35 \text{ м. м.}$$

Прийнято, що  $L_{\Pi} = 1,35$  м.

У процесі роботи реакція корпусу звичайного полицевого плуга складається з опору ґрунту на різання лемешем і опору на переміщення підрізаного шару полицею. Враховуючи, що леміш і полиця встановлені під кутом до напрямку руху, виникає поперечна складова реакції опору, яка компенсується польовою дошкою. Постає питання: якщо поперечні складові реакції лемеша і полиці належним чином спрямувати, то в ідеальному випадку можна відмовитися від польової дошки, що суттєво зменшить тяговий опір і, як наслідок, навантаження на ферму.

А.М. Панченко [3, 4] аналітично дослідив складові діючих на корпус плуга сил і на основі досліджень дійшов висновку, що загальну реакцію можна розділити на такі складові:

- підрізання шару ґрунту лемешем;
- реакції полиці з лемешем як суцільної підпірної стінки;
- опір на переміщення шару ґрунту вздовж підпірної стінки;
- додатковий опір на затуплення леза;
- швидкісна складова опору.

У результаті вчений отримав відому формулу

$$\begin{aligned}
 P_{P1} = C_{VD} \cdot \left[ b \cdot a + \frac{0,66 \cdot a^2 \cdot ctg \varphi_2}{\cos(\alpha_P + \varphi_2)} \right] \cdot tg(45^\circ + \varphi_2) + 4,9 \cdot b \cdot a^2 \times \\
 \times tg^2 \cdot \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2}{2} \right) \cdot \gamma [sin \varphi_2 + cos(\alpha_P - \varphi_2) \cdot cos \alpha_P \cdot tg \varphi_1] + \\
 + a^2 \cdot \{ 0,5 \cdot C_{VD} \cdot [tg(45^\circ + \varphi_2) + ctg(\alpha_P)] \cdot \frac{0,66 \cdot ctg \varphi_2}{\cos(45^\circ + \varphi_2)} + \quad (4.8) \\
 + 4,9 \cdot \delta_P \cdot tg^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2}{2} \right) \cdot sin \varphi_2 \cdot \gamma \} \cdot tg \varphi_1 + K'(z + x \cdot tg \varphi_1) \cdot b + \\
 + 9,81 \cdot b \cdot a \cdot \gamma \cdot \frac{sin \alpha_P \cdot cos \theta}{sin(\alpha_P + \theta)} \cdot V_2,
 \end{aligned}$$

де  $b$  – приведена ширина захвату;

$a$  – глибина оранки;

$\alpha_P$  – кут різання;

$\varphi_1$  – кут тертя ґрунту по сталі;

$\varphi_2$  – кут внутрішнього тертя ґрунту;

$\gamma$  – питома вага ґрунту;

$K'$  – межа несучої спроможності;

$z, x$  – параметри площадки затуплення леза;

$\theta$  – задній кут леза;

$\delta_p$  – товщина лемеша;

$\alpha_p$  – кут постановки лемеша до дна борозни.

Згідно з розрахунками за наведеною формулою сила різання ґрунту лемешем становить приблизно 70 % від загального опору плуга. Легко підрахувати, що, залежно від кута внутрішнього тертя ґрунту  $\gamma_o$  нахилу леза лемеша до стінки борозни,  $F_B$  буде становити 5–20 % від загального опору корпусу, тобто бокові (поперечні) складові опору лемеша і полиці можна у значній мірі компенсувати.

Але, як показала практика, використання цієї формули стосовно букера дає велику похибку. Це пов'язано з тим, що формула (2.1) працює при кутах різання  $25^\circ < \alpha < 35^\circ$  (у нашому випадку  $5-7^\circ$ ). До того ж букер має іншу форму полиці і вона встановлена практично вертикально, тобто її вона підпадає під класифікацію підпірна стінка.

Проаналізуємо складові формули (4.8) з точки зору наведених нами відмінностей.

Перша складова

$$P_1 = C_{уд} \cdot \left[ b \cdot a + \frac{0,66 \cdot a^2 \cdot ctg \varphi_2}{\cos(\alpha_p + \varphi_2)} \right] \cdot tg(45^\circ + \varphi_2). \quad (4.9)$$

Леміш представлений у цій складовій одночасно як лезо і підпірна стінка, при цьому використовується залежність, отримана М.О. Цитовичем [6] для визначення реакції підпірної стінки. Але за малих кутів постановки леміш не може бути підпірною стінкою. Тому цю складову перепишемо як

$$P_1 = C_{уд} \cdot b \cdot \cos^{-1} \gamma,$$

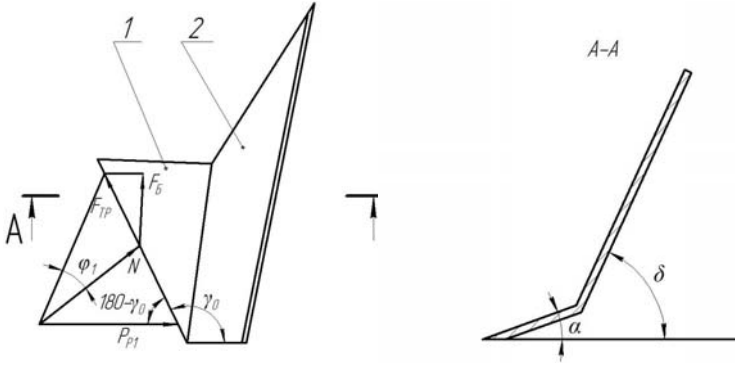
де  $b$  – ширина захвату корпусу;

$\gamma$  – кут постановки леза леміша до стінки борозни.

Друга складова розглядає леміш і полицю як суцільну підпірну стінку.

$$P_2 = 4,9 \cdot b \cdot a^2 \cdot tg^2 \cdot \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2}{2} \right) \cdot \gamma [ \sin \varphi_2 + \cos(\alpha_p - \varphi_2) ] \times \\ \times \cos \alpha_p \cdot tg \varphi_1 + a^2 \cdot \{ 0,5 \cdot C_{уд} \cdot [ tg(45^\circ + \varphi_2) + ctg(\alpha_p) ] \times \\ \times \frac{0,66 \cdot ctg \varphi_2}{\cos(45^\circ + \varphi_2)} + 4,9 \cdot \delta_p \cdot tg^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2}{2} \right) \cdot \sin \varphi_2 \cdot \gamma \} \cdot tg \varphi_1. \quad (4.10)$$

Перша частина цієї формули – це вага шару фрунту, що знаходиться на поверхні робочого органа, друга частина – дія підпірної стінки, третя – додаткова сила дії ваги ґрунту, що враховує кривизну поверхні. Третя частина у нашому випадку відсутня. Останні дві складові – опір від затуплення леза і вплив швидкості руху залишаються незмінними.



**Рис. 4.12. Розрахункова схема корпусу букера**

Враховуючи викладене, формулу (4.10) перепишемо в такому вигляді:

$$\begin{aligned}
 P_{P1} = & C_{yд} \cdot b \cdot \cos^{-1} \gamma + 4,9 \cdot b \cdot a^2 \cdot \text{tg}^2 \cdot \left( 45^\circ - \frac{\varphi_2}{2} \right) \times \\
 & \times \gamma [ \sin \varphi_2 + \cos(\alpha_p - \varphi_2) \cdot \cos \alpha_p \cdot \text{tg} \varphi_1 ] + \\
 & + a^2 \cdot \{ 0,5 \cdot C_{yд} \cdot [ \text{tg}(45^\circ + \varphi_2) + \text{ctg}(\alpha_p) ] \cdot \frac{0,66 \cdot \text{ctg} \varphi_2}{\cos(45^\circ + \varphi_2)} + \\
 & + K'(z + x \cdot \text{tg} \varphi_1) \cdot b + 9,81 \cdot b \cdot a \cdot \gamma \cdot \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V_2.
 \end{aligned} \quad (4.11)$$

За наведеною формулою виконаємо розрахунки для реальних ґрунтових умов за різних значень кута  $\gamma$  і проаналізуємо отримані дані.

Вихідні дані:

ширина захвату –  $b = 0,25$  м;

глибина оранки –  $a = 0,10$  м;

довжина полиці –  $L = 0,35$  м;

висота полиці –  $H = 0,20$  м;

кут постановки леміша до дна борозни –  $\alpha_p = 5^\circ$ ;

кут утворюючої полиці до стінки борозни –  $\gamma_{II} = 75^\circ$ ;  
 задній кут леза –  $\theta = 10^\circ$ ;  
 товщина лемеша –  $\delta_p = 0,01$  м;  
 параметри площадки затуплення леза –  $z = x = 0,0002$  м;  
 швидкість руху –  $2,0$  м/с.

Таблиця 4.1

*Дані розрахунків тягового опору*

$C_{yII}$ , кН/м <sup>2</sup>	$\gamma$ , град	$P_{PI}$ , кН
2,0	45	0,56
	75	0,51
	120	0,46
4,0	45	0,64
	75	0,59
	120	0,51
6,0	45	0,73
	75	0,66
	120	0,59

Параметри ґрунту:

кут зовнішнього тертя –  $\varphi_1 = 22^\circ$ ;  
 кут внутрішнього тертя –  $\varphi_2 = 30^\circ$ ;  
 питома вага ґрунту –  $\gamma = 1,4$  т/м<sup>3</sup>.

Результати розрахунків представлені в табл.4.1.

Аналіз даних тягового опору та побудованих на їх основі графіків показує, що тяговий опір може бути суттєво знижено шляхом оптимізації кута постановки леза лемеша до стінки борозни. Особливо це відстежується зі збільшенням питомого зчеплення часток ґрунту.

## 5. ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛАП ПЛОСКОРІЗІВ

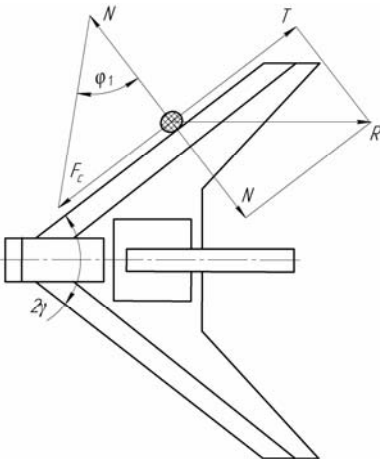
### 5.1. ПАСИВНІ ПЛОСКОРІЗИ

Стрілчасті лапи використовують як для поверхневого, так і для основного обробітку ґрунту. Головне їх призначення – розпушення ґрунту та знищення бур'янів шляхом підрізання кореневої системи. Незважаючи на конструктивні відмінності, загальні принципи формування робочих поверхонь спільні. Розглянемо основні параметри, що визначають конструкцію, на прикладі лапи для поверхневого обробітку ґрунту.

Кут підйому грудей  $\alpha$  приймаємо з огляду на умову невинесення нижнього вологого шару на денну поверхню в напрямку руху. Для плоскорізальних лап  $\alpha = 9-10^\circ$ .

Кут постановки крила до дна борозни для плоскорізальних лап становить  $\beta = 15-18^\circ$ .

Кут розкриття  $2\gamma$  приймаємо за умови перерізання кореневої системи з переміщенням її вздовж леза. Розглянемо розрахункову схему (рис. 5.1)



*Рис. 5.1. Розрахункова схема до визначення кута розкриття стрілчастої лапи*

У разі зустрічі леза з бур'яном опір  $R$  дає складову  $T$ , яка намагається зсунути його вздовж леза, та силу нормального тиску  $N$ . Протидіюча тиску  $N$  сила  $N'$  є причиною того, що

$$T > F_c. \quad (5.1)$$

За розрахунковою схемою:

$$T = R \cdot \cos\gamma;$$

$$N = R \cdot \sin\gamma.$$

Сила опору

$$F_c = N \cdot \operatorname{tg}\varphi_1 = R \cdot \sin\gamma \cdot \operatorname{tg}\varphi_1,$$

де  $\varphi_1$  – кут тертя бур'янів по лезу.

Підставивши у вираз (5.1) отримані значення, одержимо, що

$$R \cdot \cos\gamma > R \cdot \sin\gamma \cdot \operatorname{tg}\varphi_1. \quad (5.2)$$

Розділимо праву та ліву частини рівняння на  $R \cdot \sin\gamma$

$$\operatorname{ctg}\gamma > \operatorname{tg}\varphi_1,$$

або остаточно  $\gamma < 90^\circ - \varphi_1$ .

## 5.2. ПЛОСКОРІЗИ АКТИВНОЇ ДІЇ

Під час використання стрільчастих лап на основному обробітку ґрунту виникає ряд специфічних проблем: недостатня якість розпушення, значний тяговий опір та інше. Для вирішення цих проблем, а також для інтенсифікації просипання дрібних часток у нижні шари ґрунту (що необхідно для зниження ймовірності виникнення вітрової ерозії) до лап підводять примусові коливання. Коливання можуть бути повздовжними, поперековими, кутовими та коловими. Проаналізуємо, для прикладу, як впливає підведення колових коливань на величину кута розкриття стрільчастої лапи (рис. 5.2).

Припустимо, що корені бур'янів зустрічаються з лезом лапи у довільно взятій точці  $A$ , яка виконує коловий рух відносно власного центра обертання  $O_3$ . Розташуємо центр координат у точці  $O_3$  і проведемо осі, як показано на схемі.

Рівняння абсолютного руху точки  $A$  становитимуть:

$$X = V_m \cdot t + R \cdot \sin(\omega t); \quad (5.3)$$

$$Y = -R \cdot \cos(\omega t), \quad (5.4)$$

де  $V_m$  – швидкість поступального руху агрегату;

$\omega$  – частота колових коливань;

$R$  – радіус ексцентриситету;

$t$  – час.

Складові швидкості руху:

$$V_x = dx / dt = V_m + R \cdot \omega \cdot \cos(\omega t);$$

$$V_y = dy / dt = R \cdot \omega \cdot \sin(\omega t).$$

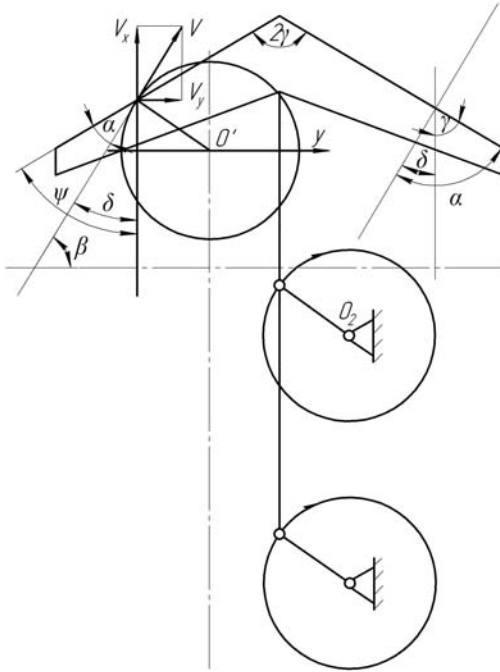
Миттєве значення кута  $\beta$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{V_m + R \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)}. \quad (5.5)$$

або

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1 + \lambda \cdot \cos(\omega t)}{\lambda \cdot \sin(\omega t)}. \quad (5.6)$$

де  $\lambda = \omega \cdot R / V_m$  – коефіцієнт кінематичного режиму роботи знаряддя.



**Рис. 5.2.**  
*Розрахункова схема до визначення кута розкриття активної стрільчатої лапи*

Система рівнянь (5.3) та (5.4) є рівняннями циклоїди у параметричному виді. Для запобігання руху лапи у зворотному напрямку необхідно виконати умову

$$\omega < V_m / R, \quad (5.7)$$

що означає  $\lambda < 1$ .

Відповідно до розрахункової схеми:

для лівого крила

$$\alpha = \gamma - \delta = \gamma + \beta - 90^\circ;$$

для правого крила

$$\alpha = \gamma + \delta = 90^\circ + \gamma - \beta,$$

де  $\alpha$  – кут між лезом та напрямком його переміщення у просторі.

Як показано раніше, для різання з ковзанням необхідно, щоб  $\alpha = 90^\circ - \varphi_1$ . Тоді для лівого крила

$$\gamma < 180^\circ - \varphi_1 - \beta.$$

Введемо позначення  $\gamma_{\Pi} = 90^\circ - \varphi_1$ , що відповідає значенню кута розкриття у пасивному режимі. Тоді остаточно одержимо, що

$$\gamma < \gamma_{\Pi} + 90^\circ - \operatorname{arctg} \frac{1 + \lambda \cdot \cos(\omega t)}{\lambda \cdot \sin(\omega t)}. \quad (5.8)$$

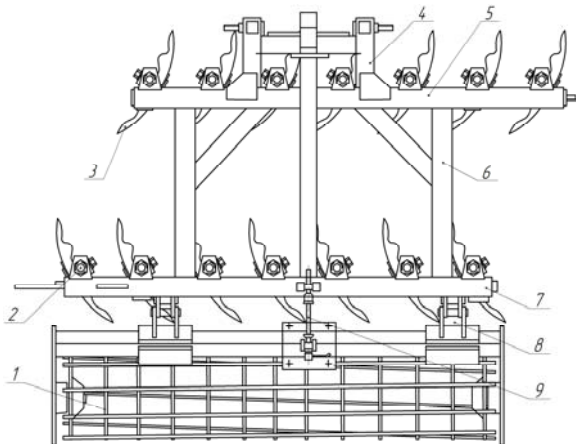
Таким чином, робимо висновок: оскільки  $\operatorname{arctg}$  не може бути більше  $90^\circ$ , в активному варіанті кут розкриття  $\gamma$  можна збільшити. Конкретна величина збільшення залежить від коефіцієнта кінематичного режиму роботи  $\lambda$ . Збільшення кута  $\gamma$  зменшує площу контакту оброблюваного середовища з робочим органом, що у свою чергу позитивно впливає на сталість ходу по глибині, зменшує тяговий опір.

## 6. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ДИСКОВИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ТА МАШИН НА ЇХ ОСНОВІ

### 6.1. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ СХЕМ ДИСКАТОРА ТА ДИСКОВОГО ПЛУГА

Останнім часом ґрунтообробні машини, в основу яких покладені робочі органи дискового типу, отримали пріоритетне розповсюдження. Пов'язане це перш за все з більш якісним виконанням технологічного процесу за меншого тягового опору порівняно з полицевим обробітком. За характером виконуваної роботи такі машини поділяються на борони, лушчильники, дискатори та плуги.

У цій групі особливе місце займають машини, дискові робочі органи яких мають можливість змінювати кути в усіх трьох площинах. Це дискатори та плуги. Незважаючи на окремі спільні риси технологічних процесів, що виконують ці машини, їх взаємозаміна неможлива.



**Рис. 6.1. Конструктивна схема дискатора:**

1 – коток; 2, 3 – дискові стояки відповідно другого та першого рядів; 4 – начіпний пристрій; 5 – передня повздожня балка; 6 – повздожня балка; 7 – поперечна балка; 8 – причіпний пристрій котка; 9 – механізм регулювання занурення

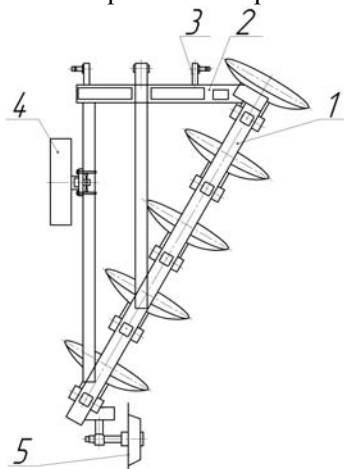
Основна відміна машин – різниця в конструктивних схемах. В обох машинах диски встановлені на індивідуальних стояках з мож-

ливистою зміною кута атаки. Відміна полягає в розташуванні стояка, у дискатора – рядне, у плуга – за класичною схемою полицевого плуга. Розглянемо конструктивну схему дискатора (рис. 6.1).

Рядне розташування дисків, як це виконане в дискаторі, має такі переваги:

- машина врівноважена в плані діючих сил;
- відсутні звально-розвальні борозни;
- мала кінематична довжина.

Проте наведені переваги технічно добре реалізуються на глибинах 15–18 см. Збільшення глибини до рівня основного обробітку ґрунту (25–32 см) автоматично вимагає збільшення діаметра диска до рівня, який забезпечує як мінімум його обертання. Дальність ходу шару ґрунту з поверхні такого диска теж збільшується, і все це разом вимагає збільшення відстані між дисками. Диски другого ряду не можуть забезпечити необхідного перекриття за шириною захвату, що змушує збільшувати рядність. Враховуючи, що кількість рядів оптимально повинна бути парною, її треба доводити до чотирьох. Дослідний зразок такої машини був виготовлений та випробуваний КВП «Дніпропетровський комбайновий завод». Як показали результати досліджень, машина стає громіздкою, складною в обслуговуванні і практично втрачає всі ті переваги, що має дискатор.

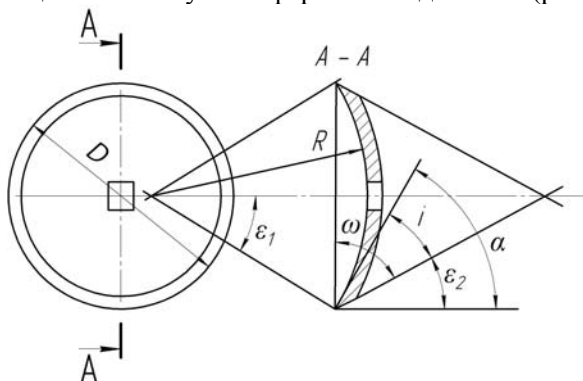


**Рис. 6.2. Конструктивна схема дискаторного плуга:** 1 – дисковий стояк; 2 – рама; 3 – начинний пристрій; 4 – опорне колесо; 5 – опорне колесо

Розташування дисків за класичною схемою полицевого плуга (рис. 6.2) для обробітку ґрунту на глибину 25–32 см більш перспективне. Усі диски знаходяться поза межами дії один одного і це виключає забивання. Можливе регулювання величини перекриття та кута атаки у широких межах.

## 6.2. КОНСТРУКТИВНІ ПАРАМЕТРИ ДИСКА

Відповідно до призначення дискові борони та лушильники виконують поверхневий або основний обробіток ґрунту, залежно від конструктивного виконання. Промисловість випускає їх переважно причіпними зі симетричним розташуванням дисків. Диски комплектують у секції по 8–10 шт. Кожна секція змонтована на окремій рамі, яка шарнірно з'єднана з основною рамою машини. Як правило, секції комплектують сферичними дисками (рис. 6.3).



**Рис. 6.3. Конструктивна схема сферичного диска**

Діаметр диска  $D$  залежить від заданої максимальної глибини обробітку. На практиці встановлено, що для дискової борони діаметр диска повинен у 4–6 разів перевищувати глибину обробітку, для лушильника – у 5–6 разів. Із збільшенням діаметра диска різко зростає вертикальна складова реакції ґрунту. Тому для заглиблення дисків великого діаметра треба збільшувати конструктивну масу знаряддя.

Радіус кривизни диска визначає інтенсивність розпушення і обертання ґрунту. Чим менше радіус, тим розпушення і обертання інтенсивніші.

Велике технологічне значення має, так званий, задній кут  $\varepsilon_2$ . Від нього залежить енергоємність процесу підрізання, він змінний за висотою диска. Для нормальної роботи знаряддя потрібно, щоб цей кут на рівні поверхні поля був позитивним.

Диски загострюють із зовнішньої сторони, при цьому як для лушильників, так і для борін кут заточки становить 10–20°. Диски, які за призначенням працюють на твердих ґрунтах мають заточку з внутрішньої сторони.

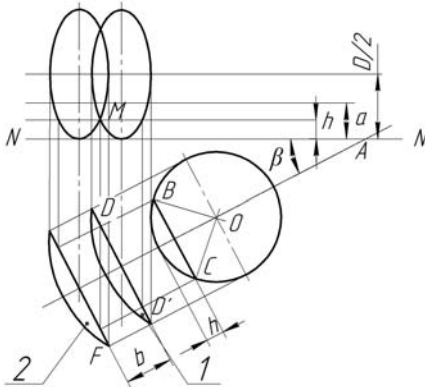
За аналогією з іншими ґрунтообробними знаряддями кут різання для диска становить  $\alpha = i + \varepsilon_2$ .

Основний установчий параметр – кут атаки, або кут між віссю секції і напрямком руху агрегата. Цей кут становить у луцильників 10–35°, у борін – 10–22°. Діскові луцильники при куті атаки 10–20° можна використовувати як однослідні дискові борони.

### 6.3. ПРОФІЛЬ БОРОЗНИ

У процесі роботи кожен диск вирізає у ґрунті шар, утворюючи гребінчасте дно борозни. Висота гребенів  $h$  залежить від діаметра  $D$  та радіуса кривизни  $R$  диска, відстані між дисками  $b$  і кута атаки  $\beta$ . Відповідно до агротехнічних вимог висота гребенів не повинна перевищувати  $h < 0,5a$ , де  $a$  – глибина обробки. Останнє здебільшого визначається відстанню між дисками у батареї. Як приклад розглянемо порядок формування профілю борозни графічним методом.

Наносимо лінію дна борозни  $N-N$  і від неї на відстані  $h$ ,  $a$ ,  $D/2$  – відповідно рівень висоти гребенів, денної поверхні та осі обертання дисків (рис. 6.4).



*Рис. 6.4. Розрахункова схема до визначення відстані між суміжними дисками*

Під кутом  $\beta$  з довільної точки  $A$  проводимо проєкцію на дно борозни осі батареї дисків.

Відступивши від точки  $A$  приблизно на  $(2,5-3) \cdot D$ , у прийнятному масштабі окреслюємо контур диска 1, який приймаємо за базовий при проектуванні.

На контурі диска 1 наносимо точки, які знаходяться на рівні  $h$  від дна борозни. Для їх знаходження поруч з диском проводимо

коло з центром у точці  $O$  діаметром, що дорівнює діаметру диска, і відмічаємо на ньому лінію  $BC$  на відстані  $h$  від дна борозни.

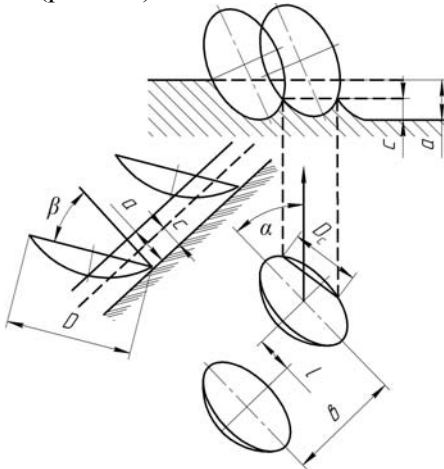
Провівши з точок  $B$  і  $C$  паралельно осі прями до перетину з диском 1, отримуємо точки  $D$  і  $D'$ , які на контурі диска відповідають рівню  $h$ .

Спроекувавши базові точки диска 1 на відповідні рівні профілю борозни і з'єднавши точки перетину, отримуємо поперечно-вертикальну проекцію диска.

Наступний диск 2 треба вписати у профіль борозни таким чином, щоб у точці  $M$  обидві проекції дисків перетиналися на рівні  $h$ . Для дотримання цієї вимоги з точки  $D$  опускаємо (за рисунком) перпендикуляр до перетину з продовженням лінії  $CD'$ . Через отриману точку  $F$  проводимо лінію обріза диска 2 і на ній будуємо його профіль.

Аналогічно диску 1 на профіль борозни будуємо проекцію диска 2.

Параметр  $b$  є оптимальним значенням відстані між двома суміжними дисками з точки зору виконання агровимоги відносно висоти гребенів. У разі, коли диск встановлено під кутом до вертикалі, профіль дна борозни відрізняється від попереднього розглянутого (рис. 6.5).



**Рис. 6.5. Розрахункова схема диска, встановленого під кутом до вертикалі**

Відповідно до розрахункової схеми

$$D_C \cdot \sin \alpha = b \cdot \cos \alpha - l \cdot \sin \alpha,$$

або

$$D_C = b \cdot \operatorname{ctg} \alpha - l.$$

Для висоти нерозпушеного гребеня на дні борозни  $C$  та кута нахилу до вертикалі  $\beta$

$$D = \frac{D_C^2 \cdot \cos \beta}{4C} + \frac{C}{\cos \beta};$$

$$b = [2\sqrt{(C/\cos \beta) \cdot (D - C/\cos \beta)} + 1] \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (6.1)$$

де  $D$  – діаметр диска;

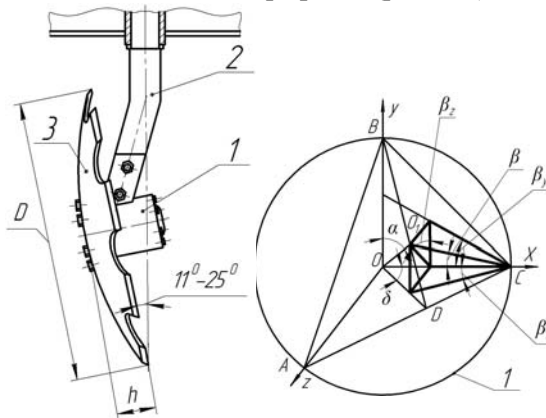
$b$  – відстань між дисками;

$l$  – відстань між осями обертання дисків.

#### 6.4. РІВНЯННЯ ТВІРНИХ

В основу розрахунків робочих органів ґрунтообробних машин покладено робочу гіпотезу: робочі органи являють собою систему певним чином зорієнтованих у просторі елементарних клинів, які в сумі утворюють тригранний клин. Як і інші відомі робочі органи, диск можна представити як тригранний клин з кутом атаки до напрямку руху.

Відповідно до визначення, кут атаки дискового робочого органа – це кут між вектором напрямку руху агрегату і площею обертання диска. У випадку з дисковою бороною, коли диски встановлено на єдиній батареї вертикально, цей кут співпадає з кутом постановки дискової батареї до напрямку руху. Якщо диск встановлено під кутом до вертикалі, кут атаки не лежить у горизонтальній площині. Останнє пояснюється графічно (рис. 6.6).



**Рис. 6.6.** Розрахункова схема дискового робочого органа

Помістимо сферичний диск в систему координат  $XYZ$  так, щоб вісь обертання проходила через початок координат. З'єднавши точки перетину різальної кромки 1 диска з осями координат, отримуємо трикутник  $ABC$ , який лежить у площині обертання диска. Вісь обертання диска перетинає отриману площину в точці  $O_1$ , з'єднавши яку з точкою  $C$ , отримуємо кут атаки диска  $\beta$  за умови, що напрямок руху агрегату співпадає з віссю  $X$ .

Кут атаки має три складових у координатних площинах  $\beta_X, \beta_Y, \beta_Z$ , які є відповідно кутами зсуву, розпушення та обертання. Легко довести, що зв'язок між кутами підпорядковується залежностям:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\beta_X &= \operatorname{tg}\beta_Y \cdot \operatorname{tg}\beta_Z; \\ \operatorname{tg}\beta \cdot \cos\beta_Z &= \operatorname{tg}\beta_Y. \end{aligned}$$

Для сферичного диска ці кути не є постійними, і закон їх зміни визначає якісні показники роботи робочого органа. Відстежимо зміну цих кутів по мірі проходження шару ґрунту по поверхні.

Повернемо осі координат у такий спосіб, щоб вісь  $OY$  співпала з віссю обертання диска  $OO_1$ . Положення центра координат лишаємо незмінним. Зв'язок між координатами старої та повернутої системи можна записати як:

$$\begin{aligned} X &= X_1 \cdot \cos\alpha / \cos\delta; \\ Y &= Y_1 \cdot \cos\alpha; \\ Z &= Z_1 \cdot \cos\alpha / \cos\delta, \end{aligned}$$

де  $X_1, Y_1, Z_1$  – координати повернутої системи;

$\delta$  – кут постановки стока в горизонтальній площині відносно напрямку руху.

Рівняння поверхні сфери диска має вигляд

$$X_1^2 + (R - Y_1)^2 + Z_1^2 = R^2, \quad (6.2)$$

де  $R$  – радіус кривизни сфери.

У разі переходу до старої системи координат рівняння (6.1) набуде вигляду

$$\frac{X^2 \cdot \cos^2 \delta}{\cos^2 \alpha} + \left( R - \frac{Y}{\cos \alpha} \right)^2 + \frac{Z^2 \cdot \cos^2 \delta}{\cos^2 \alpha} = R^2. \quad (6.3)$$

За аналогією з полицею корпусу тракторного плуга сліди перетину поверхні диска з площинами, що проведені паралельно дну борозни, є твірними робочої поверхні (рис. 6.7). Рівняння лінії  $AB$  перетину поверхонь запишемо як

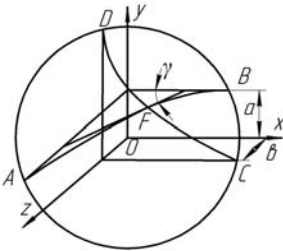
$$\frac{x^2 \cdot \cos^2 \delta}{\cos^2 \alpha} + \left( R - \frac{a}{\cos \alpha} \right)^2 + \frac{z^2 \cdot \cos^2 \delta}{\cos^2 \alpha} = R^2,$$

де  $a$  – відстань між площиною  $XOZ$  та площею перетину.  
Після виконання необхідних математичних перетворень матимемо рівняння твірної поверхні диска

$$x^2 + y^2 = \frac{a \cdot (2R \cdot \cos \alpha - a)}{\cos^2 \delta},$$

або

$$x = \sqrt{\frac{a \cdot (2R \cdot \cos \alpha - a)}{\cos^2 \delta} - z^2}.$$



**Рис. 6.7. Розрахункова схема до визначення рівняння твірної**

Як видно з отриманого рівняння, одержана твірна на відміну від твірної тракторного плуга не є прямою лінією і кут її нахилу до стінки борозни буде змінним. Миттєве значення тангенса кута нахилу дотичної у довільно взятій точці  $F$  становитиме

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{dz}{dx} = - \frac{x \cdot \cos \delta}{\sqrt{a \cdot (2R \cdot \cos \alpha - a) - x^2 \cdot \cos^2 \delta}}. \quad (6.4)$$

Для отримання повністю детермінованої картини необхідно знати значення кута розпушення в цій точці. Зробимо перетин у повздовжньо-вертикальній площині. Запишемо рівняння лінії  $CD$  перетину

$$y = R \cdot \cos \alpha - \sqrt{R^2 \cdot \cos^2 \alpha - (x^2 + b^2) \cdot \cos^2 \delta},$$

де  $b$  – відстань від площини перетину до площини  $XOY$ .

Тангенс кута кришення

$$\operatorname{tg} \beta_y = \frac{dy}{dx} = - \frac{x \cdot \cos^2 \delta}{\sqrt{R^2 \cdot \cos^2 \alpha - (x^2 + b^2) \cdot \cos^2 \delta}}.$$

Таким чином, у кожній точці робочої поверхні відоме рівняння твірної та значення двох кутів, які визначають положення цієї твірної у просторі. Це дозволяє під час проектних розрахунків знаряддя використовувати методики, максимально наближені до методик розрахунку полиці тракторного плуга.

## 6.5. ОПТИМІЗАЦІЯ КОМПОНОВОЧНОЇ СХЕМИ МАШИНИ

У роботі розглянуто два найважливіших елементи компоновки машини:

- розташування дисків на рамі машини;
- положення начіпки відносно рами.

Ці два показники здебільшого визначають сталість ходу агрегату та відповідність якості роботи агротехнічним вимогам. Положення начіпки залежить від напрямку результуючої сили тяги плуга, а останнє залежить від профілю борозни, взаємного розташування дисків та реакції на відкидання шару ґрунту в процесі обертання диска. Проаналізуємо послідовно окреслені параметри.

*Профіль борозни.* Напрямок дії результуючої сили тяги дискового плуга при зміні кутів постановки диска на відміну від дискартора буде змінюватись. Розглянемо розрахункову схему (рис. 6.8).

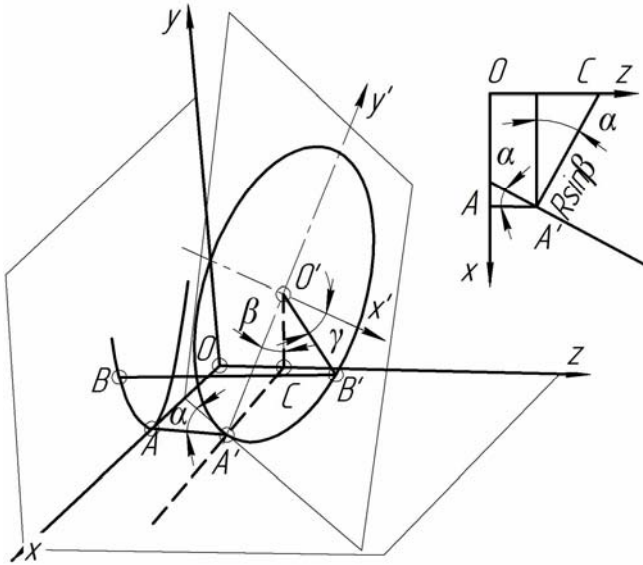


Рис. 6.8. Розрахункова схема до визначення профілю борозни

Розмістимо площину  $XOY$  перпендикулярно напрямку руху диска, а сам диск – в площині, встановленій під кутом  $\alpha$  до напрямку руху і кутом  $\beta$  до вертикалі. Коло диска утворене переміщенням точки  $B'$  при зміні центрального кута  $\gamma$ . Перпендикуляр  $O'C$  співпадає з віссю стояка диска і проходить через  $OZ$ . Проекція на  $XOY$  точки  $B'$  буде являти собою профіль борозни.

Таблиця 6.1

**Результати розрахунку профілю борозни для найбільш імовірних значень кутів  $\alpha$  і  $\beta$**

$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$X$	$Y$
10°	0°	10	0,97	0,83
		30	0,85	0,50
		60	0,49	0,13
		90	0	0
	20°	10	1,31	0,78
		30	1,20	0,47
		60	0,84	0,12
		90	0,35	0
	40°	10	1,60	0,64
		30	1,49	0,39
		60	1,13	0,10
		90	0,63	0
30°	0°	10	0,85	0,83
		30	0,75	0,50
		60	0,43	0,13
		90	0	0
	20°	10	1,15	0,78
		30	1,05	0,47
		60	0,73	0,12
		90	0,30	0
	40°	10	1,41	0,64
		30	1,31	0,39
		60	0,99	0,10
		90	0,56	0
50°	0°	10	0,63	0,83
		30	0,56	0,50
		60	0,32	0,13
		90	0	0
	20°	10	0,85	0,78
		30	0,78	0,47
		60	0,54	0,12
		90	0,22	0
	40°	10	1,05	0,64
		30	0,97	0,39
		60	0,73	0,10
		90	0,41	0

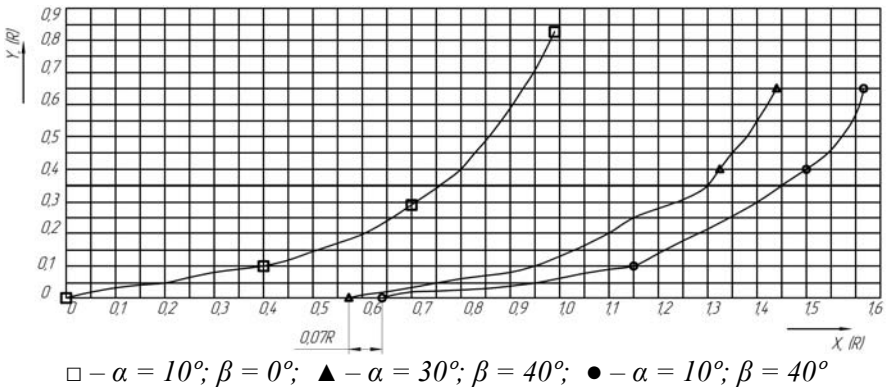
Особливу роль в проекції відіграє точка  $A$ , тобто максимальне значення глибини борозни і положення якої відносно  $OZ$  суттєво впливає на напрямок результуючої сили тяги.

З розрахункової схеми рівняння профілю борозни запишемо, що

$$X = R \cdot \cos\alpha \cdot (\sin\beta + \cos\gamma);$$

$$Y = R \cdot (1 - \sin\gamma) \cdot \cos\beta.$$

Результати розрахунку для найбільш імовірних значень кутів  $\alpha$  і  $\beta$  представлені в табл. 6.1, характерні профілі борозни – на рис. 6.9 (вісь  $Y$  співпадає з віссю стояка диска,  $X = R \cdot X_{(R)}$ ,  $Y = R \cdot Y_{(R)}$ ).



**Рис. 6.9.** Характерні профілі борозни в частках від радіуса диска

Одержані результати свідчать про те, що положення борозни та її профіль суттєво залежать від кутів постановки диска. Так, абсолютний максимум дна борозни (точка  $A$ ) може змінювати своє положення в межах  $0,63R$ , що при  $R = 450$  мм та  $R = 650$  мм становить відповідно 284 та 410 мм. Проте більш реальний діапазон зміни становить  $0,07R$ , відповідно 32 та 45 мм.

## 6.6. ВЗАЄМНЕ РОЗТАШУВАННЯ ДИСКІВ НА РАМІ МАШИНИ

Згідно з розрахунковою схемою (рис. 6.10) визначаємо  $\Delta_1$  та  $\Delta_2$ , відповідно відстані між осями стояків та по ходу машини.

Під час роботи машин з дисковими робочими органами на дні борозни утворюються непорушені гребені, висота яких чітко агротехнічно аргументована. Тому відстань  $\Delta_1$  визначаємо з огляду саме на висоту цих гребенів.

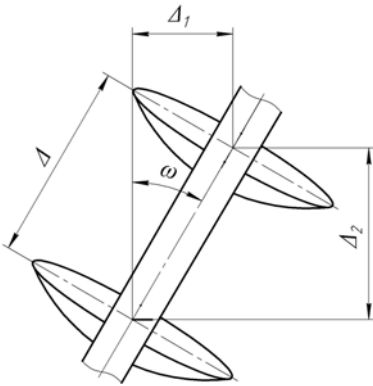


Рис. 6.10. Розрахункова схема до визначення  $\Delta_1$  та  $\Delta_2$

Висота непорушеного гребеня над дном борозни становитиме

$$h = Y = R \cdot (1 - \sin \gamma_h) \cdot \cos \beta,$$

де  $\gamma_h$  – центральний кут, що відповідає висоті  $h$  над дном борозни, або

$$\gamma_h = \arcsin \left( 1 - \frac{h}{R \cdot \cos \beta} \right).$$

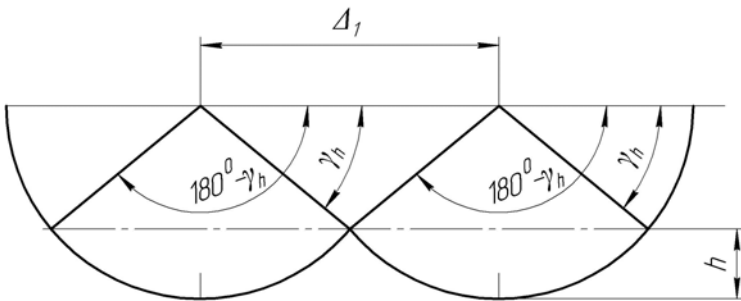


Рис. 6.11. Розрахункова схема до визначення  $\Delta_1$

З розрахункової схеми (рис. 6.11) відстань  $\Delta_1$  не повинна перевищувати

$$\Delta_1 < 2 \cdot R \cdot \cos \gamma_h = 2 \cdot R \cdot \cos \left[ \arcsin \left( 1 - \frac{h}{R \cdot \cos \beta} \right) \right].$$

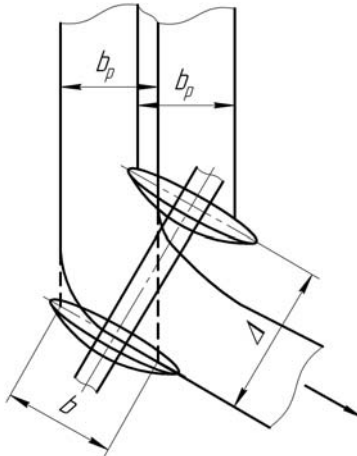
Як показує аналіз отриманої формули, умова перекриття за шириною захвату на рівні поверхні ґрунту буде виконуватися.

Відстань  $\Delta_2$  між дисками в повздовжньому напрямку повинна забезпечувати вільне проходження ґрунтового потоку в разі зміни кутових параметрів постановки дисків (рис. 6.12).

Найбільш детально поведінку підрізаного шару ґрунту дослідив С.Г. Мударісов [11], який виділив три основні різновиди його деформації:

- ◆ без зміни об'єму (вологі ґрунти);
- ◆ зі зменшенням об'єму (сухі пухкі ґрунти);
- ◆ зі збільшенням об'єму (сухі щільні ґрунти).

Автор відзначає, що збільшення об'єму відбувається в основному за рахунок збільшення вертикального розміру шару ґрунту. Найбільшу ширину ґрунтового потоку слід очікувати в першому випадку і вона буде практично співпадати з профілем борозни. Отже, відстань між робочими органами у прокольному напрямку достатньо прийняти такою, що дорівнює максимальній ширині захвату диска.



**Рис. 6.12. Розрахункова схема до визначення  $\Delta$  та  $\Delta_2$**

Як показує практика експлуатації дискаторів, диск зберігає роботоздатність при зануренні у ґрунт не більш ніж  $\frac{2}{3}$  його радіуса. Це відповідає центральному куту  $\gamma = 20^\circ$ . Максимальна глибина борозни в цьому випадку дорівнюватиме

$$a = 0,66 \cdot R \cdot \cos\beta.$$

Ширина захвату диска –

$$\begin{aligned} b_p &= R \cdot \cos\alpha(\sin\beta + \cos 20^\circ) - R \cdot \cos\alpha(\sin\beta + \cos(180^\circ - 20^\circ)) = \\ &= 1,88 \cdot R \cdot \cos\alpha. \end{aligned}$$

Таким чином, відстань між дисками у повздовжній площині запишемо як

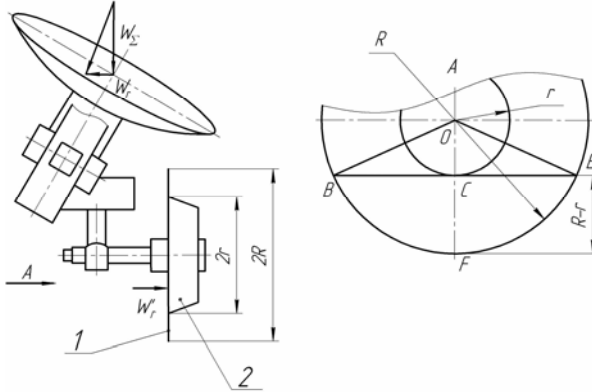
$$\Delta > 1,88 \cdot R \cdot \cos\alpha,$$

а кут нахилу повздожньої балки рами –

$$\theta = \arcsin \frac{\cos \left[ \arcsin \left( 1 - \frac{h}{R \cdot \cos \beta} \right) \right]}{0,94 \cdot \cos \alpha}.$$

## 6.7. КОНСТРУКТИВНІ ПАРАМЕТРИ БОРОЗНОГО КОЛЕСА

За своїм призначенням заднє опорне колесо повинно компенсувати дію реакції ґрунту в поперечній площині, тобто його дія аналогічна дії польової дошки полицевого плуга. Конструктивно опорне колесо складається з диска 1 і опорного котка 2 (рис. 6.13).



**Рис. 6.13.** Розрахункова схема заднього опорного колеса

Бокове зусилля сприймається диском колеса, а опорний коток обмежує його занурення. Тобто робоча частина диска 1 обмежена площею сегмента *BCEF* (вид *A*).

З розрахунку тягового опору нами отримане значення поздожньої складової сили опору. Поперечна складова цієї сили

$$W_T = W_\Sigma \cdot \sin \alpha.$$

Ця сила повинна бути компенсована силою зминання ґрунту диском колеса

$$W_T^i = W_T = q \cdot S \cdot h,$$

або

$$S = W_T / q \cdot h, \quad (6.5)$$

де *q* – коефіцієнт об'ємного зминання ґрунту;

$S$  – площа контакту;  
 $h$  – припустима глибина зминання.

З рис.6.13 площа сектора  $OBFE$  дорівнює

$$S_C = R^2 \cdot \arccos \frac{r}{R},$$

площа трикутника  $OBE$  –

$$S_{\Delta} = r \cdot \sqrt{R^2 - r^2}.$$

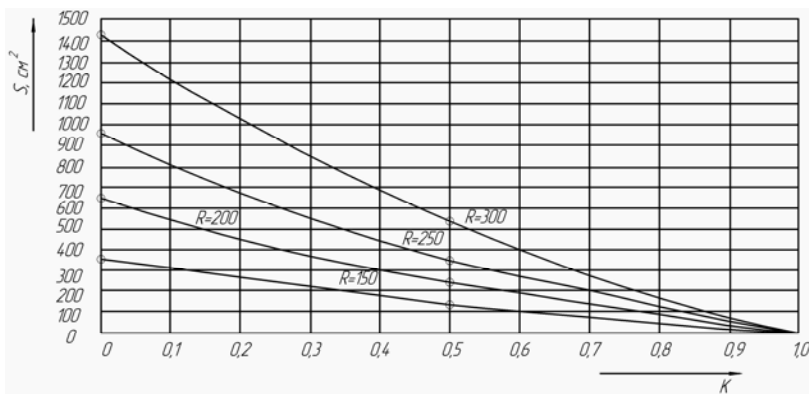
Тоді шукана площа сегмента  $BCEF$

$$S = R^2 \cdot \arccos \frac{r}{R} - r \cdot \sqrt{R^2 - r^2}. \quad (6.6)$$

Введемо позначення  $k = r/R$ . Тоді рівняння (6.6) набуде вигляду

$$S = R^2 \cdot (\arccos(k) - k \cdot \sqrt{1 - k^2}). \quad (6.7)$$

Якщо задатися величиною  $R$ , то площа контакту буде визначатися величиною  $k$ . Проте рівняння (6.7) в наявному вигляді вирішити неможливо. Тому представимо результати розрахунку у вигляді графіків (рис. 6.14). Оскільки в довідковій літературі одиниці виміру коефіцієнта об'ємного зминання ґрунту  $q$  звичайно наведено в ньютонгах на кубічний сантиметр, а припустиму глибину  $h$  в сантиметрах, то площу контакту  $S$  ми розраховуємо в сантиметрах квадратних.

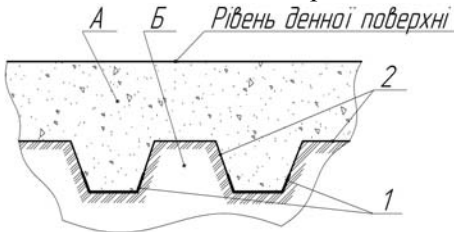


**Рис. 6.14. Залежність площі контакту диска борозного колеса від співвідношення  $k = r/R$**

Таким чином, для визначення радіуса котка борозного колеса за формулою (6.5) потрібно визначити мінімально необхідну площу контакту і потім, задавши величину  $R$ , за рис. 6.14 розрахувати  $k$ . Потрібний радіус буде дорівнювати  $r = k \cdot R$ .

## 7. ОСНОВИ ТЕОРІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ЧИЗЕЛЬНОГО ТИПУ

Чизелювання як різновид основної обробки ґрунту останнім часом набуває все більшого поширення. Це пов'язано передусім з потребою регулювання водного режиму ґрунтів. Характерною ознакою технологічного процесу, що виконує чизельне знаряддя, є глибоке розпушення з недорізом шару ґрунту за шириною захвату і з утворенням на дні борозни нерозпушених гребенів (рис. 7.1). При цьому на дні борозни утворюється ущільнене ложе 1, яке слугує для накопичення вологи. Завдяки тому, що у шарі *A* капіляри порушені, випаровування вологи буде обмежено, а наявність капілярних пор у шарі *B* сприяє регулюванню вологозаряду: знімає надлишки або підживлює в разі зниження рівня.



*Рис. 7.1. Профіль борозни чизеля*

Для сталого регулювання водного режиму необхідно виконати дві додаткові умови. Перша – поверхня 2 не повинна бути ущільненою. Це можливо, коли поверхня буде утворена за рахунок сколювання без контакту з поверхнею робочого органа. Друга умова – шар *A* має складатися з ґрунтових агрегатів, оптимальних за розмірами для даних ґрунтово-кліматичних умов.

Розглянемо, у який спосіб можна виконати означені умови, на прикладі чизельного знаряддя *V*-подібного типу.

### 7.1. КОНСТРУКТИВНА СХЕМА *V*-ПОДІБНОГО КОРПУСА

Знаряддя складається з лемеша 1, двох стояків 2 та несучих кронштейнів 3 (рис. 7.2). Основні параметри, що визначають конструкцію знаряддя:  $\alpha$  – кут атаки лемеша;  $\beta$  – кут нахилу стояків у поперечно-вертикальній площині;  $\gamma$  – кут сходження стояків;  $\delta$  – кут розвалу стояків;  $a$  – глибина занурення;  $b$  – ширина захвату.

У процесі роботи знаряддя у ґрунті формуються зони деформації, які поширюються вперед та в боки. Напрямок сколювання

вперед за ходом машини – під кутом внутрішнього тертя  $\varphi_2$  до нормалі до леза лемеша; у поперечній площині – під кутом  $\varphi_2$  до вертикалі, проведеної у точці формування сколювання.

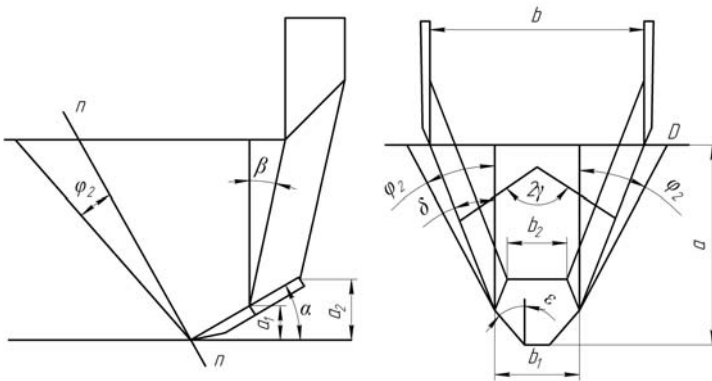
Бокові стояки за умовами формування профілю йдуть по розпушеному шару і участі в сколюванні не беруть. Це обмежує кут розвалу бокових стояків:  $0 < \delta < \varphi_2$ . Проте для утворення ложа 1 необхідно, щоб кут нахилу леза лемеша  $\varepsilon$  перевищував це значення (рис. 7.1). У процесі подальшої роботи сколотий шар ґрунту підіймається по поверхні лемеша, отримує деформацію стискання, що сприяє його розпушенню, та укладається на дно борозни. Умова сталого проходження шару в розхилі бокових стояків:  $0 < \gamma < 0,5\pi - \varphi_1$ , де  $\varphi_1$  – кут тертя ґрунту по металу.

Отже, роботоздатність знаряддя визначається кутами встановлення різальних елементів у просторі. Проблема полягає в необхідності поєднання в просторі в єдину конструкцію 5 конструктивних елементів, при цьому геометричні параметри самих елементів визначаються з умови їх сумісності.

З конструктивної схеми (рис. 7.2) робоча ширина захвату знаряддя становить

$$B_p = b + 2(a - a_1) \cdot (\operatorname{tg}\delta - \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}\gamma),$$

де  $a_1$  – висота стояків над дном борозни.



**Рис. 7.2. Розрахункова схема знаряддя**

Знаряддя роботоздатне при  $B_p > b$ , що накладає обмеження,  

$$\operatorname{tg}\delta - \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}\gamma > 0,$$

або

$$\operatorname{tg}\delta > \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}\gamma.$$

Ширина лемеша  $b_2$  на рівні максимального підйому дорівнюватиме

$$b_2 = b - 2(a_2 - a_1) \cdot \left( \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \alpha} - \operatorname{tg} \delta \right).$$

Ширина бокового стояка становитиме

$$c = (a_2 - a_1) \cdot \frac{(1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta) \cdot \cos \beta}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \delta}.$$

Отже, умови формування ложа та неуцілених поверхонь будуть виконані.

## 7.2. ТЯГОВИЙ ОПІР

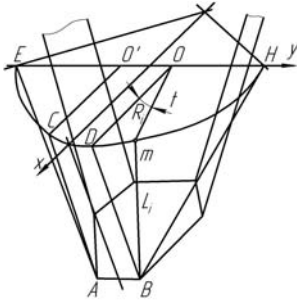
Якість розпушення шару в зоні  $A$  визначається енергоємністю сколювання призми розпушення (рис. 7.1). Зусилля, яке необхідно для сколювання, запишемо як

$$P = F \cdot C_{уд},$$

де  $F$  – площа утвореної поверхні;

$C_{уд}$  – питоме зчеплення часток ґрунту.

Шукана площа може бути поділена на три ділянки (рис. 7.3): прямокутник  $ABDC$  та дві конусоподібні ділянки  $BDOH$  і  $ACO'E$ . В основу конусоподібних поверхонь покладено еліпси з напівосями  $OD = O'C$  та  $OH = O'E$ .



**Рис. 7.3.**  
**Площа утворених поверхонь**

Площа поверхні  $ABDC$  у випадку прямолінійності ділянки  $AB$  становитиме

$$F_1 = \frac{a \cdot c}{\cos(\alpha + \varphi_2)},$$

де  $c$  – ширина лемеша.

Півосі еліпса:

$$OD = a \cdot [\operatorname{ctg}(\alpha) + \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_2)];$$

$$OH = a \cdot \operatorname{tg}(\varphi_2).$$

Рівняння еліпса у параметричному вигляді:

$$X_I = a \cdot [ctg(\alpha) + tg(\alpha + \varphi_2)] \cdot \cos(t);$$

$$Y_I = a \cdot tg(\varphi_2) \cdot \sin(t),$$

де  $t$  – кут нахилу миттєвого радіуса кривизни до осі  $X$ .

Миттєвий радіус кривизни

$$R_I = \sqrt{X_I^2 + Y_I^2}.$$

Миттєва довжина твірної  $R_I$

$$L_I = \sqrt{(X_I - a \cdot ctg(\alpha))^2 + Y_I^2 + a^2}.$$

Площа елементарної сколотої ділянки

$$F_I = 0,5 \cdot L_I \cdot R_I \cdot dt.$$

Загальна площа поверхні сколювання

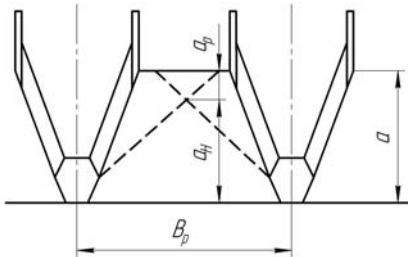
$$F_{СК} = F_1 + 2 \cdot F_2 = \frac{a \cdot c}{\cos(\alpha + \varphi_2)} + \int_0^{\pi/2} L_I \cdot R_I \cdot dt. \quad (7.1)$$

Рівняння (7.1) розв'язується методами чисельного інтегрування на ПЕОМ.

### 7.3. ЗАГАЛЬНА КОМПОНОВКА ЧИЗЕЛЯ

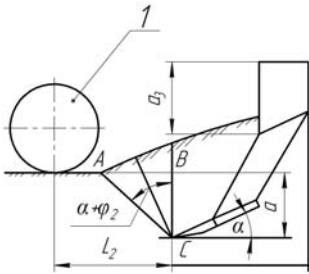
Компоновка машини дещо відрізняється від відомих ґрунто-обробних знарядь, що пов'язано з необхідністю розпушення шару ґрунту без безпосереднього контакту зі знаряддям. Відстань між суміжними робочими органами  $B_p$  (рис.7.4) повинна забезпечити кришення шару між ними на глибину  $a_p$  не меншу, ніж агротехнічно задана. Це накладає умову

$$B_p = 2(a - a_1 - a_p) \cdot tg\varphi_2 + b_2.$$



**Рис. 7.4. Розрахункова схема до визначення відстані між суміжними робочими органами**

Висота несучого стояка (рис. 7.5) визначається з огляду на можливість пропуску розпушеного потоку ґрунту, об'єм якого у свою чергу залежить від швидкості руху агрегату.



**Рис. 7.5. Розрахункова схема до визначення відстані виносу опорного колеса та висоти несучого стояка**

З урахуванням необхідного запасу до 5 % за висотою, що враховано коефіцієнтом, висота несучого стояка дорівнюватиме

$$a_3 = 1,05 \cdot \frac{(V \cdot \text{ctg} \alpha)^2}{2g} + a_2 - a_1.$$

де  $V$  – поступальна швидкість агрегату.

Розташування опорного колеса визначається з умови знаходження пята контакту за межами лінії сколювання ґрунту (рис.7.5). У протилежному випадку не буде виконуватися вимога рівномірності обробітку за глибиною

$$L_2 = 1,05 \cdot a \cdot \text{tg}(\alpha + \varphi_2).$$

Необхідно відзначити, що розглянутий робочий орган має тенденцію до заглиблення. Тому ширину опорного колеса бажано приймати на рівні ширини захвату одного знаряддя.

#### **7.4. КІНЕМАТИКА ЧИЗЕЛЯ V-ПОДІБНОЇ ФОРМИ АКТИВНОЇ ДІЇ**

Особливість взаємодії з ґрунтом чизеля  $V$ -подібної форми полягає в диференціації шару ґрунту за розміром грудок: більш об'ємні виносяться на поверхню, а дрібні – просипаються у нижні горизонти. Це явище є досить корисним з точки зору боротьби з ерозією. Відомо, що інтенсифікувати цей процес можна наданням робочому органу примусових коливань [12, 13]. Але в різних ґрунтових умовах параметри коливань повинні бути різними. Тому робочий орган повинен мати можливість змінювати свій кінематичний режим. Найбільш ефективним, методом на наш погляд, може бути змінення довжини коромисла (рис. 7.6). Це дозволяє без змінення ексцентрика змінювати форму коливань, додавати, так звані, вторинні коливання, змінювати співвідношення робочого та холостого ходу.



**Рис. 7.6. Кінематична схема механізму приводу копача:**  
*1 – кривошип; 2 – шатун; 3 – коромисло*

Виконання коромисла з пружного матеріалу дозволяє забезпечити в певному діапазоні режим самоприспособлення механізму до конкретних ґрунтових умов, у тому числі і в межах одного коливання.

Спочатку розглянемо варіант з фіксованою довжиною коромисла. З розрахункової схеми видно, що траєкторію руху лемеша визначає миттєве положення шатуна 2 відносно горизонтальної осі  $X$ , яке характеризується кутом  $\beta$ . Візьмемо довільне положення шатуна, яке характеризується точкою  $A_1$  на траєкторії обертання. Друга точка  $B_1$  характерна тим, що завжди перебуває на постійній відстані від  $O_2$  і  $A_1$ . Тому її положення знаходимо як точку перетину двох дуг відповідно радіусів  $L$  та  $b$ .

Точка  $A_1$  визначається координатами:

$$Y_A = R \cdot \cos(\omega \cdot t);$$

$$X_A = -R \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

де  $X, Y$  – координати точок  $A$  і  $B$  відповідно до індексів;

$R$  – радіус кривошипа;

$\omega$  – кутова швидкість;

$t$  – поточний час.

Складемо систему рівнянь, що визначають координати точки  $B_I$ . Для коромисла координати цієї точки становлять:

$$X_B = L - b \cdot \sin(\alpha); \quad (7.2)$$

$$Y_B = b \cdot \cos(\alpha) - c, \quad (7.3)$$

де  $L$  – відстань між осями ексцентрика та коромисла;

$b$  – довжина коромисла;

$c$  – відстань від осі коромисла до осі  $X$ ;

$\alpha$  – кут відхилення коромисла.

Для шатуна:

$$X_B = X_A + L \cdot \cos(\beta) = -R \cdot \sin(\omega \cdot t) + L \cdot \cos(\beta); \quad (7.4)$$

$$Y_B = Y_A + L \cdot \sin(\beta) = R \cdot \cos(\omega \cdot t) + L \cdot \sin(\beta). \quad (7.5)$$

Підставивши рівняння (7.2) та (7.3) відповідно у вирази (7.4) та (7.5), отримаємо систему рівнянь, що зв'яже всі основні параметри копача:

$$\begin{aligned} L - b \cdot \sin(\alpha) &= -R \cdot \sin(\omega \cdot t) + L \cdot \cos(\beta); \\ b \cdot \cos(\alpha) - c &= R \cdot \cos(\omega \cdot t) + L \cdot \sin(\beta). \end{aligned} \quad (7.6)$$

З рівняння (7.6) отримуємо, що

$$\beta = \arcsin \frac{1}{L} \cdot (b \cdot \cos \alpha - c - R \cdot \cos \omega \cdot t).$$

Виконавши ряд математичних перетворень, отримаємо значення кута відхилення коромисла  $\alpha$

$$\alpha = \arcsin \frac{A \cdot D - Q \sqrt{D^2 - A^2 + Q^2}}{D^2 + Q^2},$$

де  $A = (L + R \cdot \sin(\omega \cdot t))^2 + (c + R \cdot \cos(\omega \cdot t))^2$ ;

$D = 2 \cdot b \cdot (L + R \cdot \sin(\omega \cdot t))$ ;

$Q = 2 \cdot b \cdot (c + R \cdot \cos(\omega \cdot t))$ .

Таким чином, траєкторія абсолютного руху носка леміша може бути описана системою рівнянь:

$$X_K = V_M - (L_I + R \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \cos \beta; \quad (7.7)$$

$$Y_K = (H - R \cdot (1 - \cos(\omega \cdot t))) \cdot \sin \beta. \quad (7.8)$$

Миттєвий кут атаки леміша дорівнюватиме

$$\alpha_i = \alpha_p - \beta. \quad (7.9)$$

## 8. ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ КУЛЬТИВАТОРНИХ ЛАП, ОСНАЩЕНИХ ЕЛЕМЕНТАМИ ЛОКАЛЬНОГО ЗМІЩЕННЯ

### 8.1. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ ЛАПИ ЗІ СЕРЕДОВИЩЕМ

#### 8.1.1. ПАРАМЕТРИ ПОТОКУ ҐРУНТУ

У загальній сукупності факторів, що впливають на знос металу, домінуючим є переміщення абразивних часток залежно від фізико-механічних властивостей ґрунту і матеріалу, з якого виготовлений робочий орган. Знаючи закономірності переміщення абразивних частинок і параметри потоку ґрунту, можливо вивчити їх взаємний вплив і встановити шляхи оптимізації знос.

Абразивні частки, що знаходяться в контакті одна з одною і поверхнею робочого органа, виконують складний рух переміщення кочення і обертання. Враховуючи малий розмір абразивних часток, переміщенням одна відносно іншої і обертанням можна знехтувати. Однак така характеристика потоку ґрунту, як відносна швидкість руху по поверхні робочого органа, є домінуючою.

Розглянемо культиваторну лапу як найбільш поширений ґрунтообробний робочий орган (рис. 8.1). Під час руху ґрунту по поверхні лапи на неї діють сили:  $G$  – сила ваги скиби, Н;  $D$  – динамічний тиск, Н;  $T$  – сила тертя, Н.

Інтенсивність зносу лапи в абразивному середовищі від тиску і шляху тертя представимо співвідношенням [14]

$$\Delta Q / \Delta S = K_u \cdot D_N, \quad (8.1)$$

де  $\Delta Q$  – знос, кг;

$\Delta S$  – шлях, який пройшла частка ґрунту, м;

$K_u$  – емпіричний коефіцієнт, що залежить від фізико-механічних властивостей ґрунту;

$D_N$  – нормальна складова динамічного тиску, Н.

Враховуючи, що відносна швидкість руху ґрунту по поверхні робочого органа рівна відношенню пройденого часткою шляху до часу, маємо

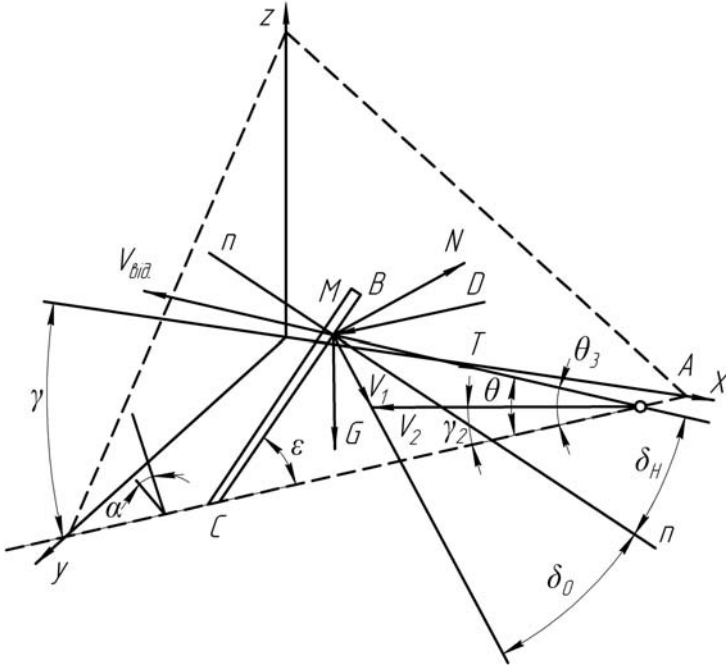
$$\Delta S / \Delta t = V_{відн.}$$

Вираз для визначення зносу (8.1) запишемо через відносну швидкість

$$\Delta Q / \Delta t = K_u \cdot D_N \cdot V_{відн}. \quad (8.2)$$

Нормальні складові сили тяжіння частки  $G_N$  і динамічного тиску  $D_N$  викликають нормальний тиск

$$F_D = G_N + D_N.$$



**Рис. 8.1.** Схема до визначення кінематичних параметрів потоку ґрунту

Відповідно до теореми про змінення кількості руху можна записати, що

$$F_D \Delta t = \Delta m_c \cdot V_{абс}, \quad (8.3)$$

де  $F_D$  – динамічний тиск ґрунту на клин, Н;

$\Delta m_c$  – маса ґрунту, що потрапляє на робочий орган в одиницю часу, кг;

$V_{абс}$  – абсолютна швидкість руху ґрунту під дією лапи, м/с.

Маса ґрунту, що потрапляє на робочий орган в одиницю часу, дорівнює

$$\Delta m_c / \Delta t = \rho \cdot a \cdot b \cdot V_{відн}, \quad (8.4)$$

де  $\rho$  – щільність ґрунту, кг/м<sup>3</sup>;

$a, b$  – товщина і ширина елемента скиби відповідно, м.

Під час переміщення робочого органа в ґрунті абразивні частки виконують складний рух: переносний (разом з робочим органом) і відносний (по поверхні робочого органа).

Модуль абсолютної швидкості дорівнює

$$V_{abc} = \sqrt{V^2 + V_{відн}^2 - 2 \cdot V \cdot V_{відн} \cdot \cos \theta},$$

де  $V$  – швидкість руху робочого органа, м/с;

$\theta$  – кут вступу ґрунту на поверхню робочого органа, град.

У першому наближенні, виходячи з нерозривності потоку ґрунту, можна вважати, що відносна швидкість руху рівна переносній  $V = V_{відн}$ , тоді

$$V_{abc} = V \sqrt{2 \cdot (1 - \cos \theta)}. \quad (8.5)$$

Підставивши вираз для абсолютної швидкості (8.5) у рівняння (8.3) з урахуванням формули (8.4), можна записати силу динамічного напору:

$$F_D = \rho \cdot a \cdot b \cdot V_{abc}^2 \cdot 2 (1 - \cos \theta). \quad (8.6)$$

З отриманого рівняння видно, що сила динамічного напору на поверхні лапи зростає зі збільшенням перетину скиби  $a \cdot b$ , швидкості руху  $V$  і знижується зі зменшенням кута вступу ґрунту на поверхню робочого органа.

Проекція сили нормального тиску на нормаль до площини лапи дорівнює

$$F_D = \rho \cdot a \cdot b \cdot 2V_{abc}^2 \cdot (1 - \cos \theta) \sin \gamma \sin \alpha.$$

Сила тяжіння елемента скиби ґрунту становить

$$G = mg = F_D = \rho \cdot a \cdot b \cdot \Delta x \cdot g,$$

де  $g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;

$\Delta x$  – довжина елемента скиби, м

Повна сила нормального тиску елемента скиби ґрунту на поверхню лапи буде дорівнювати

$$\begin{aligned} D_N &= \rho \cdot a \cdot b \cdot \Delta x \cdot g \cos \alpha + \rho \cdot a \cdot b \cdot 2V_{abc}^2 \cdot (1 - \cos \theta) \sin \gamma \sin \alpha = \\ &= \rho \cdot a \cdot b [\Delta x \cdot g \cos \alpha + 2V_{abc}^2 \cdot (1 - \cos \theta) \sin \gamma \sin \alpha]. \end{aligned} \quad (8.7)$$

У свою чергу силу тертя запишемо як

$$T = f_l \cdot \rho \cdot a \cdot b \cdot [\Delta x \cdot g \cos \alpha + 2V_{abc}^2 \cdot (1 - \cos \theta) \sin \gamma \sin \alpha],$$

де  $f_l$  – коефіцієнт тертя ґрунту по сталі.

Підставивши значення сили  $D_N$  з рівняння (8.7) у відношення (8.1), отримаємо знос, виражене через параметри скиби ґрунту і руху потоку ґрунту у функції шляху переміщення часток

$$\Delta Q / \Delta S = K_u \cdot f_l \cdot \rho \cdot a \cdot b \cdot [\Delta x \cdot g \cos \alpha + 2V_{abc}^2 \cdot (1 - \cos \theta) \sin \gamma \sin \alpha],$$

або у функції часу

$$\Delta Q / \Delta S = K_u \cdot f_1 \cdot \rho \cdot a \cdot b \cdot V_{a\bar{c}} \cdot [\Delta x \cdot g \cos \alpha + 2V_{a\bar{c}}^2 \cdot (1 - \cos \theta) \sin \gamma \sin \alpha],$$

Розглянемо тепер рух ґрунту по поверхні робочого органа за наявності елемента зміцнення  $BC$ , який встановлено під деяким кутом  $\varepsilon$  до леза (рис. 8.1).

У цьому випадку потік ґрунту, який проходить через точку  $A$  з відносною швидкістю  $V_{відн}$ , буде зустрічатися з елементом зміцнення  $BC$  у точці  $M$ . При цьому частина ґрунту буде відбиватися від елемента зміцнення. Приймемо, що кут відбивання  $\delta_0$  потоку ґрунту рівний куту набігання  $\delta_H$ , який відраховується від нормалі  $n$  до елемента зміцнення.

Кут між нормаллю  $n$  і лезом становитиме

$$\alpha_3 = 90^\circ - \varepsilon.$$

Кут набігання потоку ґрунту на елемент зміцнення запишемо як

$$\delta_H = \alpha_3 - \theta = 90^\circ - \varepsilon - \theta. \quad (8.8)$$

Тоді кут між вектором відносної швидкості  $V_{відн}$  і відбитою швидкістю  $V_1$  матиме вигляд

$$\delta_3 = 2\delta_H = 2\delta_0 = 2(90^\circ - \varepsilon - \theta).$$

Потік ґрунту, набігаючи на елемент зміцнення і відбиваючись від нього, втрачає швидкість, тому відбита швидкість  $V_1$  буде завжди менша за відносну  $V_{відн}$ .

Коли кут вступу  $\delta_H$  дорівнює нулю, а це можливо тоді, коли елемент зміцнення розташовується вздовж потоку ґрунту, швидкість відбивання  $V_1$  рівна швидкості потоку ґрунту, а при  $\delta_H = 0,5\pi$  ця швидкість мінімальна. Тому можливо записати наступне диференціальне рівняння, яке відображає зв'язок зміни швидкості відбитого потоку ґрунту і кута встановлення елементів зміцнення

$$dV_1 / d\delta_H = -K_C \delta_H, \quad (8.9)$$

де  $K_C$  – емпіричний коефіцієнт, що враховує фізико-механічні властивості і різнозернистість ґрунту. Його величина, відповідно до теорії А.М. Панченко [3], знаходиться в межах  $K_C = 0,06-0,75$ .

Інтегруючи рівняння (8.9), отримаємо залежність швидкості відбитого потоку від кута набігання:

$$dV_1 = -K_C \delta_H d\delta_H; \quad (8.10)$$

$$V_1 = 0,5 K_C \delta_H^2 + C. \quad (8.11)$$

Постійну інтегрування знаходимо з початкових умов при  $\delta_H = 0$ .

$$C = V_{відн}.$$

Відповідно

$$V_1 = V_{відн} - 0,5 K_C \delta_H^2.$$

З врахуванням рівняння (8.8)

$$V_1 = V_{\text{відн.}} - 0,5K_C \left( \frac{\pi}{2} - \varepsilon - \theta \right)^2. \quad (8.12)$$

З отриманого виразу видно, що модуль відбитої швидкості  $V_1$  залежить як від кута вступу ґрунту на поверхню лапи  $\delta_H$ , так і від кута встановлення елемента зміцнення  $\varepsilon$ . І якщо кут вступу ґрунту  $\theta$  стала величина для даного робочого органа, то змінення швидкості потоку залежить тільки від кута встановлення елементів зміцнення.

Швидкість відбитого потоку ґрунту  $V_1$  впливає на величину і напрямок потоку ґрунту, що вступає на поверхню лапи. Модуль відносної швидкості  $V_2$  при цьому буде дорівнювати

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 + V_{\text{відн.}}^2 - 2V_1 \cdot V_{\text{відн.}} \cdot \cos 2\delta_H}. \quad (8.13)$$

Підставляючи значення відбитої швидкості, отримаємо

$$V_2 = \sqrt{\left[ V_{\text{відн.}} - 0,5K_C \left( \frac{\pi}{2} - \varepsilon - \theta \right)^2 \right]^2 - V_{\text{відн.}}^2 - 2 \left[ V_{\text{відн.}} - 0,5K_C \left( \frac{\pi}{2} - \varepsilon - \theta \right)^2 \right] V_{\text{відн.}} \cdot \cos 2\delta_H}.$$

Оскільки швидкості потоку ґрунту  $V_1$ ,  $V_2$  і  $V_{\text{відн.}}$  відомі, то кут між відносними швидкостями становитиме

$$\theta_3 = \arccos \left( \frac{V_{\text{відн.}}^2 + V_2^2 - V_1^2}{2V_{\text{відн.}}V_1} \right).$$

У свою чергу кут вступу ґрунту за наявності елементів зміцнення дорівнюватиме

$$\gamma_2 = \theta - \theta_3.$$

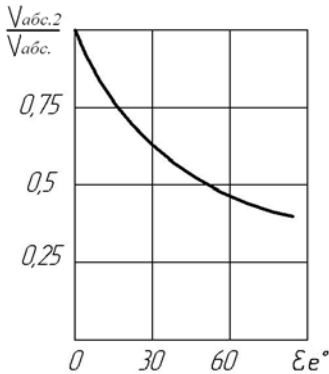
Абсолютна швидкість руху ґрунту за наявності елементів зміцнення буде визначатися за формулою

$$V_{\text{абс2}} = \sqrt{V_2^2 + V^2 - 2V_2V \cos \gamma_2} = \sqrt{V_2^2 + V^2 - 2V_2V \cos(\theta - \theta_3)}. \quad (8.14)$$

З отриманого виразу видно, що для визначення абсолютної швидкості руху ґрунту, за наявності елементів зміцнення, необхідно знати кут вступу ґрунту на лапу, коли ці елементи відсутні.

На рис. 8.2 наведено залежність відношення абсолютних швидкостей руху за наявності і відсутності елементів зміцнення у функції кута встановлення елементів зміцнення

$$V_{\text{абс2}} / V_{\text{абс}} = f(\varepsilon).$$



**Рис. 8.2. Залежність відношення абсолютних швидкостей у функції кута встановлення елементів зміцнення**

Як видно з графіків, із збільшенням кута встановлення елементів зміцнення величина цього відношення знижується, що свідчить про зниження інтенсивності зносу.

Таким чином, для зниження зносу культиваторної лапи необхідно визначити кут вступу ґрунту на поверхню лапи і провести польові випробування за наявності елементів зміцнення.

#### **8.1.2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСУ ЛЕЗА КУЛЬТИВАТОРНОЇ ЛАПИ ЗА НАЯВНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ЛОКАЛЬНОГО ЗМІЦНЕННЯ**

Встановлення елементів локального зміцнення на культиваторну лапу, виконане у вигляді смуг, змінює параметри потоку ґрунту, що призводить до його локалізації на лезі.

Під час дослідження зносу було визначено, що знос матеріалу на нескінченно малій ділянці леза пропорційне миттєвому значенню сили тертя на цій ділянці. Напрямок зносу збігається з напрямком потоку.

Візьмемо в довільно взятій точці на лезі нескінченно малу ділянку  $ds$  (рис. 8.3). Згідно з теорією подрібнення ґрунту А.М. Панченка [3], при переході до нескінченно малих ділянок на лезо буде діяти сила різання

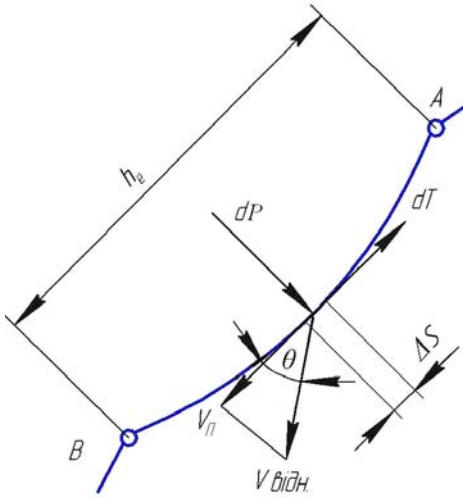
$$dP = C_{num} \cdot dF = C_{num} \cdot L \cdot ds,$$

де  $C_{num}$  – питома зчеплення часток ґрунту,  $\text{кН/м}^2$ ;

$F$  – площа поверхні, що сколюється,  $\text{м}^2$ ;

$L$  – довжина лінії сколювання в повздовжньому напрямку, м;

$ds$  – ділянка довжини леза, м.



**Рис. 8.3.** Розрахункова схема до визначення кривої зносу

Оскільки при оснащенні лапи елементами локального зміцнення нормальний тиск на поверхню лапи знижується, будемо розглядати знос самого леза. З розрахункової схеми (рис. 8.4) для кутів  $\alpha \leq 30^\circ$  справедливе співвідношення

$$L = \frac{a}{\cos(\alpha + \varphi_2)},$$

де  $a$  – глибина обробітку ґрунту, м;

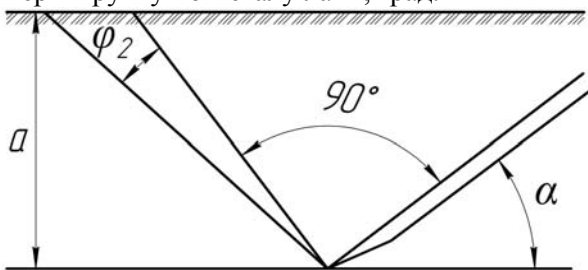
$\alpha$  – проекція кута нахилу крила лапи на напрямок руху, град;

$\varphi_2$  – кут внутрішнього тертя ґрунту, град.

Тоді величина сили тертя визначається за залежністю

$$dT = \frac{a \cdot C_{\text{num}} \cdot \text{tg} \varphi_1}{\cos(\alpha + \varphi_2)} \cdot ds,$$

де  $\varphi_1$  – кут тертя ґрунту по металу лапи, град.



**Рис. 8.4.** Розрахункова схема до визначення довжини лінії сколення

Отриманий вираз запишемо в такий спосіб, виділивши коефіцієнт  $K_n$ , який залежить від властивостей ґрунту,

$$dT = K_n \cdot ds,$$

$$\text{де } K_n = \frac{a \cdot C_{num} \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{\cos(\alpha + \varphi_2)}.$$

Під час роботи культиваторної лапи довжина дуги, внаслідок зносу, буде збільшуватися, що призведе до зниження сили різання і відповідно сили тертя. Тому можна записати диференціальне рівняння, яке свідчить про залежність швидкості зміни довжини дуги від сили тертя

$$-dT / ds = K_L \cdot K_n \cdot T, \quad (8.15)$$

де  $K_L$  – емпіричний коефіцієнт, що враховує зниження сили тертя внаслідок збільшення довжини дуги.

Розв'язком рівняння (8.15) буде залежність сили тертя від довжини дуги

$$T = C \cdot e^{-K_L \cdot K_n \cdot S}. \quad (8.16)$$

Довжину дуги можна представити у вигляді

$$S = V_n \cdot t, \quad (8.17)$$

де  $V_n$  – проекція відносної швидкості вступу потоку ґрунту на поверхню лапи, м/с.

$$V_n = V_{відн} \cdot \cos \theta. \quad (8.18)$$

Підставляючи рівняння (8.17) і (8.18) у залежність (8.16), отримаємо, що

$$T = C \cdot e^{-K_L \cdot K_n \cdot V_n \cdot \cos \theta \cdot t}. \quad (8.19)$$

Постійну інтегрування  $C$  знайдемо в момент часу  $t_o$ , коли напруження лапи дорівнюватиме нулю  $S_n = 0$ . Тоді постійна інтегрування рівна силі тертя на прямолінійній ділянці лапи  $C = T_o$ , а рівняння (8.19) набуде вигляду

$$T = T_o \cdot e^{-K_L \cdot K_n \cdot V_n \cdot \cos \theta \cdot t}. \quad (8.20)$$

Величина початкової сили тертя дорівнює

$$T_o = \frac{a \cdot C_{num} \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{\cos(\alpha + \varphi_2)} \cdot h_e, \quad (8.21)$$

де  $h_e$  – відстань між елементами зміцнення, м.

Час напруження лапи  $t$  можна визначити через площу, що обробляється, і робочу швидкість руху

$$t = \frac{Sa}{n_l \cdot b \cdot V}, \quad (8.22)$$

де  $Sa$  – напрацювання на агрегат, га;

$n_l$  – кількість лап на культиваторі, шт.;

$b$  – ширина захвату однієї лапи, м.

Величину зносу профілю зуба визначимо як

$$Q = K_u \cdot T, \quad (8.23)$$

де  $K_u$  – емпіричний коефіцієнт, що визначає абразивну стійкість матеріалу.

Підкреслимо, що коефіцієнт  $K_u$  у виразі (8.23) враховує тільки лінійний знос профілю зуба і відноситься до сили тертя. У цьому випадку знос  $Q$  буде відносною величиною, а розмірність  $K_u$  буде  $H^{-1}$ .

Остаточно знос профілю зуба, виражене через площу, що обробляється  $S_n$ , буде визначатися виразом

$$Q = K_u \cdot T = K_u \frac{a \cdot C_{num} \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{\cos(\alpha + \varphi_2)} \cdot h_e \cdot e^{-K_L \frac{a \cdot C_{num} \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{\cos(\alpha + \varphi_2)} V_n \cdot \cos \theta} \frac{Sa}{n_l \cdot b \cdot V}. \quad (8.24)$$

У подальшому проаналізуємо відношення зносу  $Q_n$  при напрацюванні  $S_n$  до початкового  $Q_o$ :  $Q_l = Q_n / Q_o$ .

### 8.1.3. АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ПРОФІЛЮ ЗУБА ПІД ДІЄЮ ЛОКАЛЬНОГО ЗНОСУ

Наявність елементів локального зміцнення на поверхні лапи призводить до утворення зубів на лезі. Утворення зубів докорінно змінює початкову форму леза, що тягне за собою зміну процесів, які відбуваються на лезі, зокрема схід рослинних решток. Тому вивчення геометричних параметрів профілю леза є важливою задачею.

Для опису форми леза візьмемо систему координат  $Oxy$ , вісь  $Oy$  якої спрямована перпендикулярно руху (рис 8.5).

Проаналізуємо положення дотичної до профілю зуба, яке визначалося в трьох точках  $i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). При цьому визначалась ордината у точці дотику і відрізка  $y$ , котрий дотична відсікає на осі  $Oy$ . Результати замірів наведено в табл. 8.1.

Із табл. 8.1. видно, що для однієї і тієї ж кривої відношення відрізка  $\tilde{y}$ , що відсікається на осі  $Oy$ , і ординати точки дотику  $y$  орієнтовно постійні

$$\tilde{y} / y = n_o. \quad (8.25)$$

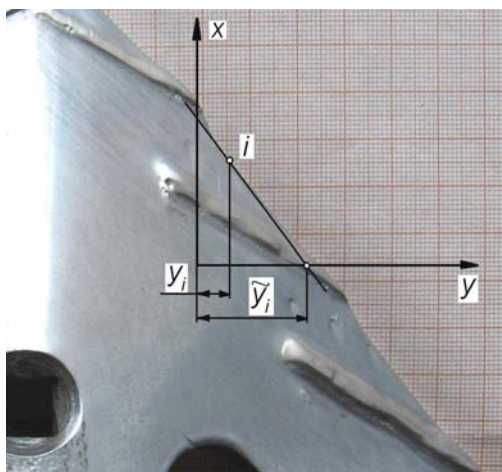


Рис. 8.5. Схема замірів

Таблиця 8.1

**Положення дотичної до профілю зуба**

№ точки	Напрацювання $S_H$ , га					
	75		225		300	
	$\tilde{y}$	$y$	$\tilde{y}$	$y$	$\tilde{y}$	$y$
<b>Кут нахилу елементів зміцнення <math>\varepsilon = 20^\circ</math></b>						
1	18,75	18,25	19,0	16,0	20,0	10,5
2	17,75	17,50	18,5	15,5	17,5	9,25
3	17,51	17,25	18,75	16,5	16,2	9,0
<b>Кут нахилу елементів зміцнення <math>\varepsilon = 25^\circ</math></b>						
1	12,5	11,25	12,75	10,5	11,75	5,5
2	12,0	10,25	12,25	10,25	10,0	4,25
3	12,25	10,5	12,5	10,7	6,25	3,8
<b>Кут нахилу елементів зміцнення <math>\varepsilon = 30^\circ</math></b>						
1	20,56	18,75	18,75	15,5	19	10
2	19,0	19,1	18,5	15,6	16,25	8,75
3	19,25	18,9	19,0	15,25	13,25	7,0

Тому диференціальне рівняння кривої профілю зуба будемо шукати в загальному виді.

Рівняння дотичної, що проходить через точку  $y, \tilde{x}$ , матиме вигляд

$$\tilde{y} - y = y'(\tilde{x} - x). \quad (8.26)$$

При  $\tilde{x} = 0$  рівняння (8.26) запишемо як

$$\tilde{y} - y = y'x. \quad (8.27)$$

Підставивши рівняння (8.25) у вираз (8.27), прийдемо до рівняння

$$y(1 - n_o) - xy' = 0; \quad (8.28)$$

Розв'яжемо диференціальне рівняння (8.28):

$$y(1 - n_o) - x \frac{dy}{dx} = 0;$$

$$\frac{dy}{y(1 - n_o)} = \frac{dx}{x};$$

$$\frac{1}{1 - n_o} \ln y = \ln x - \ln C,$$

де  $C$  – постійна інтегрування.

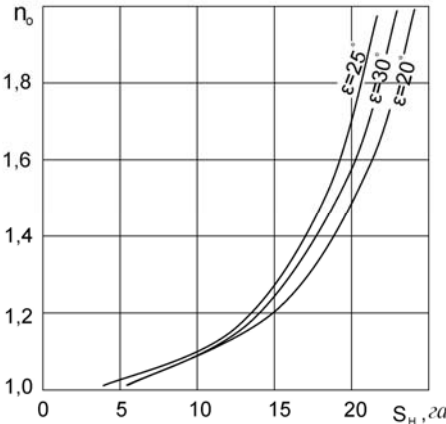
Перетворюємо отримане рівняння

$$x = Cy^{\frac{1}{1 - n_o}}.$$

Постійну інтегрування  $C$  визначимо, підставивши в кінцевий вираз координати  $x_0$  і  $y_0$

$$C = x_0 y_0^{(1 - n_o)}.$$

$$\text{Відповідно } x = x_0 y_0^{(1 - n_o)} y^{\frac{1}{1 - n_o}}.$$



**Рис. 8.6. Залежність параметра профілю зуба від напрацювання лапи**

На рис. 8.6. представлені графіки залежностей величини  $n_o$  від напрацювання лапи. Як бачимо, спочатку знос відбувається з невеликою швидкістю при формуванні зуба, а потім починає різко зростати.

Параметр кривої зуба  $n_o$  апроксимується залежністю

$$n_o = a \ln S_n + b. \quad (8.29)$$

Застосувавши метод найменших квадратів, обчислимо значення параметрів  $a = -0,77$  і  $b = 0,6$ . Тоді формула (8.29) набуде вигляду

$$n_o = -0,77 \ln S_n + 0,6. \quad (8.30)$$

Відповідно можна записати повністю вираз для визначення профілю зуба

$$x = x_0 y_0^{(1,6-0,77 \ln S_H)} y^{\frac{1}{1,6-0,77 \ln S_H}}. \quad (8.31)$$

Важливою характеристикою профілю зуба є положення дотичної, бо від цього залежить сходження бур'янів і рослинних решток з леза лапи. Особливо важливим цей фактор стає за значного напрацювання ґрунтообробних робочих органів.

Польові дослідження показують, що кут нахилу дотичної до леза у лап з встановленням елементів зміцнення (після напрацювання 20 га)  $\varepsilon = 20^\circ$  становить  $7^\circ$ , при  $\varepsilon = 25^\circ$  цей кут –  $6^\circ$ , а при  $\varepsilon = 30^\circ$  становить  $7^\circ$ .

Таким чином, кут нахилу дотичної до профілю зуба в середньому рівний  $6,5^\circ$  і практично не залежить від кута встановлення елементів зміцнення. Тому подальший вибір кута  $\varepsilon$  повинен відбуватися за найменшим зносом.

## 8.2. ГЕОМЕТРИЧНА МОДЕЛЬ ПОВЕРХНІ ЛАПИ

### 8.2.1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ МЕТОДИКИ

Будь-яку поверхню можливо утворити кінематичним способом, коли поверхня створюється рухом у просторі деякої лінії, яка називається *твірною*. У процесі побудови твірна лінія має спільну точку з іншою лінією – *напрямною*.

Для проектування робочих органів ґрунтообробних машин найбільш доцільним є лінійні поверхні, у яких твірна – пряма лінія. Ці поверхні можна розділити на дві групи: *розгортні* та *нерозгортні*.

Найбільш загальною характеристикою поверхней є їхня повна Гаусова кривизна, яка визначається в будь-якій точці за двома напрямками [15] з використанням формули

$$K = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2},$$

де  $R_1$  і  $R_2$  – радіуси кривизни поверхні за двома головними взаємно-перпендикулярними площинами.

Розгортні поверхні, відрізняються тим, що їхня Гаусова кривизна в будь-якій точці рівна нулю. Це пов'язано з тим, що один головний напрямок співпадає з прямолінійною твірною  $g$ . Оскільки радіус кривизни прямої лінії рівний нескінченності  $R_2 = \infty$ , то Гаусова кривизна в точці рівна нулю, тобто

$$K = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{\infty} = 0.$$

Ця умова призводить до того, що поверхні володіють двома диференційно-геометричними властивостями:

- Гаусова кривизна завжди постійна і дорівнює нулю;
- дотична площина торкається поверхні вздовж усієї твірної і не змінює свого положення в просторі при переміщенні точки дотику.

Завдяки цим властивостям розгортці поверхні можна поєднати з площиною без складок і розтягнень. За термічної обробки такі поверхні практично не піддаються жолобленню, що зберігає запроєктовану форму поверхні [16].

Друга властивість дозволяє отримати широкий спектр поверхонь, спряжених одна з одною. Так як дотична площина не змінює свого положення у разі переміщення точки дотику вздовж твірної, виникає можливість спряження окремих поверхонь по твірних.

Якщо твірні поверхні сходяться в одній точці, то поверхня перероджується в конічну, якщо паралельні – в циліндричну.

На рис. 8.7,*a* наведена розгортна поверхня з циліндра  $c$  і конуса  $k$ . Стиковка відбувається по твірній  $g_k$ , напрямна конічної поверхні  $L_k$  переходить в напрямну циліндричної поверхні  $L_c$  в точці 1, при цьому спряження кривих  $L_k$  і  $L_c$  може бути виконано за будь-яким порядком шорсткості.

Дотична площина  $\omega$  є дотичною одночасно і до конічної, і до циліндричної поверхонь. Усі нормалі, проведені з будь-якої точки твірної 1, 2, 3 і 4, колінеарні між собою  $\vec{n}_1 // \vec{n}_2 // \vec{n}_3 // \vec{n}_4$ , а верши-

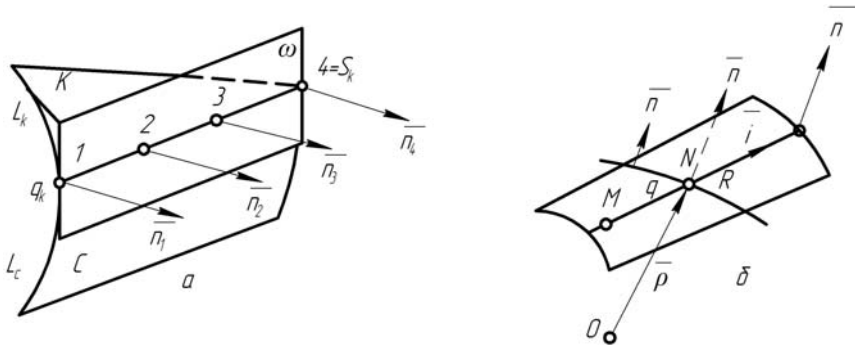
на конуса  $S_K$  належить площині  $\omega$  і співпадає в даному випадку з точкою:  $4 \equiv S_K$ .

Виберемо на розгортній поверхні будь-яку криву  $L$  (рис 8.7,б) з рівнянням

$$\vec{\rho} = \vec{\rho}(u).$$

У будь-якій точці цієї кривої задамо єдиний вектор  $\vec{l}$ , який буде виступати функцією параметра  $u$  вздовж кривої  $L$

$$\vec{l} = \vec{l}(u).$$



**Рис. 8.7. Утворення розгортної поверхні:**

*a* – складова поверхня; *б* – нескінченно малий елемент поверхні

Через точку  $i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) напрямної лінії до радіуса вектора  $\vec{\rho}(u)$  проведемо пряму, паралельну вектору  $\vec{l}(u)$  – рис. 8.7,а. У результаті отримаємо в просторі сім'ю прямих ліній одного параметра  $u$ . Назвемо їх твірними.

Позначимо  $MN = v$ . У цьому випадку радіус-вектор довільної точки  $E$  на довільній твірній  $u$  можна записати

$$\vec{r} = \vec{OM} = \vec{ON} + \vec{NM},$$

де  $\vec{OM} = \vec{\rho}(u)$ ,  $\vec{NM} = v\vec{l}(u)$ .

Насамкінець будемо мати, що

$$\vec{r} = \vec{\rho}(u) + v\vec{l}(u).$$

У результаті радіус-вектор довільної точки  $E$  на довільній твірній виражається як функція двох незалежних невідомих  $u$  та  $v$ .

Підрахуємо частинні похідні по параметрах:

$$r_u = \vec{\rho}(u) + v\vec{l}'(u), \quad r_v = \vec{l}(u);$$

$$[r_u, r_v] = [\rho', l] + v[\bar{l}', l].$$

Якщо поверхня буде розгортуватися, то повинна виконуватись умова колінеарності

$$[\rho', l] // [\bar{l}', l],$$

яка показує, що вздовж твірної  $g$  напрямком нормалі  $\bar{n}$  не змінюється (рис. 8.7,б), тому нескінченно малий елемент поверхні є площиною, яка описується рівнянням

$$Ax + By + Cz + D = 0,$$

де  $A, B, C, D$  – коефіцієнти, що є функціями параметра  $u$ .

Таким чином, ми маємо однопараметричну множину, яка є розгорткою поверхнею.

## 8.2.2. ГЕОМЕТРИЧНА МОДЕЛЬ КУЛЬТИВАТОРНОЇ ЛАПИ

Розташуємо в просторі систему координат  $Oxyz$  так, щоб вісь  $Oz$  була перпендикулярна дну борозни, а вісь  $Ox$  була спрямована протилежно напрямку руху. Тоді  $Oy$  розташується в горизонтальній площині (рис. 8.8).

За такого розташування системи координат носок лапи розміщується в її початку, а напрямна крива  $L$  – у горизонтальній площині і співпадає з лезом лапи.

У системі  $Oxyz$  визначимо пряму лінію  $g$ , яка буде твірною поверхні культиваторної лапи. Відповідно до рис. 8.7 запишемо положення проєкцій  $g$  у вигляді

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y} &= k\tilde{x} + l \\ \tilde{z} &= m\tilde{y} + n \end{aligned} \right\} \quad (8.32)$$

де  $k, l, m, n$  – параметри положення твірної, які в свою чергу є функціями деякого параметра  $u$ .

Поверхня буде розгортною, якщо буде виконуватися диференціальне рівняння [17]

$$l'/k' = n'/m',$$

де штрихами позначено перші похідні по параметру  $u$ .

Запишемо рівняння твірної (8.32) у функції координати  $\tilde{x}$

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y} &= k\tilde{x} + l \\ \tilde{z} &= mk\tilde{x} + ml + n \end{aligned} \right\} \quad (8.33)$$

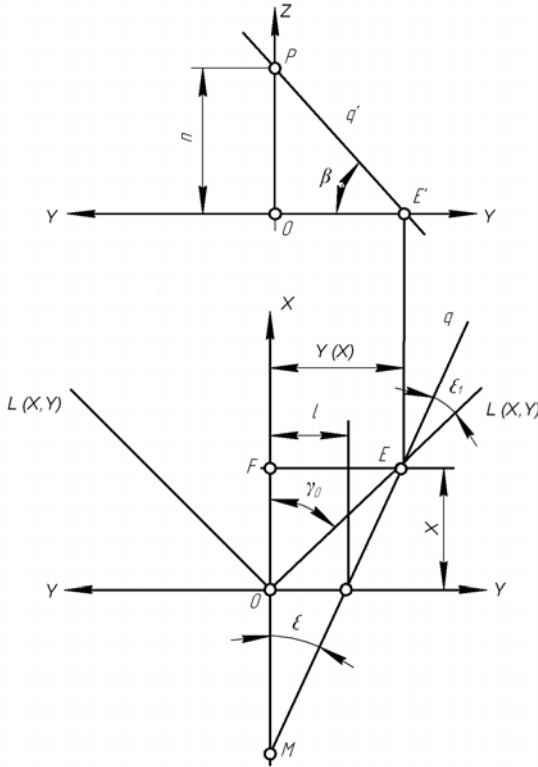
де  $k$  і  $mk$  – кутові коефіцієнти проєкцій твірних;

$l$  і  $ml + n$  – вільні члени рівнянь проєкцій твірних.

Для забезпечення розгортної поверхні культиваторної лапи на величини  $k$ ,  $mk$ ,  $l$  і  $ml + n$  накладаємо диференціальне рівняння [18, 19]

$$\frac{l'}{k'} = \frac{(ml + n)'}{(mk)'},$$

де позначено штрихами першу похідну по параметру  $u$ .



**Рис. 8.8.** Загальна схема утворення розгортної поверхні

Диференціюючи, маємо, що

$$\frac{l'}{k'} = \frac{m'l + ml' + n'}{m'k + mk'}. \quad (8.34)$$

Проводячи перетворення рівняння (8.34), одержимо диференціальне рівняння положення твірної  $g$

$$l'm'k - k'm'l - k'n' = 0.$$

Це рівняння можна розв'язати відносно одного з кутових коефіцієнтів.

Так, якщо заданий кутовий коефіцієнт  $k$ , то відсутній кутовий коефіцієнт визначиться таким диференціальним рівнянням відносно  $m$ :

$$m' - \frac{k' n'}{l' k - k' l} = 0. \quad (8.35)$$

А якщо заданий кутовий коефіцієнт  $m$ , то рівняння відносно невідомого  $k$  набуде вигляду

$$k' - k \frac{l' m'}{m' l + n'} = 0. \quad (8.36)$$

У кожному положенні твірна  $g$  має спільну точку  $E$  з напрямною кривою  $L$ .

Для культиваторної лапи напрямна крива  $L$  являє собою плоску лінію, що є контуром леза. Її рівняння буде мати вигляд

$$x = x(u), \quad y = y(u), \quad z = 0,$$

де параметр  $u$  має той самий сенс, що і в системі (8.32).

Прийmemo як параметр  $u$  координату  $x$ , що дає такі рівняння напрямної  $L$ :  $y = y(x)$ .

Виразимо величини, що входять до диференціальних рівнянь (8.35) і (8.36), через координати точки  $E$ .

Із геометричних міркувань кутові коефіцієнти дорівнюють:

$$m = \operatorname{tg} \beta; \quad k = \operatorname{tg} \varepsilon.$$

У свою чергу вільні члени рівнянь (8.32) визначимо з трикутників  $FME$  і  $OPE$ :

$$l = y - \operatorname{tg} \varepsilon \cdot x;$$

$$n = y \cdot \operatorname{tg} \beta.$$

Диференціюючи параметри положення твірної, маємо, що

$$k' = \operatorname{tg}' \varepsilon;$$

$$m' = \operatorname{tg}' \beta;$$

$$l' = y' - \operatorname{tg}' \varepsilon \cdot x - \operatorname{tg} \varepsilon;$$

$$n' = y' \operatorname{tg} \beta + y \operatorname{tg}' \beta.$$

Підставляючи отримані значення параметрів у рівняння (8.35) і (8.36), підходимо до диференціальних рівнянь положення твірних відносно кута нахилу проекції твірної на площині  $Oyz$

$$\operatorname{tg}' \beta - \operatorname{tg} \beta \frac{\operatorname{tg}' \varepsilon y'}{\operatorname{tg} \varepsilon \cdot y' - 2 \operatorname{tg}' \varepsilon \cdot y - \operatorname{tg}^2 \varepsilon} = 0 \quad (8.37)$$

і кута нахилу проекції твірної на площині  $Oxy$

$$tg' \varepsilon - tg \varepsilon \frac{tg' \beta \cdot y'}{tg \beta \cdot y + y'} + tg^2 \varepsilon \frac{tg' \beta}{tg \beta \cdot y + y'} = 0. \quad (8.38)$$

Оскільки напрямна крива для культиваторної лапи лежить у горизонтальній площині, то найбільш доречним буде диференціальне рівняння положення твірних (8.37). Загальний розв'язок рівняння такий:

$$tg \beta = C \cdot e^{-\int A dx},$$

$$\text{де } A = \frac{tg' \varepsilon \cdot y'}{tg \varepsilon \cdot y' - 2tg' \varepsilon \cdot y - tg^2 \varepsilon};$$

$C$  – постійна інтегрування, що визначається з початкових умов.

Для культиваторної лапи напрямною кривою, яка виступає лезом, найбільше підходить пряма лінія. Тоді її рівняння запишемо як

$$y = tg \gamma_0 \cdot x,$$

де  $\gamma_0$  – кут розхилу крил, град.

Позначимо функцію кута нахилу проекції твірної в плані  $tg \varepsilon = f(\varepsilon)$ , тоді диференціальне рівняння положення твірних буде мати вигляд

$$tg' \beta - tg \beta \frac{f'(\varepsilon) \cdot y'}{f(\varepsilon) \cdot y' - 2f'(\varepsilon) \cdot y - [f(\varepsilon)]^2} = 0. \quad (8.39)$$

Функцію кута нахилу твірної в горизонтальній площині представимо як

$$f(\varepsilon) = k_\varepsilon \cdot x,$$

і, підставляючи цей вираз у рівняння (8.39), запишемо диференціальне рівняння

$$tg' \beta - tg \beta \frac{k_\varepsilon \cdot tg \gamma}{x(1 - 2tg \gamma_0) - k_\varepsilon x^2} = 0. \quad (8.40)$$

Враховуючи характерний знос культиваторної лапи в зоні носка, який відбувається по кривій лінії, на базі загальної моделі розгортної поверхні можна запропонувати складову поверхню, параметри якої наведено на рис. 8.9.

Поверхня лапи складається з поверхні циліндра з осью лінією  $OO_1$  і площини  $BB_1C_1C$ , які спряжені по твірній циліндра  $BB_1$ . Циліндр має радіус  $r$ , а нормаль  $\vec{n}$  площини  $BB_1C_1C$ , проведена з точки  $N_o$ , має нахил до горизонтальної площини проекції під кутом  $\alpha_1$ , який визначається за залежністю:  $\alpha_1 = 90^\circ - \alpha$ , де  $\alpha$  – кут кришення, град.



Приєднавши рівняння кола до отриманого рівняння, запишемо систему для визначення координат точки  $B$

$$\left. \begin{aligned} x - r + y \cdot \operatorname{tg} \gamma_o &= 0 \\ (x - r)^2 + y^2 &= r^2 \end{aligned} \right\}. \quad (8.44)$$

У такий спосіб напрямною кривою циліндричної поверхні носка лапи буде дуга кола  $BOB'$

$$y = \sqrt{r^2 - (x - r)^2}, \quad (8.45)$$

твірною для циліндричної поверхні – лінія  $BB_1$ , яка визначається системою

$$\left. \begin{aligned} z &= \operatorname{tg} \delta x + x_e \\ y &= \sqrt{r^2 - (x - r)^2} \end{aligned} \right\}. \quad (8.46)$$

Рівняння крила лапи запишемо як рівняння площини, що проходить через три точки. Дві з них – точка переходу напрямною носка лапи  $B(x_e, y_e, z_e)$  і точка  $C(x_c, y_c, z_c)$ , тобто крайня точка леза лапи  $BC$ .

Ці точки лежать в горизонтальній площині  $Oxy$ . Третю точку  $N$  визначимо поки довільно.

Площина  $BB_1C_1C$ , обертаючись навколо прямої  $BC$ , може займати будь-яке положення і насамкінець буде визначатися координатами точки  $N$ .

Отже, зафіксувавши дві точки  $B$  та  $C$  і визначивши кут  $\alpha_1$  нахилу нормалі до горизонтальної площини проєкцій, зафіксуємо координати  $x_N, y_N$  і  $z_N$ .

Рівняння площини, що проходить через три точки  $B, C, N$ , має вигляд визначника:

$$\begin{vmatrix} x - x_e & y - y_e & z - z_e \\ x_C - x_e & y_C - y_e & z_C - z_e \\ x_N - x_e & y_N - y_e & z_N - z_e \end{vmatrix} = 0.$$

Розкладемо його на мінори і алгебраїчні доповнення:

$$\begin{aligned} (x - x_e) \begin{vmatrix} y_C - y_e & z_C - z_e \\ y_N - y_e & z_N - z_e \end{vmatrix} - (y - y_e) \begin{vmatrix} x_C - x_e & z_C - z_e \\ x_N - x_e & z_N - z_e \end{vmatrix} + \\ + (z - z_e) \begin{vmatrix} x_C - x_e & y_C - y_e \\ x_N - x_e & y_N - y_e \end{vmatrix} &= 0. \end{aligned}$$

Застосувавши скорочене позначення для мінорів, отримаємо рівняння площини у загальному вигляді:

$$Ax + By + Cz + D = 0; \quad (8.47)$$

$$\text{де } A = \begin{vmatrix} y_c - y_\epsilon & z_c - z_\epsilon \\ y_N - y_\epsilon & z_N - z_\epsilon \end{vmatrix}; \quad B = \begin{vmatrix} x_c - x_\epsilon & z_c - z_\epsilon \\ x_N - x_\epsilon & z_N - z_\epsilon \end{vmatrix}; \quad C = \begin{vmatrix} x_c - x_\epsilon & y_c - y_\epsilon \\ x_N - x_\epsilon & y_N - y_\epsilon \end{vmatrix};$$

$$D = By_\epsilon - Ax_\epsilon - Cz_\epsilon.$$

Кут нахилу нормалі  $\vec{n}$  до площини дна борозни дорівнює

$$\alpha_1 = 90^\circ - \alpha,$$

де  $\alpha$  – кут нахилу площини  $BB_1C_1C$ , який є кутом кришення.

Кут між двома площинами  $\alpha$ , відповідно до аналітичної геометрії [20, 21], визначається залежністю

$$\cos \alpha_1 = \frac{AA_2 + BB_2 + CC_2}{\sqrt{(A^2 + B_1^2 + C^2) \cdot (A_2^2 + B_2^2 + C_2^2)}}, \quad (8.48)$$

де  $A, B, C$  – коефіцієнти рівняння площини лапи;

$A_2, B_2, C_2$  – коефіцієнти іншої площини.

Представимо одну з площин як горизонтальну площину дна борозни. Тоді її рівняння набуде вигляду

$$C_2z = 0. \quad (8.49)$$

Так як площина (8.49) горизонтальна, то рівняння (8.48) запишемо як

$$\cos \alpha_1 = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (8.50)$$

Для того, щоб позбавитися від радикала в знаменнику, піднесемо отриманий вираз до квадрата

$$\cos^2 \alpha_1 = \frac{C^2}{A^2 + B^2 + C^2}.$$

Враховуючи рівняння площини (8.47), отриманий вираз можна записати у вигляді

$$\cos^2 \alpha = \frac{C^2}{\begin{vmatrix} y_c - y_\epsilon & z_c - z_\epsilon \\ y_N - y_\epsilon & z_N - z_\epsilon \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} x_c - x_\epsilon & z_c - z_\epsilon \\ x_N - x_\epsilon & z_N - z_\epsilon \end{vmatrix}^2 + C_1^2}.$$

Оскільки  $y_N$  та  $x_N$  можуть бути будь-якими позитивними числами, то, позначивши

$$y_c - y_\epsilon = R, \quad z_c - z_\epsilon = T, \quad y_N - y_\epsilon = K, \quad x_c - x_\epsilon = E, \quad x_N - x_\epsilon = F,$$

можна отриманий вираз розв'язати відносно  $z_N$ . Для цього приводимо отриманий вираз до виду

$$\begin{vmatrix} R & T \\ K & z \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} E & T \\ F & z \end{vmatrix}^2 + C^2 = \frac{C^2}{\cos^2 \alpha},$$

де  $z = z_N - z_6$ .

Проводячи перетворення, дійдемо квадратного рівняння

$$az^2 - 2bz + C^2 \left(1 - \frac{1}{\cos^2 \alpha}\right) = 0, \quad (8.51)$$

де  $a = R^2 + E^2$ ;

$b = T(R \cdot K + E \cdot F)$ .

У результаті відповідних перетворень координата  $z_N$  буде дорівнювати

$$z_N = z_6 \pm z_{1,2}, \quad (8.52)$$

де  $z_1$  і  $z_2$  – корені квадратного рівняння (8.51).

Твірні  $g$ , по яких будуть розташовуватися локальні елементи зміцнення, визначаються системою (8.33) і одночасно лежать в площині  $BB_1C_1C$ . Це положення накладає на параметри  $k$ ,  $l$ ,  $mk$ ,  $ml + n$  відповідний зв'язок. Для виявлення характеру цього зв'язку підставимо в рівняння площини (8.47) координати  $y$ ,  $z$  та знайдемо рівняння прямої (8.33)

$$A_x + B(kx + l) + C(mkx + ml + n) + D = 0.$$

За відомих значень коефіцієнтів площини  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , які визначаються координатами точок  $B$ ,  $C$ ,  $N$ , отримуємо рівняння відносно одного з параметрів прямої (8.33) як функцію координати  $x$ , наприклад відносно кутового коефіцієнта  $k$

$$k = - \frac{Ax - B \cdot l - C \cdot m \cdot l - l \cdot n - D}{(B + C \cdot m)}.$$

Кожна твірна  $g$  є дотичною до кривої  $R$  (рис. 8.7), котра є ребром повернення розгортної поверхні [15, 22] і має кут нахилу до горизонтальної площини  $\varepsilon$  (рис. 8.8).

Рівняння ребра повернення визначається системою рівнянь [18, 19]

$$\left. \begin{aligned} x_R &= - \frac{m'l + m'l + n'}{m'k + mk'} \\ R : y_R &= kx + l \\ z_R &= mkx + ml + n \end{aligned} \right\}.$$

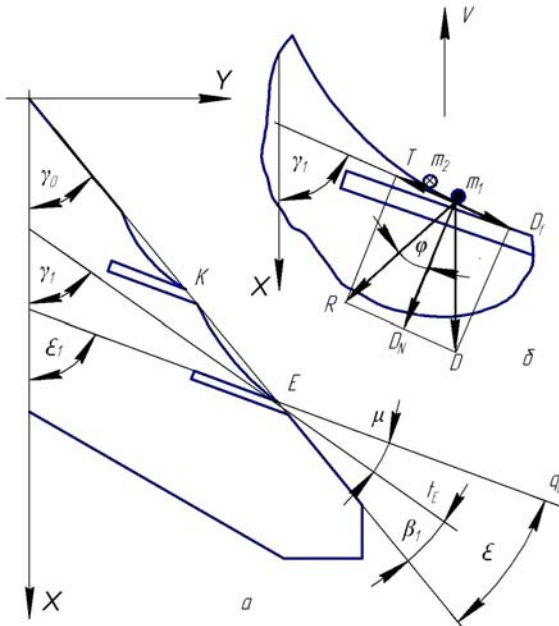
Після виведення залежності параметра  $k$  від  $x$   $k = k(x)$  необхідно перевірити, чи потрапляють координати ребра повер-

нення в область, що обмежена площиною крила  $BB_1C_1C$ . Якщо ця умова не виконується, необхідно змінити одну з функцій  $m$ ,  $l$  або  $n$  і повторити розрахунок.

### 8.2.3. ОБҐРУНТУВАННЯ КУТА НАХИЛУ НАПРЯМНОЇ ПОВЕРХНІ КУЛЬТИВАТОРНОЇ ЛАПИ

Прямолінійна напрямна, яка є початковою формою леза, розташовується під кутом  $\gamma_0$  до напрямку руху культиваторної лапи. У процесі роботи, у зв'язку з наявністю елементів локального зміцнення, на лезі утворюються зуби, що мають профіль  $KE$ , як це показано на рис. 8.10.

Під час роботи лапи внаслідок зносу кривизна зростає, тому із збільшенням напрацювання кут нахилу дотичної  $\gamma_1$  в точці  $E$  буде збільшуватися і в граничному значенні дорівнюватиме куту встановлення локального елемента зміцнення  $\gamma_1 = \varepsilon$  (рис. 8.10,а).



**Рис. 8.10. Схема обґрунтування кута нахилу напрямної:**  
*а* – кутові параметри зміцнюючих елементів і зуба; *б* – сили, що діють на частки при переміщенні по профілю зуба

Відповідно до схеми (рис. 8.10) запишемо відношення кутів між дотичною до профілю зуба  $\gamma_1$  і елементом зміцнення

$$\mu = \varepsilon - \gamma_1. \quad (8.53)$$

Тоді

$$\gamma_1 = \mu - \varepsilon; \quad (8.54)$$

$$\varepsilon_2 = \gamma_1 - \mu. \quad (8.55)$$

У свою чергу кут між твірною  $g_E$  і напрямною дорівнює

$$\varepsilon_1 = \varepsilon - \gamma_0,$$

звідки

$$\gamma_0 = \varepsilon - \varepsilon_1, \quad (8.56)$$

а враховуючи рівняння (8.55)

$$\gamma_0 = \gamma_1 - \mu - \varepsilon_1. \quad (8.57)$$

Лабораторно-польовими експериментами встановлено, що кут  $\beta_1$  у режимі, що встановився, дорівнює різниці між кутом локального елемента зміцнення  $\varepsilon_2$  і кутом  $\gamma_1$  нахилу дотичної  $t_E$  в точці  $E$ ;  $\beta_1 = \gamma_1 - \gamma_0 = 7^\circ$ .

Тому для обґрунтування кута нахилу напрямної  $\gamma_0$  необхідно перш за все встановити граничне значення  $\gamma_1$ , що забезпечує рух по профілю зуба рослинних решток, коренів рослин або ґрунту.

Обґрунтування кута  $\gamma_0$  необхідно розбити на два етапи:

1. Початкова робота лапи, коли зуб ще не сформований. У цьому випадку  $\beta_1 = 0$  та  $\gamma_1 = \gamma_0$ .

Відповідно до численних досліджень [23–25] кут  $\gamma_0$  вибирається з умови різання з ковзанням бур'янів, тобто  $\gamma = 90^\circ - \varphi_3$ , де  $\varphi_3$  – кут тертя бур'яну по металу, град.

2. Другий етап роботи полягає в тому, що починає утворюватися профіль зуба, у якого дотична в точці  $E$  розташовується під кутом  $\gamma_1$ , що відрізняється від кута нахилу напрямної до напрямку руху. По мірі формування профілю зуба кут  $\gamma_1$  збільшується і досягає за встановленого режиму значення величини, яке рівне значенню кута елемента зміцнення  $\varepsilon_2$ .

Для визначення граничної величини кута  $\gamma_1$  прийемо такі припущення: бур'яни (частка ґрунту) знаходяться в однорідному рухомому середовищі, яким виступає потік ґрунту; маса бур'янів (частки ґрунту) зосереджена в точці.

Під час руху лапи в ґрунті на будь-яку частку, будь то рослинний решток, корінь рослини або агрегат ґрунту, що розташований на профілі зуба, будуть діяти такі сили:

$$\begin{aligned} & \text{сила динамічного напору, } H \\ & D = \rho s v^2, \end{aligned} \quad (8.58)$$

яка розкладається на дотичну складову

$$D_t = \rho s v^2 \cos^2 \gamma_1 \quad (8.59)$$

і нормальну складову

$$D_N = \rho s v^2 \sin^2 \gamma_1;$$

*сила тертя*

$$T = f D_N = f \rho s v^2 \sin^2 \gamma_1, \quad (8.60)$$

де  $\rho$  – щільність ґрунту, кг/м<sup>3</sup>;

$s$  – поперечний переріз частинки, м<sup>2</sup>;

$v$  – швидкість руху робочого органа, м/с;

$f$  – коефіцієнт тертя.

Умова руху частинки по профілю зуба буде виглядати так: якщо сила дотичної складової динамічного напору вища за силу тертя  $T$ , то  $D_t \geq T$ , або, підставивши значення сил, одержимо, що

$$\rho s v^2 \cos^2 \gamma_1 \geq f \rho s v^2 \sin^2 \gamma_1.$$

Скоротивши цей вираз на  $\rho s v^2$ , отримаємо залежність, в якій присутні тільки кут нахилу дотичної  $\gamma_1$  і коефіцієнт тертя:  $\cos^2 \gamma_1 \geq f \sin^2 \gamma_1$ .

Після перетворення переходимо до виразу

$$\operatorname{tg} \gamma_1 \leq \sqrt{1/f}. \quad (8.61)$$

Досить вагомим є вибір коефіцієнта тертя  $f$ . Для його вибору розглянемо рух двох часток  $m_1$  і  $m_2$  по профілю зуба  $KE$  відповідно до схеми (рис. 8.10,б).

Припустимо, що часткою  $m_1$ , яка рухається попереду частки  $m_2$ , є рослинний решток чи корінь рослини з кутом тертя по сталі  $\varphi_3$  і коефіцієнтом тертя  $f_3$ . Тоді іншою часткою буде частка ґрунту  $m_2$  – з кутом тертя по сталі  $\varphi_1$  і коефіцієнтом тертя  $f_1$ .

Можливі два випадки.

*Випадок 1.* Кут тертя рослинної рештки чи кореня рослини по металу  $\varphi_3$  і відповідно коефіцієнт тертя  $f_3$  більші, ніж кут тертя ґрунту по металу  $\varphi_1$ .

Тоді  $\varphi_3 > \varphi_1$  і  $f_3 > f_1$ , що призводить до перевищення сили тертя бур'янів над силою тертя ґрунту по сталі. При цьому на бур'яни буде діяти сила динамічного напору, що визначається за формулою (8.59). У цьому випадку сила динамічного напору  $D_{il}$  повинна бути вища за силу тертя ґрунту по сталі  $D_{il} \geq T_3$ . Тому для забезпечення руху бур'янів умова (8.61) має бути такою:

$$\gamma_1 \leq \operatorname{arctg}(\sqrt{1/f_{3\max}}), \quad (8.62)$$

де  $f_{3\max}$  – максимальний коефіцієнт тертя бур'янів по металу.

*Випадок 2.* Кут тертя бур'янів по металу  $\varphi_3$  і коефіцієнт тертя  $f_3$  менші, ніж ці показники у кута тертя ґрунту по металу  $\varphi_1$ . Тоді  $\varphi_3 < \varphi_1$  та  $f_3 < f_1$  і відповідно сила тертя ґрунту по сталі перевищує силу тертя рослинних решток по сталі  $T_1 > T_3$ . Такі значення кутів тертя призводять до того, що силу динамічного напору буде сприймати частка ґрунту, при цьому  $D_{il} \geq T_1$ . У цьому випадку умова, що забезпечує рух бур'янів і ґрунту, повинна виглядати як

$$\gamma_1 \leq \arctg(\sqrt{1/f_{1max}}), \quad (8.63)$$

де  $f_{1max}$  – максимальний коефіцієнт тертя ґрунту по металу.

Для універсальної культиваторної лапи необхідно приймати той коефіцієнт тертя, який більший за значенням.

Розрахувавши кут  $\gamma_0$  за виразом

$$\gamma_0 = \gamma_1 - 7^\circ, \quad (8.64)$$

знайдемо кут нахилу напрямної.

Таблиця 8.2

**Межі зміни кута тертя ґрунту по сталі**

№ п/п	Тип ґрунту	Кут тертя ґрунту по сталі $\varphi_1$ , град	Коефіцієнт тертя ґрунту по сталі $f_1$
1	Супіщаний	26°30'–35°	0,499–0,7
2	Легко-і середньо-суглинистий	19°30'–26°30'	0,354–0,499
3	Важкі суглинки і глини	31°–42°	0,601–0,9

У табл. 8.2 представлені значення кутів тертя ґрунту по сталі [3, 26], які свідчать про те, що найбільший кут тертя мають важкі суглинки і глини –  $\varphi_1 = 42^\circ$ .

Таблиця 8.3

**Межі змінення кута нахилу напрямної залежно від типу ґрунту, град**

Тип ґрунту	Кут тертя ґрунту по сталі $\varphi_1$	Максимальний кут тертя рослинних решток по сталі $\varphi_3$	Кут нахилу твірної $\gamma_0$
Супіщаний	26°30'–35°	37°	27°
Легко- і середньо-суглинистий	19°30'–26°30'	37°	27°
Важкі суглинки і глини	31°–42°	37°	31°

Максимальний кут тертя коренів рослин по сталі, згідно з дослідженнями [26, 27], дорівнює  $\varphi_3 = 44^\circ 40'$ .

Базуючись на наведених даних та відповідно до формули (8.64), у табл. 8.3 наведено значення кутів нахилу твірної.

Мінімальним кутом нахилу напрямної є кут  $27^\circ$ , котрий потрібно приймати при розробці конструкції лапи.

#### 8.2.4. ОБҐРУНТУВАННЯ РАДІУСА КОЛА НАПРЯМНОЇ КРИВОЇ НОСКА ЛАПИ

Лезо традиційної культиваторної лапи являє собою симетричний клин, направлений лезом уперед. У процесі роботи носок лапи спрацьовується в першу чергу і стає заокругленим, після чого інтенсивність зносу дещо знижується. Це підтверджує те, що на гострому носку лапи нормальний тиск ґрунту значно вищий, ніж на заокругленому, тому є доцільним виконати лезо лапи, що складається з дуги кола і прямих ліній, спряжених в точках дотику.

Для обґрунтування радіуса кола розглянемо контактну теорію пружності відповідно до результатів досліджень [28–31].

У разі стиску ґрунту деформатором, яким виступає лезо лапи, по ділянці контакту, функція напруження  $\sigma(y)$  буде виражена рівнянням [28]:

$$\sigma(y) = \frac{P + Aa^2 - 2Ay^2}{\pi\sqrt{a^2 - y^2}}, \quad (8.65)$$

де  $P$  – рівнодійна зовнішніх сил, Н;

$a$  – півширина контакту, м;

$A$  – деяка постійна, що залежить від геометричної форми тіл і їх пружних постійних  $w_1$  та  $w_2$ .

Стала  $A$  визначається залежністю

$$A = \frac{f_1''(0) + f_2''(0)}{2(w_1 + w_2)}, \quad (8.66)$$

$$\text{де } w_1 = \frac{2(1 - \mu_1^2)}{\pi E_1} \quad \text{і} \quad w_2 = \frac{2(1 - \mu_2^2)}{\pi E_2}. \quad (8.67)$$

У рівняннях (8.66) і (8.67) прийняті такі позначення:

$f_1''(0)$  і  $f_2''(0)$  – другі похідні від рівнянь профілів поперечного перетину взаємодіючих тіл у точці симетрії ділянки контакту ( $y = 0$ );

$\mu_1$  і  $\mu_2$  – коефіцієнти Пуассона відповідно сталі і ґрунту, відн. од.;

$E_1$  і  $E_2$  – модулі пружності відповідно сталі і ґрунту, кг/с<sup>2</sup>м.

Рівняння профілю ґрунту і площини контакту при  $b/2$  можна представити у вигляді напівпростору з постійною ординатою:  $z = f_2(y) = \text{const}$ . Тому  $f_2''(0) = 0$ . У свою чергу при взаємодії культиваторної лапи і ґрунту можна вважати, що лапа порівняно з ґрунтом абсолютно жорстка, оскільки виготовлена зі сталі, відповідно  $E_1 = \infty$ . Тоді  $w_1 = 0$ , а рівняння (8.66) буде мати вигляд

$$A = f_1''(0) / 2w_2.$$

Так як коефіцієнт Пуассона для ґрунту малий, то величина  $w_2$  становитиме

$$w_2 = \frac{2}{3,14 \cdot E_2},$$

де модуль пружності  $E_2$  знаходиться в межах  $E_2 = (4,26-5,44) \cdot 10^6$  кг/с<sup>2</sup>м [31, 32], відповідно  $w_2 = (0,15-0,12) \cdot 10^{-6}$  с<sup>2</sup>·м/кг.

Лезо лапи складається з двох ділянок – дуги кола і клина, тому розглянемо деформацію ґрунту кожною ділянкою окремо.

Кругла ділянка носка леза описується рівнянням кола, центр якого лежить на осі симетрії  $Ox$

$$f_1 = (x - r)^2 + y^2 = 0, \quad (8.68)$$

де  $r$  – радіус кола носка лапи, м.

Диференціюючи рівняння (8.68) як функцію, що задана неявно, маємо

$$x_y' (x - r) + y = 0,$$

звідки перша похідна рівна

$$x_y' = -\frac{y}{x - r}.$$

Диференціюючи вдруге, отримаємо, що

$$x_y' = -\frac{x + r + y \cdot x_y'}{(x - r)^2}.$$

Підставляючи в отриманий вираз значення першої похідної і враховуючи, що  $x = \sqrt{r^2 - y^2} + r$ , у кінцевому випадку будемо мати вираз для визначення другої похідної

$$f_1'' = -\frac{r^2}{\sqrt{(r^2 - y^2)^3}},$$

який при  $y = 0$  дорівнює

$$f_1''(0) = -1 / r. \quad (8.69)$$

Представимо рівнодійну  $P$  як добуток питомого опору ґрунту при обробітку  $k_y$  на ширину захвату лапи

$$P = k_y \cdot b.$$

Питомий тиск ґрунту під час обробітку  $k_y$  знаходиться в межах  $k_y = 4-6 \text{ Н/см}^2$  [33], або  $k_y = (4-6) \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$ , а ширина культиваторних лап рівна 270 і 330 мм. Тому будемо мати певні межі зміни рівнодійної:  $P = (1,08-1,92) \cdot 10^4 \text{ Н}$ . У подальшому будемо орієнтуватися на більше значення рівнодійної.

Розв'язуючи сумісно вирази (8.67), (8.69), отримаємо рівняння розподілення напружень у ґрунті в такому вигляді:

$$\sigma_1(y) = \frac{2P}{\pi a} \sqrt{a^2 - y^2}, \quad (8.70)$$

де  $a = \sqrt{2Pr w_2}$ .

Підставивши числове значення в залежність (8.70), отримаємо функцію розподілення напружень, яке викликає носок лапи для заданих умов

$$\begin{aligned} \sigma_1(y) &= \frac{2 \cdot 1,92 \cdot 10^4}{3,14 \cdot 0,076 \cdot r} \sqrt{0,076 \cdot r^2 - y^2} = \\ &= \frac{1,6 \cdot 10^4}{r} \sqrt{0,076 \cdot r^2 - y^2}. \end{aligned} \quad (8.71)$$

Як видно з отриманого рівняння, напруження в ґрунті при  $y = b / 2$  рівні нулю  $\sigma_1(b / 2) = 0$ , а при  $y = 0$  дорівнюватимуть своєму максимальному значенню:  $\sigma_1(0) = \sigma_{1max} = 0,451 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ .

Лінійна частина леза описується рівнянням  $x = ctg \gamma_0 |y|$ .

У цьому випадку розподілення напружень у ґрунті буде описуватися залежністю

$$\sigma_2(y) = \frac{2P}{\pi a} \ln \frac{a - \sqrt{a^2 - y^2}}{|y|}, \quad (8.72)$$

де  $a = \pi \cdot P \cdot w_2 / 2ctg \gamma_0$ .

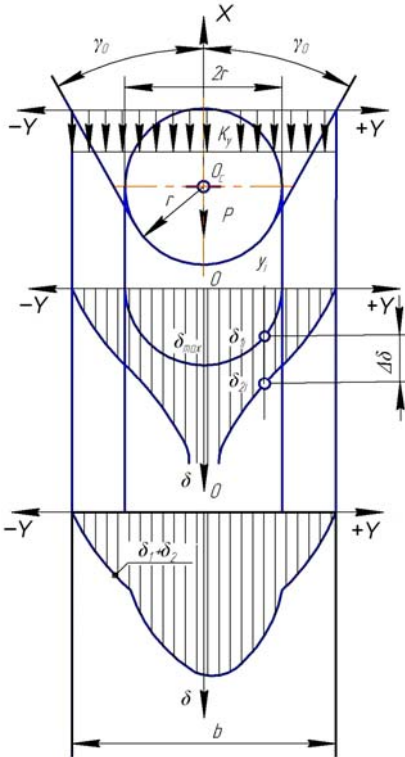
Підставляючи числові значення в рівняння (8.72), отримаємо вираз, що описує функцію напружень для лінійної ділянки леза лапи

$$\sigma_2(y) = 2,72 \cdot 10^6 \cdot ctg \gamma_0 \cdot \ln \frac{\frac{0,45 \cdot 10^{-2}}{ctg \gamma_0} - \sqrt{\left(\frac{0,45 \cdot 10^{-2}}{ctg \gamma_0}\right)^2 - y^2}}{|y|}. \quad (8.73)$$

При  $y = 0$  напруження в ґрунті перед носком лапи рівні нескінченності, тобто  $\sigma_2(0) = \sigma_{2max} = \infty$ , того часу як на кінцях лапи, коли  $y = b/2$ , вони дорівнюють нулю, або  $\sigma_2(b/2) = 0$ .

Застосувавши принцип суперпозиції, можливо скласти епюру сумарних напружень, що визначається сумою напружень від дуги кола і лінійної ділянки леза

$$\sigma(y) = \sigma_1(y) + \sigma_2(y).$$



**Рис. 8.11.** Епюри напружень в ґрунті, що викликаються різними ділянками леза лапи

Як видно з наведених виразів (8.71), (8.73), напруження в ґрунті, які викликає лезо лапи, залежать від радіуса носка лапи і кута нахилу лінійної частини і описуються формулою

$$\Delta\sigma(y) = \sigma_1(y) - \sigma_2(y) = \frac{1,6 \cdot 10^4}{r} \sqrt{0,076 \cdot r^2 - y^2} - \frac{0,45 \cdot 10^{-2}}{ctg\gamma_0} - \sqrt{\left(\frac{0,45 \cdot 10^{-2}}{ctg\gamma_0}\right)^2 - y^2} \quad (8.74)$$

$$- 2,72 \cdot 10^6 \cdot ctg\gamma_0 \cdot \ln \frac{|y|}{|y|}$$

Прирівнявши різницю напружень нулю, одержимо, що  $\Delta\sigma(y) = \sigma_1(y) - \sigma_2(y) = 0$ .

Графіки залежності напружень у ґрунті для різних ділянок леза лапи наведено на рис. 8.11.

Запишемо різницю напружень для наведених ділянок леза та отримаємо рівність напружень у ґрунті на межі, що викликають різні ділянки леза. Звідки

$$\frac{1,6 \cdot 10^4}{r} \sqrt{0,076 \cdot r^2 - y^2} =$$

$$= 2,72 \cdot 10^6 \cdot ctg \gamma_0 \cdot \ln \frac{0,45 \cdot 10^{-2}}{ctg \gamma_0} - \sqrt{\left(\frac{0,45 \cdot 10^{-2}}{ctg \gamma_0}\right)^2 - y^2}.$$

Отриманий вираз встановлює залежність між радіусом носка лапи  $r$  та кутом нахилу  $\gamma_0$  лінійної ділянки леза.

#### 8.2.5. ОБҐРУНТУВАННЯ КУТА ВСТАНОВЛЕННЯ КРИЛА ЛАПИ ДО ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ПЛОЩИНИ

Культиваторна лапа є універсальним знаряддям, тому кут  $\alpha$  постановки площини крила лапи повинен: по-перше, забезпечити якісне кришення ґрунту, оскільки за передпосівного обробітку ґрунту культиваторна лапа є основним робочим органом; по-друге? сприяти руху ґрунту по поверхні крила лап без згруджування, яке призведе до інтенсивного обгортання лапи рослинними рештками.

Розглянемо величину кута  $\alpha$ , базуючись на останніх розробках теорії розпушення ґрунту.

Сколювання ґрунту відбувається по тріщинах  $AB$  під кутом  $\psi$  до лінії горизонту (рис. 8.12). Це відбувається тоді, коли напруження в тріщині  $\sigma_1$  буде вище межі міцності на зсув.

Сучасні напрацювання з теорії розпушення ґрунту [3, 34] встановлюють зв'язок між напруженням  $\sigma_1$  і кутом постановки клина  $\alpha$

$$\sigma_1 = \frac{T \cdot \sin \varphi_2}{d_z \cdot S_i \cdot \cos(\alpha + \varphi_2)},$$

де  $T$  – сила зчеплення часток, Н;

$\varphi_2$  – кут внутрішнього тертя ґрунту, град;

$d_z$  – товщина стружки, м;

$S_i$  – переміщення клина в ґрунті до появи наступної тріщини, м.

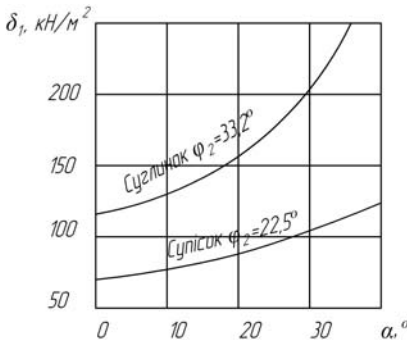


Середнє переміщення клина в ґрунті до утворення наступної тріщини в середньому дорівнює  $S_i = 0,025$  м [33], товщина стружки, що зрізується, – максимальній глибині обробітку  $d_z = a$ , тоді напруження  $\sigma_1$  становитиме

$$\sigma_1 = \frac{2,4 \cdot b \cdot \sin \varphi_2}{\sin \gamma_o \cdot S_i \cdot \cos(\alpha + \varphi_2)}. \quad (8.79)$$

На рис. 8.13 наведені напруження в ґрунті, які отримані за залежністю (8.79). Як випливає з графіків, із збільшенням кута встановлення крила лапи до горизонту напруження в ґрунті по лінії тріщини збільшується, причому це збільшення суттєво залежить від типу ґрунту. Наприклад, при  $\alpha = 20^\circ$  для супіщаного ґрунту з кутом внутрішнього тертя  $\varphi_2 = 22,5^\circ$  напруження  $\sigma_1 = 89,4$  кН/м<sup>2</sup>, а для суглинистого ґрунту  $\sigma_1 = 159,5$  кН/м<sup>2</sup>, що майже в два рази більше.

Цікавим є той факт, що при куті  $\alpha = 0$  у ґрунті все одно будуть виникати напруження  $\sigma_1$ , однак їх значення невеликі порівняно з показником межі міцності на зсув  $[\sigma_{зсув}] = 1,2 \cdot 10^4$  Н/м<sup>2</sup> [25], що призведе до утворення тріщини і, як наслідок, до значного брилоутворення.



**Рис. 8.13. Графіки напружень у ґрунті залежно від кута  $\alpha$  і типу ґрунту**

Граничне напруження зсуву дорівнює  $[\sigma_{зсув}] = 102$  Н/м<sup>2</sup> [25], тому стійкому тріщиноутворенню і кришенню буде відповідати кут  $\alpha = 26$ – $28^\circ$ , що підтверджується експериментальними даними [35].

Під час обґрунтування кута  $\alpha$ , з огляду на забезпечення руху ґрунту, розглянемо рух частки ґрунту, прийнявши такі допущення:

- ґрунт є однорідним середовищем;
- маса частки зосереджена в точці.

Після сколення частка ґрунту потрапляє на площину крила культиваторної лапи і рухається по осі  $A_\eta$  зі швидкістю  $v_\eta$  (рис. 8.12).

Силою, що викликає рух точки, буде сила динамічного напору

$$D_{\eta} = \rho \cdot S \cdot v_{\eta}^2,$$

де  $\rho$  – щільність ґрунту,  $\text{кг/м}^3$ ;

$S$  – площа поперечного перетину частки,  $\text{м}^2$ .

Силами, що перешкоджають руху частки, виступають:

сила тертя  $T = f_1 \cdot P_N$ ;

сила прилипання  $U = P_o \cdot S_k$ ,

де  $P_N$  – нормальна складова усіх сил, що діють на частку ґрунту при русі по площині крила лапи, Н;

$f_1$  – коефіцієнт тертя ґрунту по сталі, відн. од.;

$P_o$  – питома сила прилипання ґрунту до сталі,  $\text{Н/м}^2$ ;

$S_k$  – площа контакту частки ґрунту і лапи,  $\text{м}^2$ .

Нормальна складова усіх сил, що діють на частку ґрунту, є сумою нормальної складової від сили тяжіння частки

$$P_{N1} = m \cdot g \cdot \cos \alpha$$

і сили тяжіння ґрунту, який знаходиться над часткою,

$$P_{N2} = s \cdot \rho \cdot \frac{a}{\cos \alpha},$$

де  $g$  – прискорення сили тяжіння,  $\text{м/с}^2$ .

Отже, силу тертя можна записати як

$$T = f_1 \cdot P_N = f_1 (P_{N1} + P_{N2}) = f_1 \left( m \cdot g \cdot \cos \alpha + s \cdot \rho \cdot \frac{a}{\cos \alpha} \right).$$

Окрім сил тертя  $T$  і прилипання  $U$ , руху частки буде перешкоджати тангенціальна складова сили тяжіння

$$P_{\eta} = m \cdot g \cdot \sin \alpha.$$

На основі діючих сил складемо диференціальне рівняння руху частки відносно осі  $A_{\eta}$

$$m \frac{d^2 \eta}{dt^2} = D_{\eta} - T - P_{\eta} - U,$$

де  $m$  – маса частки ґрунту,  $\text{кг}$ .

Підставивши значення сил  $D_{\eta}$ ,  $T$ ,  $U$ ,  $P_{\eta}$  і представивши ліву частину як похідну складної функції

$$\frac{d^2 \eta}{dt^2} = \frac{dv_{\eta}}{d\eta} \cdot \frac{d\eta}{dt} = \frac{dv_{\eta}}{d\eta} \cdot v_{\eta},$$

отримаємо диференціальне рівняння

$$m v_{\eta} \frac{dv_{\eta}}{d\eta} = \rho \cdot S \cdot v^2 - f_1 \left( m \cdot g \cdot \cos \alpha + s \cdot \rho \cdot \frac{a}{\cos \alpha} \right) - m \cdot g \cdot \sin \alpha - P_o \cdot S_k.$$

Провівши перетворення, одержимо диференціальне рівняння з відокремленими змінними

$$d_{\eta} = m \frac{v_{\eta} dv_{\eta}}{A v_{\eta}^2 - B}, \quad (8.80)$$

де  $A = \rho \cdot S$ ;

$$B = f_1 \left( m \cdot g \cdot \cos \alpha + s \cdot \rho \cdot \frac{a}{\cos \alpha} \right) - m \cdot g \cdot \sin \alpha - P_o \cdot S_k.$$

Інтегруючи рівняння (8.80), отримаємо, що

$$\eta = \frac{m}{2A} \ln |A v_{\eta}^2 - B| + C. \quad (8.81)$$

Постійну інтегрування  $C$  визначимо на основі початкових умов

$$\eta_o = 0, \quad v_{\eta o} = v \cdot \cos \alpha,$$

де  $v$  – швидкість руху культиватора, м/с.

Підставляючи значення  $\eta_o$  і  $v_{\eta o}$  в рівняння (8.81), маємо

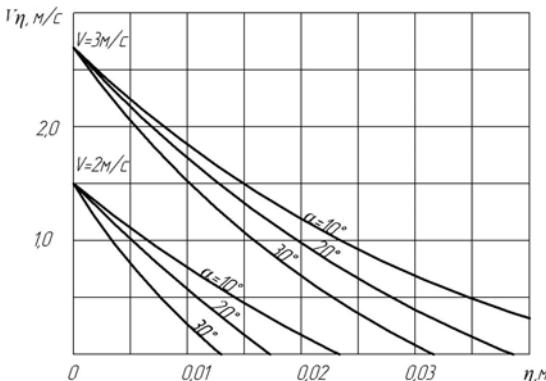
$$C = -\frac{m}{2A} \ln |A v^2 \cos^2 \alpha - B| = -\frac{m}{2A} \ln |A v_{\eta o}^2 - B|.$$

У кінцевому варіанті швидкість частки  $v_{\eta}$  дорівнюватиме

$$\eta = \frac{m}{2A} \ln |A v_{\eta}^2 - B| - \frac{m}{2A} \ln |A v^2 \cos^2 \alpha - B|,$$

або

$$\eta = \frac{m}{2A} \ln \left| \frac{A v_{\eta}^2 - B}{A v^2 \cos^2 \alpha - B} \right|. \quad (8.82)$$



**Рис. 8.14.**  
Графіки залежності швидкості руху частки ґрунту  $v_{\eta}$  у функції пройденого шляху  $\eta$  і кута розпушення  $\alpha$ .

Для побудови графіка залежності  $\eta = \eta(v_n)$  приймемо такі числові значення для величин, що входять у рівняння: щільність ґрунту в горизонті, що обробляється,  $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$  [36]; максимальне значення коефіцієнта тертя ґрунту по сталі  $f_l = 0,38$  [25]; сила питомого прилипання  $P_o = 15 \text{ г/см}^2$ , або  $1471 \text{ Па}$  [37]; площа поперечного перетину ґрунтової частки  $S = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  при її радіусі  $0,01 \text{ м}$ ; маса частки, виходячи з максимального значення щільності ґрунту,  $m = \rho \cdot 4,189 \cdot 0,01^3 = 1600 \cdot 4,189 \cdot 0,01^3 = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ ; площу контакту ґрунтової частки і поверхні лапи приймаємо  $S_k = 3,14 \cdot 0,005^2 = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}$  (рис. 8.14).

Як бачимо на рис. 8.14, незалежно від швидкості руху культиватора і кута нахилу культиваторної лапи зі збільшенням шляху, пройденого часткою, швидкість руху знижується. Це пов'язано з тим, що після сколення частка ґрунту, отримавши початковий поштовх, у подальшому рухається за інерцією. Отже, довжина крила лапи не повинна перевищувати шлях, що пройдений часткою ґрунту, інакше буде виникати згруджування ґрунту.

#### 8.2.6. ФОРМУВАННЯ НАПРЯМНОЇ КРИВОЇ ПОВЕРХНІ ЛАПИ

Основними вихідними даними під час проектування культиваторної лапи з локальними елементами зміцнення є:

тип ґрунту, його кути зовнішнього  $\varphi_1$  і внутрішнього  $\varphi_2$  тертя, град;

$\gamma_l$  – кут нахилу дотичної до профілю зуба, град;

$\varphi_3$  – кут тертя бур'янів по сталі, град;

$b$  – ширина захвату лапи, м;

$h$  – глибина обробітку, м;

$h_e$  – крок між локальними елементами зміцнення по лезу лапи, м;

$F(S_w)$  – функція кута нахилу локальних елементів по лезу.

Кут нахилу дотичної до профілю зуба  $\gamma_l$  приймається з табл. 8.3 на основі сходу бур'янів і ґрунту по лезу лапи;  $\gamma_l = 27\text{--}31^\circ$ .

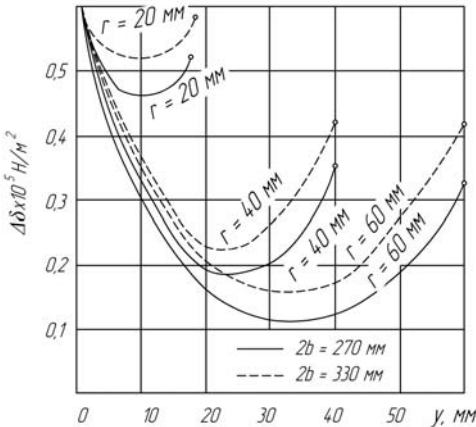
Ширина захвату  $b$  – 230, 270, 330 мм. Цей параметр повинен співпадати із шириною захвату стандартних лап, так як розміщення робочих органів на культиваторах більшості марок базується саме на цих розмірах.

Крок розташування елементів локального зміцнення  $h_e$  приймається з умови утворення зубів;  $h_e = 20\text{--}50 \text{ мм}$ .

Функція кута нахилу локальних елементів по лезу  $\varepsilon(h_e)$  визначається з умови найбільш тривалого збереження профілю зуба. У розділі 4 експериментально встановлено, що  $\varepsilon = const$  і мінімальний знос зубів відбувається при  $\varepsilon = 20^\circ$ .

Напрямна крива поверхні культиваторної лапи являє собою поєднання дуги кола і прямих ліній, тому розглянемо формування кожного елемента окремо.

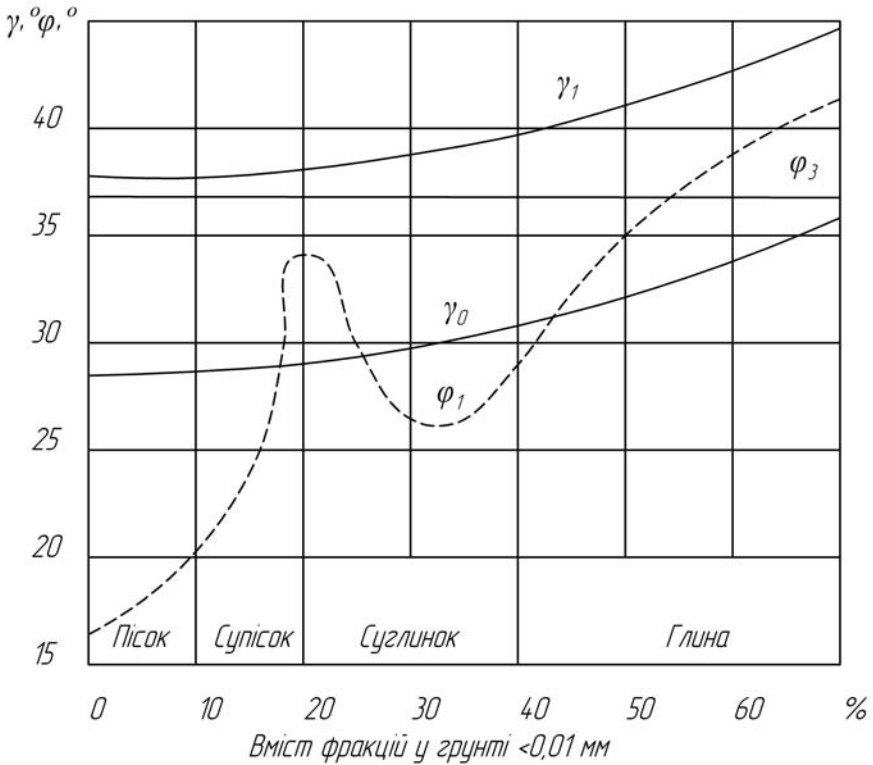
Визначення радіуса дуги носка лапи будемо проводити на основі деформацій, що виникають у ґрунті. Для цього по номограмі (рис. 8.15), побудованій відповідно до рівняння (8.74), визначимо мінімальну різницю напружень у ґрунті, які виникають на різних ділянках леза. На ділянці  $y = 0-30$  мм найбільше напруження виникає на межі змінення радіуса носка лапи  $r = 20-40$  мм. Так, при  $r = 20$  мм різниця напружень, що викликається різними профілями, рівна  $\Delta\sigma = 0,47 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ , а при  $r = 40$  мм становить  $\Delta\sigma = 0,25 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ .



**Рис. 8.15. Номограма для визначення радіуса носка лапи**

Під час вибору радіуса носка лапи потрібно враховувати, що за високих напружень у ґрунті відбувається його кришення за рахунок енергії стиску, того часу як низькі напруження забезпечують тільки сколювання шару ґрунту, який призводить до утворення грудок великого розміру.

Кут нахилу напрямної знайдемо з номограми, що наведена на рис. 8.16. Як видно з характеру залежностей кутів тертя ґрунту по сталі, кут нахилу напрямної  $L \gamma_0$  знаходиться в межах  $27-31^\circ$ , незважаючи на те, що залежність кута тертя ґрунту по сталі  $\varphi_1$  має хвилеподібний характер.



**Рис. 8.16. Номограма для визначення нахилу напрямної**

Визначивши радіус носка лапи  $r$  і кут нахилу твірної  $\gamma_0$ , формуємо напрямну криву. Для цього визначимо параметри прямолінійної ділянки леза через координати точки  $B$  (рис. 8.9):

$$x_B = r - r \sin \gamma_0, \quad y_B = r \cos \gamma_0. \quad (8.83)$$

Звідки вільний член напрямної дорівнює

$$d_1 = r [\cos \gamma_0 - \operatorname{tg} \gamma_0 (1 - \sin \gamma_0)].$$

Отримане рівняння дозволяє вираз для вільного члена  $d$  записати простіше

$$D = 0,586 r,$$

за максимального кута  $\gamma_0 = 31^\circ$ .

Координати кінцевих точок напрямної  $C$  знайдемо, підставивши в рівняння напрямної ширину захвату  $u_C = b$

$$x_C = \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma_0} \{ b - r [\cos \gamma_0 - \operatorname{tg} \gamma_0 (1 - \sin \gamma_0)] \}.$$

Отже, рівняння напрямної можна представити як

$$y^2 + (r - x)^2 = r^2 \text{ при } 0 < x \leq x_B; \quad (8.84)$$

$$y = \operatorname{tg} \gamma_0 x + r [\cos \gamma_0 - \operatorname{tg} \gamma_0 (1 - \sin \gamma_0)] \text{ при } x_B \leq x < x_C.$$

За спрощеного варіанта проектування, коли кут нахилу твірної прийнятий  $\gamma_0 = 31^\circ$ , рівняння напрямної буде мати вид:

$$y^2 + (r - x)^2 = r^2 \text{ при } 0 < x \leq x_B;$$

$$y = \operatorname{tg} \gamma_0 x + 0,568 r \text{ при } x_B \leq x < x_C.$$

Отриманні дані слугують вихідними для проектування лапи.

За графічної побудови креслять систему координат  $Oxy$  (рис. 8.17). На осі відкладають від початку координат радіус дуги кола носка лапи, отримуючи центр  $O$ . Точку переходу дуги в коло  $B$  визначимо, проводячи до дуги дотичну під кутом  $\gamma_0$  до осі  $Ox$ . Кінцеву точку крила лапи отримаємо, відклавши ширину півзахвату  $b/2$ .

Побудову повторюємо для другої напівповерхні.

### 8.3. ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ПОВЕРХНІ ЛАПИ

#### 8.3.1. ПОБУДОВА ПРОФІЛЮ ЛАПИ

Побудову поверхні починаємо з вибору кута  $\alpha$  постановки площини лапи до горизонту.

Враховуючи значення напруження у ґрунті  $\sigma_1$  і максимальне переміщення частинки по поверхні лапи  $\eta_{max}$ , у межі допустимих значень виявляємо кут  $\alpha$ . Узагальнюючи залежності (8.79) і (8.82), можна рекомендувати такі значення кута  $\alpha$ : до  $17^\circ$  – різання,  $17$ – $26^\circ$  – сколювання, вище  $26^\circ$  – розпушення.

Визначаємо кут нахилу твірної у повздовжньо-вертикальній площині

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \gamma_0}. \quad (8.85)$$

Записуємо рівняння циліндричної поверхні

$$z = \operatorname{tg} \alpha_1 (x - z - \sqrt{r^2 - y^2}). \quad (8.86)$$

Переріз поверхні отримаємо, підставляючи в рівняння (8.85) фіксовані значення координат:

◆ на площині  $Oxy$

$$\alpha_z = \operatorname{tg} \alpha_1 (x - r - \sqrt{r^2 - y^2});$$

◆ на площині  $Oxz$

$$z = \operatorname{tg} \alpha_1 (x - r - \sqrt{r^2 - a_y^2});$$

◆ на площині  $Oyz$

$$z = \operatorname{tg} \alpha_1 (a_x - r - \sqrt{r^2 - a_y^2}).$$

Положення площини крила лапи задаємо точками  $B$ ,  $C$  і  $N$ . Координати точок  $B$  і  $C$  визначені раніше. Для знаходження координат точки  $N$  визначимо проміжну точку  $D$ , яка лежить на лезі лапи  $BC$ . Координата  $y_D$  цієї точки дорівнюватиме

$$y_D = y_B + \frac{y_C - y_B}{2}.$$

У свою чергу координата  $x_D$

$$x_D = x_B + \frac{y_C - y_B}{2 \operatorname{tg} \gamma_0}.$$

Координату  $z_N$  знайдемо, задавшись шириною крила лапи в середній частині. Практика встановлює цей розмір у межах  $l_1 = 40\text{--}50$  мм.

У цьому випадку

$$z_N = l_1 \sin \alpha.$$

Тоді координати точки  $N$  на площині  $Oxy$  визначимо як

$$x_N = x_D + l_1 \cos \alpha \cdot \sin \gamma_0, \quad (8.87)$$

$$y_N = y_D - l_1 \cos \alpha \cdot \cos \gamma_0. \quad (8.88)$$

Рівняння площини верхнього обрізу буде мати вигляд

$$z = -\operatorname{tg} v y + b_0. \quad (8.89)$$

Підставивши значення координат точки  $N$ , через яку проходить площина верхнього обрізу, отримаємо значення параметра  $b_0$

$$b_0 = z_N + y_N \cdot \operatorname{tg} v,$$

або

$$b_0 = l_1 (\sin \alpha - \cos \alpha \cos \gamma_0) + \frac{y_C + y_B}{2} \operatorname{tg} v.$$

Розв'язуючи сумісно рівняння циліндричної частини поверхні і площини обрізу, отримаємо лінію обрізу циліндричної частини: на горизонтальній площині  $Oxy$

$$x = r - \sqrt{r^2 - y^2} - \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_1} (\operatorname{tg} v \cdot y \cdot b_0) \quad (8.90)$$

і на лобовій  $Oyz$

$$x = z \left( 1 + \frac{1}{\operatorname{tg}v} \right) + \sqrt{r^2 - \left( \frac{b_0 - z}{\operatorname{tg}v} \right)^2}. \quad (8.91)$$

Лінію обрізу крила лапи отримаємо, розв'язуючи сумісно рівняння площини крила і площини обрізу:  
на горизонтальній площині проекції  $Oxy$

$$y = -\frac{A}{B \cdot C \cdot \operatorname{tg}v} x + \frac{C \cdot b_0 - D}{B - C \cdot \operatorname{tg}v}$$

і на профільній площині проекції  $Oxz$

$$z = \frac{A}{\operatorname{ctg}v \cdot B - C} x + \frac{B \cdot b_0 + D \cdot \operatorname{tg}v}{B - C \cdot \operatorname{tg}v}.$$

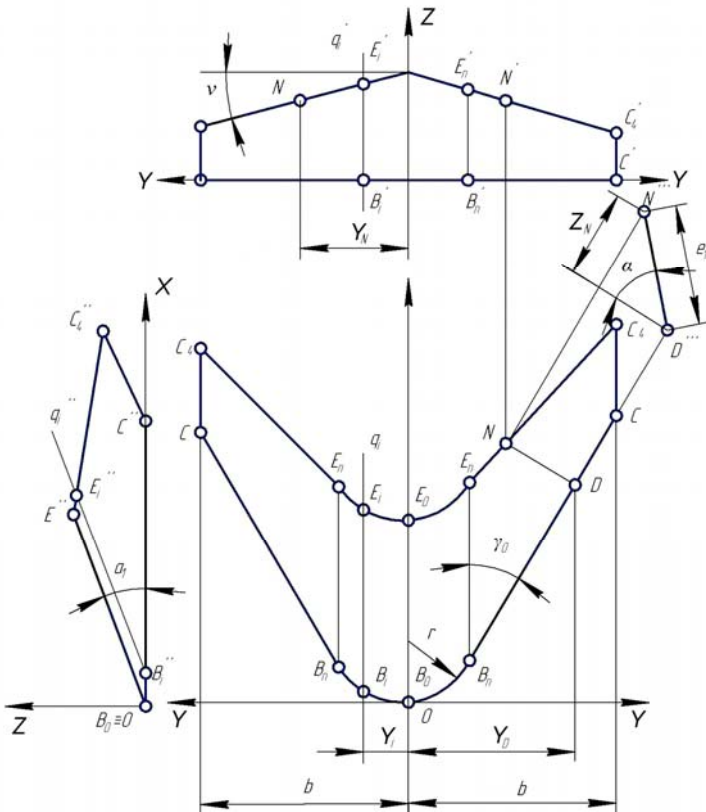


Рис. 8.17. Схема побудови поверхні лапи

Координати точки переходу  $E_n$  циліндричної частини поверхні в площині крила знайдемо в такий спосіб. Оскільки твірна  $E_n$ , по якій відбувається з'єднання поверхонь, паралельна повздовжній площині, то, підставляючи координату  $y_B$  в рівняння площини обрізу, отримаємо координату  $z_{En}$

$$z_{En} = -\text{tg}\nu \cdot y_B + b_0. \quad (8.92)$$

Координату  $x_{En}$  знайдемо, підставивши координати  $y_B$  та  $z_{En}$  у рівняння площини, тобто

$$x_{En} = -\frac{1}{A}(By_B + Cz_{En} + D). \quad (8.93)$$

Боковий обріз крила лапи визначається точками  $C$  і  $C_4$ . Координати точки  $C$  визначені раніше, а координати верхньої точки  $C_4$  установимо, задавшись шириною півзахвату лапи  $b/2$ . Тоді координата  $x_{C_4}$  на основі горизонтальної лінії верхнього обрізу буде знайдена як

$$x_{C_4} = \frac{B \cdot C \cdot \text{tg}\nu}{A} \left( \frac{C \cdot b_0 - D}{B - C \cdot \text{tg}\nu} - b \right). \quad (8.94)$$

Координату  $z_{C_4}$  обчислимо, якщо підставимо значення ширини півзахвату  $b/2$  у рівняння площини обрізу

$$z_{C_4} = -\text{tg}\nu \cdot b + b_0. \quad (8.95)$$

Зведений алгоритм проектування поверхні, буде виглядати так

- 1) задаємося вихідними даними відповідно до підрозділу 8.2.6;
- 2) розрахуємо радіус циліндричної частини  $r$  лапи (рис. 8.15) і кут нахилу напрямної площини крила  $y_0$  (рис. 8.16);
- 3) визначимо координати  $x_B, y_B$  точки переходу дуги в пряму (8.83);
- 4) координати кінцевої точки  $x_C, y_C$  крила знайдемо з виразу (8.84);
- 5) визначимо кут кришення  $\alpha$  (рис. 8.17);
- 6) визначимо кут нахилу твірної  $\alpha_l$  (8.85);
- 7) для побудови каркасу поверхні визначимо крок твірних  $y = b/n$ , де  $n$  – число твірних.
- 8) положення  $i$ -тої твірної визначимо координатами:

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y;$$

$$x_{i+1} = \sqrt{r^2 - y_{i+1}^2} + r;$$

- 9) за формулами (8.87) і (8.88) визначимо координати  $x_N, y_N, z_N$  проміжної точки  $N$ ;

10) визначимо параметри  $v$  і  $b_0$  положення площини обрізу (8.89).

11) за формулами (8.90) і (8.91) визначимо координати точок  $x_{Ei}, y_{Ei}, z_{Ei}$  верхнього обрізу лапи;

12) підставляючи координату  $y_B$ , визначимо за виразами (8.92) і (8.93) координати точки  $E_n$  переходу циліндра в площину;

13) визначимо за рівняння (8.94) і (8.95) координати  $x_{C4}, z_{C4}$  крайньої точки  $C_4$  крила лапи;

14) переріз поверхні в лобовій проекції будемо, задаючись координатою  $x$  фіксованим числом  $x_j = \alpha_{xj}$ , де  $j$  – номер перерізу;  $j = 1, 2, 3, \dots, m$  для циліндричної частини

$$z_{ji} = tg\alpha_1(\alpha_{xj} - r - \sqrt{r^2 - y_{ji}^2})$$

і для площини

$$A\alpha_{xj} + B_y + C_z + D = 0;$$

15) горизонтальний перетин будемо, задаючись фіксованою координатою  $z_k = \alpha_{zk}$ , де  $k = 1, 2, 3, \dots, k$ ;  $k$  – номер горизонтального перерізу.

Для циліндричної поверхні координати точок перерізу дорівнюватимуть:  $\alpha_{zk} = tg\alpha_1(x_{ki} - r - \sqrt{r^2 - y_{ki}^2})$ , а для площини крила  $A_x + B_y + C_{\alpha_{zk}} + D = 0$ .

Наведений алгоритм проектування поверхні культиваторної лапи можна реалізувати в будь-якій системі програмування чи графічно. За графічної побудови в системі *Oxyz* використовують коло радіусом  $r$  (рис. 8.17), до якого проводять дотичні під кутом  $\gamma_0$ , отримуючи напрямну криву. Дотик прямих ліній до кола відбувається в точках  $B_n$ .

Ширину крила  $D'''N'''$  у середній частині лапи будемо методом заміни площин проекцій, відклавши від горизонталі кут  $\alpha$ .

На лобовій поверхні по координатах  $y_N$  та  $z_N$  будемо лобову проекцію точки  $N'$ , через яку під кутом  $v$  проводимо лобову проекцію верхнього обрізу лапи, перетин верхнього обрізу лапи на лобовій проекції дає найвищу точку  $E'_0$ .

Задавшись рядом твірних  $g'_i$ , на лобовій проекції отримаємо ряд точок  $E'_i$ . Провівши на профільній площині проекцій проекції твірної  $g''_i$  і відклавши на них координати  $z'_{Ei}$ , отримаємо горизонтальну і профільну проекції верхнього обрізу циліндричної частини лапи.

Точки  $C$  і  $C_4$  знайдемо, відклавши півширину лапи  $b/2$  по осі  $Oy$ .

Графічний спосіб побудови більш простий, ніж аналітичний, і дозволяє вносити корективи в процесі побудови.

### 8.3.2. ПРОЕКТУВАННЯ РОЗГОРТКИ ПОВЕРХНІ ЛАПИ

Розгортку поверхні лапи найпростіше будувати методом триангуляції. Суть методу полягає в тому, що поверхня лапи розбивається на трикутники з подальшим знаходженням їх натуральних величин.

Триангуляцію проводимо у такий спосіб. На напрямній кривій задаємо ряд точок  $B_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, k$ ) – рис. 8.18,а.

Одночасно з цими точками задаємо точки  $E_i$ , які знаходяться на горизонтальній проекції верхнього обрізу лапи. Точки  $B_i$  і  $E_i$  визначають  $i$ -ту твірну циліндричної поверхні лапи. Тобто поверхня лапи розбивається на чотирикутники,  $B_0B_1E_{00}E_{01}$ ,  $B_1B_2E_{01}E_{02}$ , ..., у яких бокові сторони паралельні між собою:  $B_0E_{00} \parallel B_1E_{01} \parallel B_iE_{0i} \dots$ . З'єднавши точки  $E_{00}$  і  $B_1$ ,  $E_{01}$  і  $B_2$ ,  $E_{0i}$  і  $B_{i+1}$ , отримаємо дві сітки трикутників. Верхню:  $\Delta E_{00}E_{01}B_1$ ,  $\Delta E_{01}E_{02}B_2$ , ...,  $\Delta E_{0i}E_{0(i+1)}B_{i+1}$  та нижню:  $\Delta B_0B_1E_{00}$ ,  $\Delta B_1B_2E_{01}$ , ...,  $\Delta B_iB_{i+1}E_{0i}$ . При триангуляції дуги між точками  $B_0$  і  $B_1$ ,  $B_1$  і  $B_2$ , ...,  $B_i$  і  $B_{i+1}$ ,  $E_0$  і  $E_1$ ,  $E_1$  і  $E_2$ , ...,  $E_i$  і  $E_{i+1}$  замінюються хордами, довжина яких визначається співвідношеннями:

$$B_iB_{i+1} = \sqrt{(x_{B_{i+1}} - x_{B_i})^2 + (y_{B_{i+1}} - y_{B_i})^2}; \quad (8.96)$$

$$E_iE_{i+1} = \sqrt{(x_{E_{i+1}} - x_{E_i})^2 + (y_{E_{i+1}} - y_{E_i})^2}.$$

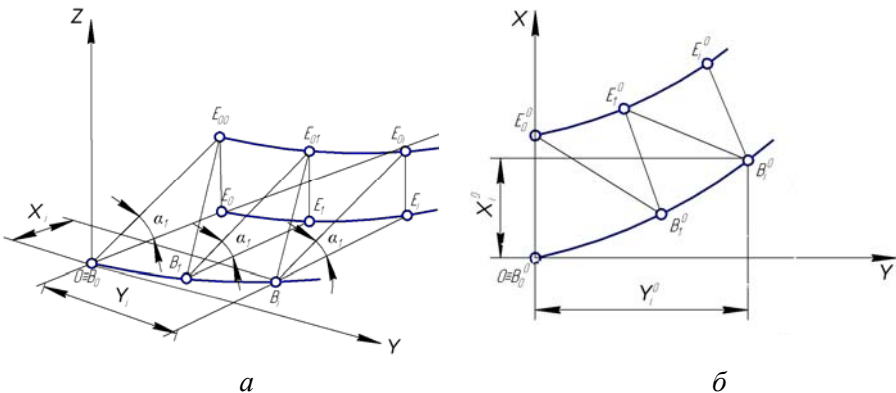


Рис. 8.18. Схема побудови розгортки лапи

Натуральні величини відрізків твірних, які розташовані між точками  $B_i$  і  $E_{0i}$ , визначимо за формулою

$$B_i^0 E_i^0 = \frac{y_{Ei} - y_{Bi}}{\cos \alpha_1}.$$

Натуральні величини відрізків, що з'єднують точки  $E_{0i}$  і  $B_{i+1}$ , розрахуємо по координатах цих точок

$$B_{i+1} E_{0i} = \sqrt{(y_{Ei} - y_{B_{i+1}})^2 + (x_{B_{i+1}} - x_{Ei})^2 + \left(\frac{B_i E_i}{\cos \alpha_1}\right)^2}. \quad (8.97)$$

Розгортку поверхні будуватимемо, розв'язуючи систему рівнянь, що складається із рівнянь кола, центри яких знаходяться у раніше визначених вершинах трикутників.

У загальному випадку система рівнянь буде мати такий вигляд (рис. 8.18,б):

$$\left. \begin{aligned} (x_{B_{i+1}} - x_{Ei})^2 + (y_{B_{i+1}} - y_{Ei})^2 &= (E_i^0 B_{i+1}^0)^2 \\ (x_{B_{i+1}} - x_{Ei})^2 + (y_{B_{i+1}} - y_{Ei})^2 &= (B_i^0 B_{i+1}^0)^2 \end{aligned} \right\} \quad (8.98)$$

де  $x_{i+1}$ ,  $y_{i+1}$  – координати дослідженої точки (вершини трикутника), мм;

$x_i$ ,  $y_i$  – координати центрів кіл, які знаходяться в точках  $B$  і  $E$ , мм;

$E_i^0 B_{i+1}^0$ ,  $B_i^0 B_{i+1}^0$  – сторони трикутників, які виконують роль радіусів та визначаються за формулами (8.96) і (8.97).

Щоб виключити «зайві» значення, які отримуємо під час видалення кореня, систему (8.98) можливо розв'язувати числовими методами [38].

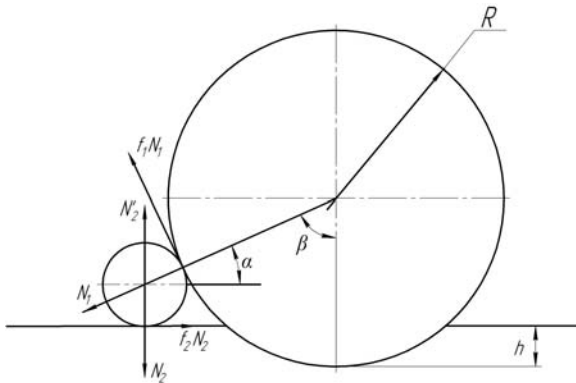
## 9. КОТКИ ТА ОПОРНІ КОЛЕСА. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТА РОЗРАХУНКУ

*Котки* – основні робочі органи, оскільки вони призначені для виконання технологічних операцій. До сівби – для вирівнювання поверхні та знищення брил, після сівби – для поліпшення контакту насіння з ґрунтом.

*Колеса* – допоміжні робочі органи, бо виступають у ролі опор та рушіїв.

### 9.1. ОБҐРУНТУВАННЯ МІНІМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО РАДІУСА

Радіус повинен бути таким, щоб у разі наїзду на грудку коток (колесо) перекочувався через нього. Розглянемо розрахункову схему (рис. 9.1.)



**Рис. 9.1. Розрахункова схема до визначення мінімально допустимого радіуса котка**

Умова перекочування котка через грудку – грудка має защемлюватися між ґрунтом та ободом. У проекції на ось  $X$

$$N_1 \cdot \cos \alpha + f_1 \cdot N_1 \cdot \sin \alpha < f_2 \cdot N_2, \quad (9.1)$$

де  $N_1, N_2$  – нормальні складові тиску відповідно котка на грудку та ґрунту на грудку;

$f_1, f_2$  – коефіцієнти тертя грудки відповідно по котку та по ґрунту;

$\alpha$  – кут защемлення.

Масою грудки нехтуємо, бо вона суттєво менше інших складових. Фактично це означає, що реакцію  $N_2$  утворено виключно силою тиску котка

$$N_2 = N_1 \cdot \sin \alpha - f_1 \cdot N_1 \cdot \cos \alpha. \quad (9.2)$$

Підставимо вираз (9.2) у рівняння (9.1) і одержимо, що

$$N_1 \cdot \cos \alpha + f_1 \cdot N_1 \cdot \sin \alpha < f_2 \cdot N_1 \cdot \sin \alpha - f_1 \cdot f_2 \cdot N_1 \cdot \cos \alpha.$$

Поділимо ліву і праву частини на  $N_1 \cdot \cos \alpha$

$$1 + f_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha < f_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha - f_1 \cdot f_2. \quad (9.3)$$

Виразимо коефіцієнти тертя через відповідні кути тертя і вирішимо рівняння (9.3) відносно  $\operatorname{tg} \alpha$

$$\operatorname{tg} \alpha > \frac{1 + \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1} = \operatorname{ctg}(\varphi_1 - \varphi_2) = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_1 - \varphi_2\right);$$

$$\alpha > \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_1 - \varphi_2\right);$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha = \varphi_2 - \varphi_1.$$

З розрахункової схеми

$$\cos \beta = \frac{R - h - r}{R + r}.$$

Виходячи з умови перекочування через грудки, з отриманого рівняння знаходимо мінімально допустимий радіус котка.

$$R = \frac{r \cdot (1 + \cos \beta) + h}{1 - \cos \beta} > \frac{r \cdot [1 + \cos(\varphi_2 - \varphi_1)] + h}{1 - \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}. \quad (9.4)$$

## 9.2. КІНЕМАТИКА КОТКА

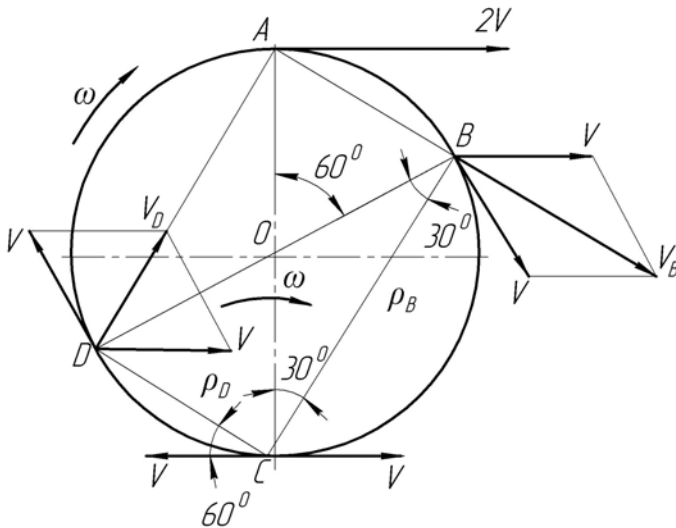
Можливі три варіанти перекочування: без ковзання та буксування, з ковзанням (котки, ведені колеса), з буксуванням (ведучі колеса).

Процес може відбуватися з утворенням та без утворення колії. Розглянемо загальну кінематику котка на прикладі режиму без утворення колії (рис. 9.2).

Будь-яка довільно взята точка котка, що котиться, бере участь у двох рухах: поступальному (переносному) та обертальному (відносному). У режимі без ковзання та буксування переносна та відносна швидкості є постійними, проте відносна швидкість

постійно змінюється за напрямком. Тому абсолютна швидкість довільної точки дорівнює геометричній сумі цих двох швидкостей і у процесі руху змінюється як за напрямком, так і за абсолютним значенням. Розглянемо послідовно окремі характерні точки на поверхні котка.

У точці  $C$  вектори відносної та переносної швидкостей спрямовані по одній прямій, але у протилежні боки, тобто абсолютна швидкість буде дорівнювати нулю. Ця точка також характерна тим, що всі інші точки на поверхні виконують обертання довкола неї. Тому точка є миттєвим центром швидкостей. Оскільки всі інші точки обертаються довкола неї, то їхня абсолютна швидкість буде пропорційною кутовій швидкості обертання (довкола  $C$ ) і відстані до миттєвого центра.



**Рис. 9.2. Загальна кінематика котка, що котиться без ковзання та буксування**

У точці  $A$  вектори відносної та переносної швидкостей теж спрямовані по одній прямій, проте в один бік. Це означає, що абсолютна швидкість дорівнює подвоєній відносній швидкості.

Існує ще дві характерні точки  $B$  і  $D$ , у яких напрямок вектора абсолютної швидкості проходить через точку  $A$ .

Для точки  $B$  абсолютна швидкість дорівнює  $V_B = \omega \cdot \rho_B$ , де  $\rho_B$  – радіус-вектор точки  $B$ . Легко перевірити, що умова проходження сліду вектора абсолютної швидкості через точку  $A$



Якщо  $\xi > \varphi$ , то  $N_T > F$ . Це означає, що сила тертя, досягнувши максимального значення, не спроможна урівноважити дотичну складову  $N_T$ , і ущільнення ґрунту під дією сили  $N_V$  буде супроводжуватися ковзанням частки по поверхні котка під дією сили

$$F_K = N_T - F = N \cdot (tg\xi - tg\varphi).$$

У процесі руху кут  $\xi$  змінюється від нуля у точці  $C$  до  $\pi/2$  у точці  $A$ , при цьому виникає момент, коли цей кут набуває значення кута тертя. На схемі (рис. 9.3,б) цей момент позначено точкою  $a$ . Вище точки  $a$ , на дузі  $aB$ , кут  $\xi > \varphi_1$  і відбувається ковзання. Нижче, на дузі  $ac$  – ущільнення без ковзання. Як видно зі схеми,

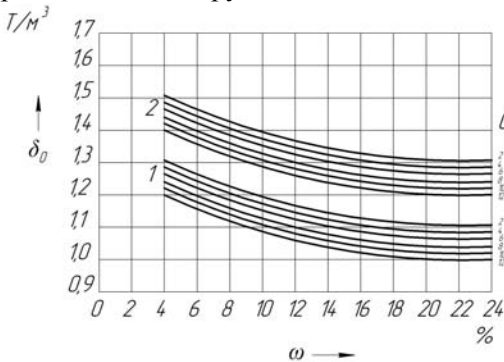
$$h_\varphi = OC - OD = r - r \cdot \cos 2\varphi_1 = 2 \cdot r \cdot \sin^2 \varphi_1.$$

Таким чином, зміна режиму дії котка на ґрунтові агрегати відбуватиметься на рівні  $h_\varphi$ . Ковзання, або дотичне переміщення ґрунтових агрегатів, викликає зростання тертя між ними і їх подрібнення, що не бажано.

Під дією сили  $N_T$ , яка намагається виштовхати ґрунтові агрегати вперед, на розпушених ґрунтах перед котком буде утворюватися ґрунтовий вал, розмір якого залежить від глибини колії та радіуса котка. Чим важче коток і менше його діаметр, тим більше його висота.

### 9.3. ТЕОРІЯ ВОДОНАЛИВНОГО КОТКА

Коток водоналивний з гладкими вальцями призначений для ущільнення ґрунту перед сівбою, вирівнювання поверхні поля і роздавлювання грудок.



**Рис. 9.4. Допустимі значення щільності ґрунту (об'ємної маси скелета) залежно від вагової вологості перед сівбою культури:**  
 1 – зернових;  
 2 – пропашних

Агротехнічні вимоги до ущільнення ґрунту перед сівбою: поверхня поля перед сівбою повинна бути рівною; ущільнення ґрунту

на глибину до 0,07 м з певним рівнем ущільнення  $\delta_0$  (т/м<sup>3</sup>), залежно від типу культури (рис. 9.4), розмір структурних агрегатів на поверхні поля  $D_{50m}$  не повинен перевищувати 10 мм.

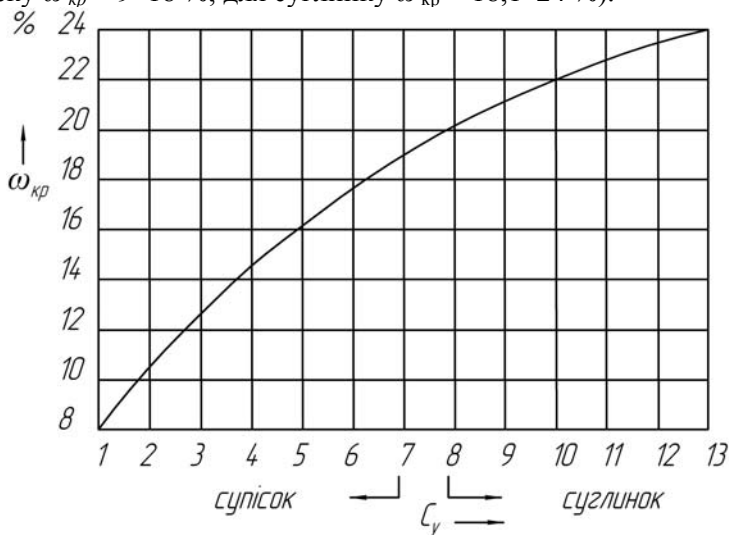
Для оцінки щільності ґрунту прийнято рахувати об'ємну масу скелета ґрунту, яка дорівнює

$$\delta = \gamma / 1 + \frac{\omega}{100},$$

де  $\gamma$  – об'ємна маса ґрунту, т/м<sup>3</sup>;

$\omega$  – вагова вологість ґрунту, %

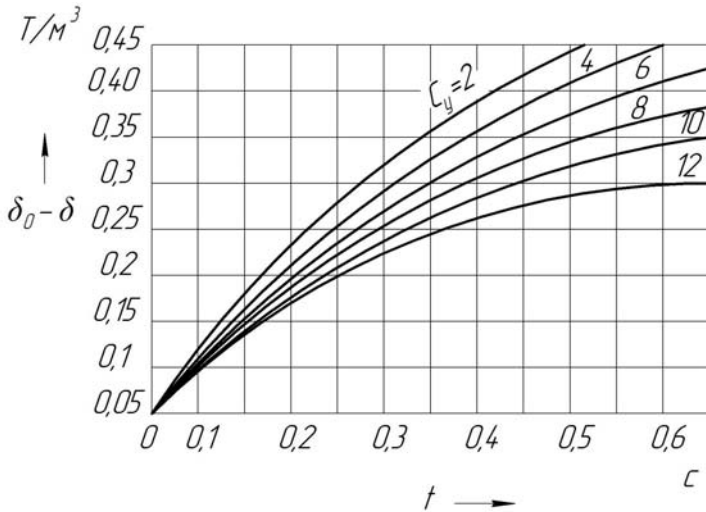
Залежно від виду ґрунту існує критична вагова вологість  $\omega_{кр}$ , за якої можливо досягнути максимального ступеня ущільнення ґрунту. На рис. 9.5 наведено значення критичної вагової вологості для різних ґрунтів з кількістю ударів твердоміра  $C_y = 1-14$  (для супіску  $\omega_{кр} = 9-18$  %; для суглинку  $\omega_{кр} = 18,1-24$  %).



**Рис. 9.5. Графік залежності критичної вагової вологості  $\omega_{кр}$  ґрунту від кількості ударів твердоміра**

Ущільненням ґрунту називається процес витіснення рідини з пор ґрунту. Ступінь ущільнення залежить від часу впливу на частки ґрунту, тобто чим більше часу частки ґрунту будуть перебувати в напруженому стані, тим вище щільність ґрунту.

Час впливу  $t$  (рис. 9.6) залежить від типу ґрунту, а також від початкової  $\delta$  і потрібної  $\delta_0$  щільності ґрунту.



**Рис. 9.6. Вплив інтервалу між потрібною і фактичною щільністю ґрунту ( $\delta_0 - \delta$ ) на час ущільнення**

Під дією робочої маси котка  $G_p$  при переміщенні на ділянці контакту  $B \cdot L$  (рис. 9.7) виникає робоче напруження  $\sigma_p$ , яке діє на максимальну глибину,

$$h_a = \alpha \cdot B \cdot \frac{\omega}{\omega_{кр}} \cdot \left( 1 - e^{-\beta \frac{\sigma_p}{\sigma_6}} \right).$$

де  $\alpha, \beta$  – поправочні коефіцієнти;  $\alpha = 2,0$  та  $\beta = 3,65$  ;

$\omega$  – вагова вологість ґрунту, %;

$B$  – ширина контакту котка з ґрунтом, м;

$\sigma_6$  – межа міцності ґрунту,  $\text{кН/м}^2$ :

піщані, супіщані = 300–400;

суглинисті = 400–600;

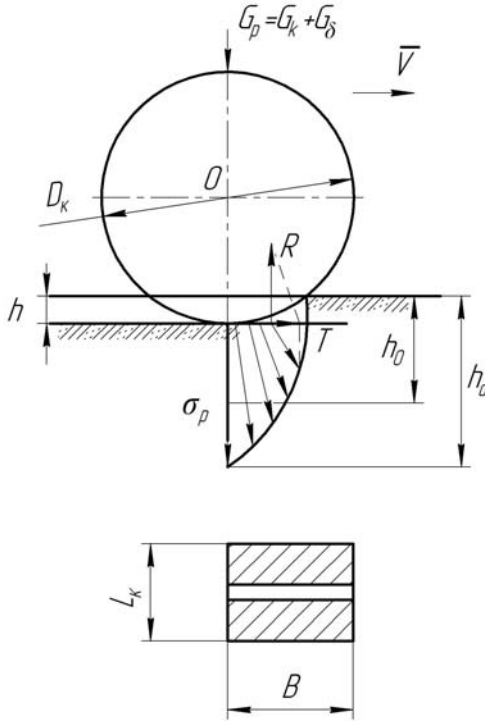
важкосуглинисті = 600–800.

Рівномірна щільність утворюється на глибині  $h_0$ , яка є оптимальною і визначається за формулою

$$h_0 = 0,014 \cdot \frac{\omega}{\omega_{кр}} \cdot \sqrt{q \cdot D_K},$$

де  $q$  – питомий тиск на ґрунт,  $\text{кН/м}^2$ ;

$D_K$  – діаметр вальця котка, м.



**Рис. 9.7. Схема силового впливу вальця котка на ґрунт**

Діаметр вальця котка повинен бути таким, щоб при зустрічі з великою грудкою коток перекочувався через неї і подрібнював на більш дрібні структурні агрегати або вдавлював у ґрунт. В іншому випадку коток буде штовхати ґрунтові агрегати перед собою.

Для нормальної роботи котка необхідне защемлення грудок ґрунту, тобто потрібно виконати умову

$$\psi \leq \varphi_1 + \varphi_2,$$

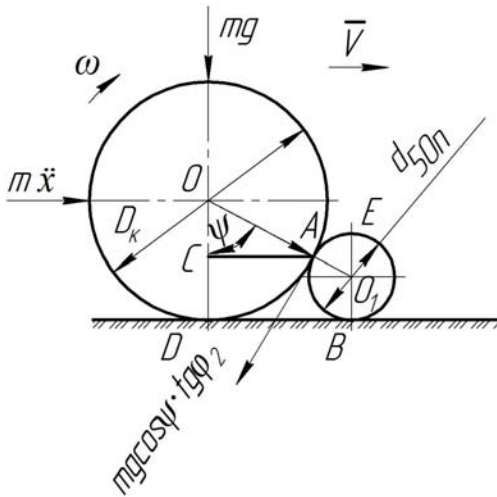
де  $\psi$  – кут защемлення, град;

$\varphi_1$  і  $\varphi_2$  – кути відповідно зовнішнього і внутрішнього тертя ґрунту, град.

Умову перекочування котка через грудку (рис. 9.8) запишемо як

$$m \frac{dV}{dt} (D_k - d_{50n}) \geq mg(\sin \psi + \cos \psi \cdot \operatorname{tg} \varphi_2) \cdot d_{50n};$$

$$\int dV \geq \frac{g(\sin \psi + \cos \psi \cdot \operatorname{tg} \varphi_2) d_{50n}}{(D_k - d_{50n})} \int dt_1.$$



**Рис. 9.8.** Схема до визначення мінімального радіуса котка

Швидкість котка складе

$$V \geq \frac{g(\sin \psi + \cos \psi \cdot \operatorname{tg} \varphi_2) d_{50n} \cdot t_1 + C}{(D_K - d_{50n})} \quad (9.5)$$

При  $t_1 = 0$  постійний коефіцієнт  $C = 0$ .

Враховуючи, що  $t_1 = \frac{0,5d_{50n} \cdot \psi}{V}$ ,  $\psi = \varphi_1 + \varphi_2$  (у радіанах), з

формули (9.5) визначимо мінімальний діаметр вальця котка

$$D_{Kmin} = d_{50n} \left\{ 1 + \frac{0,5g[\sin(\varphi_1 + \varphi_2) + \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \operatorname{tg} \varphi_2] \cdot (\varphi_1 + \varphi_2) d_{50n}}{V^2} \right\} \quad (9.6)$$

Під час перекочування котка через грудку тиск вальця концентрується на ньому і грудка руйнується.

Ступінь подрібнення грудки розміром  $d_{50n}$  дорівнюватиме

$$i = \frac{2q \cdot E}{(\sigma_e \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 + C_{y\partial})^2} + 1,$$

де  $E$  – модуль пружності грудки,  $\text{кН/м}^2$  (вибираємо залежно від ударів твердоміра);

$\sigma_e$  – внутрішня напруга грудки розміром  $d_{50n}$ ,  $\text{кН/м}^2$ ;

$C_{y\partial}$  – питомий тиск часток ґрунту в грудці,  $\text{кН/м}^2$ .

Внутрішню напругу грудки запишемо як

$$\sigma_e = \frac{1}{2D \cdot \cos \varphi_2} + \sqrt{\frac{1}{4D^2 \cdot \cos^2 \varphi_2} + \frac{2q \cdot E}{\cos \varphi_2}},$$

$$D = \frac{9,81 \cdot \pi \cdot d_{50c}^3 \cdot \Delta_{\kappa} (1 - \cos \alpha_0)}{6 \sin \alpha_0} \cdot \left[ K_3 - K_4 \left( A_1 + \frac{C_{y0}}{0,25 \cdot \gamma_{\kappa} \cdot t_2} \right) \right] \times \\ \times [d_{50c} (1 + 2 \sin \alpha_0) + d_{50n}];$$

$d_{50c}$  – розмір часток ґрунту, що складають 50 % за масою, м;  
 $\gamma_{\kappa}$  і  $\Delta_{\kappa}$  – відповідно об’ємна і питома маси грудки, т/м<sup>3</sup>;  
 $\alpha_0$  – кут укладання часток ґрунту, град;  $\alpha = 50^\circ$ ;  
 $K_3 = 2,8 \cdot 10^{n \cdot \epsilon_0}$ ;  $K_4 = 2,8 \cdot 10^{(n-3)\epsilon_0} + 2,5 \cdot 10^{(n-2)\epsilon_0}$ .

$$n = \frac{\lg \{ 29,4 \cdot \gamma_{\kappa} [ \pi^3 \cdot d_{50c}^5 \cdot (9,81 \cdot \Delta_{\kappa})^3 \cdot d_{50n}^2 ]^{-1} \}}{(a_0 + 2\epsilon_0)}$$

$a_0 = 0,21$ ;  $\epsilon_0 = 0,227$ ;  $A_1 = 4,6$ ;  $t_2 = 3,6$ .

Тяговий опір котка становитиме

$$W = 9,81 G_p \left( f_{\delta\epsilon} + tg \alpha + \frac{V}{9,81 \cdot t_p} \right),$$

де  $G_p$  – робоча маса котка, т;

$f_{\delta\epsilon}$  – коефіцієнт руху;  $f_{\delta\epsilon} = q^2 \cdot L_{\kappa} / 9,81^2 \cdot G_p \cdot C$ ,

$L_{\kappa}$  – довжина вальця котка, м;

$\alpha$  – кут нахилу, град;  $\alpha = 12^\circ$ ;

$t_p$  – час разгону, с;  $t_p = 2-3$  с;

$C$  – коефіцієнт опору вертикальної деформації ґрунту, кН/м<sup>3</sup>;  
 $C = 180$  кН/м<sup>3</sup>.

Кількість котків у зчіпці запишемо як

$$Z = \frac{0,9 T_n}{W},$$

де  $T_n$  – номінальне тягове зусилля трактора, кН

## ВИСНОВОК

*Вивчення світових наукових розробок, досвіду щодо теорії і розрахунку робочих процесів машин, обґрунтованого підходу до вибору параметрів і режимів роботи дозволило нам сформулювати основні вимоги до ґрунтообробної техніки:*

*- висока якість і технологічна надійність виконання операцій з обробітку ґрунту з урахуванням агротехніки вирощування культури;*

- мінімальне розпилення ґрунту під час взаємодії робочих органів з ґрунтом, зменшення дії водної, вітрової та механічної ерозії за рахунок мінімізації сил, що прикладаються до шару;

- достатня технічна надійність, висока зносостійкість робочих органів, вузлів і деталей за рахунок оптимального вибору матеріалів, з яких вони виробляються;

- оптимальні комбінації робочих органів як в окремій машині, так і в агрегатах, складених з одноопераційних машин;

- зменшення питомих витрат енергії на обробіток ґрунту за рахунок адаптації конструкції робочих органів до оброблюваного середовища.

Немає сенсу приховувати, що вітчизняна ґрунтообробна техніка сьогодні за надійністю, довговічністю, енерговитратами поступаєтьс я іноземним аналогам. Це зумовлено недосконалою елементною базою, низьким рівнем кооперації, відсутністю новітніх матеріалів, сучасного технологічного обладнання.

Дехто пропонує відмовитися від вітчизняної техніки на користь іноземної. При цьому замовчують про дуже вагомий фактор: техніці доведеться працювати в інших умовах, часто в одних технологічних лініях з нашою недостатньо надійною технікою та низькою організацією праці, які спричиняють неминучі простой. Тому бажаний ефект не завжди буде реальним. До того ж, купуючи техніку за кордоном, ми прив'язуємо себе до їхніх запасних частин і ремонтних матеріалів, а це потребує значних коштів на підтримання техніки в роботоздатному стані.

Система побудови робочих органів вітчизняного сільськогосподарського машинобудування найближчими роками повинна зазнати серйозних змін, оскільки суттєво зміняться технології виробництва сільськогосподарських культур.

Перед дослідниками сільськогосподарського виробництва, конструкторами, практиками стоїть задача переведення машинобудування цієї галузі на високоефективний рівень, який забезпечив би удосконалення існуючих та створення сільськогосподарських машин і знарядь принципово нових конструкцій, міцних, розрахованих на найвищій навантаження, мінімальні витрати на технічне обслуговування, надійність в експлуатації, на збереження довкілля (не абияке слово на сьогодні). Тобто має бути представлений широкий асортимент техніки, яка точно відповідає потребам сільськогосподарської галузі і навіть у майбутньому стане запорукою успіху в ній.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Вадюнина А.Ф.* Методы исследования физических свойств почв / *А.Ф. Вадюнина, З.А. Корчагина.* – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Агропромиздат, 1986. – 416 с.
2. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: навч. посібник / [*Кобець А.С., Іщенко Т.Д., Волик Б.А., Демидов О.А.*]. – Дніпропетровськ : РВВ ДДАУ, 2009. – 84 с.
3. *Панченко А.Н.* Теория измельчения почв почвообрабатывающими орудиями / *А.Н. Панченко.* – Днепропетровск : РИО ДГАУ, 1999. – 140 с.
4. *Панченко А.Н.* Аналитический метод определения тяговых сопротивлений почвообрабатывающих и землеройных машин и оценка их эффективности для энергосберегающих технологий: учебное пособие / *А.Н. Панченко.* – Днепропетровск : РИО ДГАУ, 1995. – 96 с.
5. *Кобець А.С.* Аналітичні дослідження агрегату на основі робочих органів дискового типу / *А.С. Кобець, Б.А. Волик, А.П. Рибкін* // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків, 2006. – Т.2, вип. 44. – С. 231–236.
6. *Цытович Н.А.* Механика грунтов (краткий курс): учебник для строит. вузов / *Н.А. Цытович.* – [4-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Высш. шк., 1983. – 288 с.
7. *Ковбаса В.П.* Напруження та вигляд напруженого стану в ґрунтовому напівпросторі перед дисковим робочим органом / *В.П. Ковбаса, В.О. Дубровін* // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків : ХДТУСГ, 2003. – Вип. 20. – С. 150–157.
8. *Хотюн Г.В.* Методика оценки качества обработки почвы / *Г.В. Хотюн, А.П. Рыбкин, А.В. Лихоман* // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь : ТДАТА, 2004. – Вип. 22. – С. 185–189.
9. *Панченко А.Н.* Аналитические исследования крошения почвы с привлечением цифровой имитационной модели / *А.Н. Панченко, Б.А. Волик* // Механізація сільськогосподарського виробництва: збірник наукових праць Національного аграрного університету. – К., 1998. – Т. IV. – С. 328–330.
10. *Надикто В.Т.* Колійна та мостова системи землеробства: монографія / *Надикто В.Т., Улексін В.О.* – Мелітополь : ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2008. – 270 с.
11. *Мударисов С.Г.* Повышение качества обработки почвы путем совершенствования рабочих органов машин на основе моделирования технологического процесса: автореф. дис на соискание ученой степени докт. техн. наук: спец. 05.20.01 / *С.Г. Мударисов.* – Челябинск, 2007. – 40с.
12. Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин: Учебник для вузов сельскохозяйственного машиностроения / [*Босой Е.С., Верняев О.В., Смирнов И.И.* и др.]. – М. : Машиностроение, 1977. – 568 с.

13. *Кобець А.С.* Теорія і розрахунок сільськогосподарських машин : практикум / *Кобець А.С., Кобець О.М., Пугач А.М.* – Дніпропетровськ : Вид-во «Свідлер А.Л.», 2011. – 164 с.
14. Износ деталей сельскохозяйственных машин / [*Севернев М.М., Каплун Г.П., Короткевич В.А.* и др.]. – М. : Колос, 1972. – 288 с.
15. *Рашевский П.К.* Дифференциальная геометрия / *П.К. Рашевский* – М. : ГТТИ, 1950. – 428 с.
16. *Бурченко П.Н.* Механико-технологические основы почвообрабатывающих машин нового поколения / *П.Н. Бурченко* – М. : Изд-во ВИМ, 2002. – 211 с.
17. *Кривошапко С.Н.* Торсовые поверхности и оболочки : справочник / *С.Н. Кривошапко*. – М. : Изд-во УДН, 1991. – 287 с.
18. *Рыжов Н.Н.* К вопросу конструирования торсов по наперед заданным условиям / *Н.Н. Рыжов, Р.У. Алимов* // Прикладная геометрия и инженерная графика. – К., 1979. – Вып. 27. – С. 15–17.
19. *Рыжов Н.Н.* Алгоритмизация вывода уравнений линейчатых поверхностей с учетом наперед заданных условий / *Н.Н. Рыжов* // Прикладная геометрия и инженерная графика. – К., 1972. – Вып. 4. – С. 3–8.
20. *Бахвалов С.В.* Аналитическая геометрия / *Бахвалов С.В., Бабушкин Л.И., Иваницкая В.П.* – М. : Учпедгиз, 1962. – 367 с.
21. *Ефимов Н.В.* Краткий курс аналитической геометрии / *Н.В. Ефимов*. – М. : Физматгиз. – 1993. – 227 с.
22. *Рашевский П.К.* Курс дифференциальной геометрии / *П.К. Рашевский*. – М. : Изд-во ГИТЛ, 1956. – 420 с.
23. *Сизов О.А.* Исследование процессов взаимодействия лезвия сельскохозяйственных ножей с разрезаемым материалом: дис. ... канд. техн. наук / *О.А. Сизов*. – М. : Изд-во МИИСП, 1971. – 121 с.
24. *Сизов О.А.* Работа лезвия в почве / *О.А. Сизов, В.А. Милюткин* // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1978. – № 3. – С. 9–10.
25. *Синеоков Г.Н.* Теория и расчет почвообрабатывающих машин / *Г.Н. Синеоков, И.М. Панов*. – М. : Машиностроение, 1977. – 327 с.
26. *Кравченко Б.И.* К обоснованию угла раствора лезвий культиваторных лап / *Б.И. Кравченко* // Тракторы и сельхозмашины. – 1968. – № 2. – С. 22–23.
27. *Гаврильченко О.С.* Обґрунтування параметрів та розробка конструкції культиваторних лап з криволінійним лезом : дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.05.11 / *О.С. Гаврильченко*. – Глеваха, 2005. – 160 с.
28. *Бауков А.В.* Поперечный профиль рыхлительного рабочего органа и процесса трещинообразования / *А.В. Бауков, А.С. Кушнарев* // Почвообрабатывающие и посадочные машины : труды МИМСХ. – Мелитополь, 1967. – Т. У, вып. III. – С. 22–34.
29. *Коломиец С.М.* Описание реакций почвы на рабочие органы культиватора / *С.М. Коломиец* // Вісник Харківського державного

технічного університету сільського господарства. – Харків, 2000. – Вип. 1. – С. 280–285.

30. *Корабельский В.И.* К вопросу комплексного геометрического моделирования процесса деформации и разрушения почвы клином различной геометрии / *В.И. Корабельский, А.С. Павлоцкий* // Почвообрабатывающие и посевные машины и динамика агрегатов : труды ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1974. – Вып. 89. – С. 104–108.

31. *Кушнарев А.С.* Механико-технологические основы обработки почвы / *Кушнарев А.С., Кочев В.П.* – К. : Урожай, 1989. – 144 с.

32. *Кушнарев А.С.* Некоторые закономерности деформации почвы / *Кушнарев А.С., Бауков А.В.* // Почвообрабатывающие машины и динамика агрегатов : труды ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1970. – Вып. 33. – С. 44–49.

33. *Сысолин П.В.* Почвообрабатывающие и посевные машины. История, машиностроение, конструирование / *Сысолин П.В., Погорелый Л.В.* – К. : Феникс, 2005. – 264 с.

34. *Волик Б.А.* Элементы теории виртуального моделирования взаимодействия режущего периметра с почвой / *Б.А. Волик* // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. – 2004. – № 1. – С. 61–64.

35. *Гуков Я.С.* Обробіток ґрунту. Технологія і техніка / *Я.С. Гуков* – К. : Нора-прінт, 1999. – 280 с.

36. *Кленин М.П.* Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / *Кленин М.П., Сақун В.А.*. – М. : Колос, 1980. – 671 с.

37. *Бурченко П.Н.* Адгезионные свойства почвы при взаимодействии с различными материалами / *Бурченко П.Н., Хумаров Р.Т.* // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1971. – № 5. – С. 34–35.

38. Математика и САПР / [*Шенен П., Коснар М.* и др.] : в 2-х кн. – М. : Мир, 1988. – Кн.1. – 204 с.

# З М І С Т

<b>Вступ</b> .....	3
<b>1. Механіко-технологічні властивості ґрунту</b> .....	4
1.1. Твердість ґрунту .....	6
1.2. Питоме зчеплення часток .....	8
1.3. Коефіцієнт зовнішнього тертя .....	9
1.4. Граничний опір ґрунту на зсув .....	12
1.5. Коефіцієнт внутрішнього тертя в'язких матеріалів .....	14
1.6. Липкість .....	14
1.7. Водопроникність .....	16
<b>2. Теоретичні основи розпушення ґрунту</b> .....	20
2.1. Закономірності поширення ліній сколювання у ґрунті ...	20
2.2. Основні теорії розпушення ґрунту .....	24
2.3. Укладання матеріалу на дно борозни .....	26
2.4. Методика розрахунку загальної реакції різання ґрунту поверхнею довільної геометричної форми .....	28
<b>3. Методика оцінки якості обробітку ґрунту</b> .....	32
3.1. Загальні положення методики .....	32
3.2. Сутність коефіцієнта різноподрібнення структурних агрегатів .....	36
<b>4. Елементи теорії лемішно-полицевого плуга</b> .....	38
4.1. Теорія клина .....	38
4.2. Співвідношення ширини захвату корпусу та глибини оранки .....	40
4.3. Розстановка корпусів у повздовжньому напрямку .....	42
4.4. Параметри польової дошки корпусу .....	42
4.5. Допустима робоча швидкість .....	44
4.6. Особливості конструкції та розрахунку плуга-букера ....	46
<b>5. Обґрунтування конструктивних параметрів лап плоскорізів</b> .....	53
5.1. Пасивні плоскорізи .....	53
5.2. Плоскорізи активної дії .....	54
<b>6. Основи теорії дискових робочих органів та машин на їх основі</b> .....	57
6.1. Аналіз конструктивних схем дискатора та дискового плуга .....	57
6.2. Конструктивні параметри диска .....	59
6.3. Профіль борозни .....	60
6.4. Рівняння твірних .....	62

6.5. Оптимізація компоновочної схеми машини .....	65
6.6. Взаємне розташування дисків на рамі машини .....	67
6.7. Конструктивні параметри борозного колеса .....	70
<b>7. Основи теорії робочих органів чизельного типу .....</b>	<b>72</b>
7.1. Конструктивна схема V-подібного корпусу .....	72
7.2. Тяговий опір .....	74
7.3. Загальна компоновка чизеля .....	75
7.4. Кінематика чизеля V-подібної форми активної дії .....	76
<b>8. Обґрунтування конструктивних параметрів</b>	
<b>культиваторних лап, оснащених елементами локального</b>	
<b>зміцнення .....</b>	<b>79</b>
8.1. Математична модель взаємодії лапи зі середовищем .....	79
8.1.1. Параметри потоку ґрунту .....	79
8.1.2. Дослідження зносу леза культиваторної лапи	
за наявності елементів локального зміцнення .....	84
8.1.3. Аналітичне дослідження формування профілю зуба	
під дією локального зносу .....	87
8.2. Геометрична модель поверхні лапи .....	90
8.2.1. Загальні положення методики .....	90
8.2.2. Геометрична модель культиваторної лапи .....	93
8.2.3. Обґрунтування кута нахилу напрямної поверхні	
культиваторної лапи .....	101
8.2.4. Обґрунтування радіуса кола напрямної кривої	
носки лапи .....	105
8.2.5. Обґрунтування кута встановлення крила лапи	
до горизонтальної площини .....	109
8.2.6. Формування напрямної кривої поверхні лапи .....	114
8.3. Інженерна методика побудови поверхні лапи .....	117
8.3.1. Побудова профілю лапи .....	117
8.3.2. Проектування розгортки поверхні лапи .....	122
<b>9. Котки та опорні колеса. Основи теорії та розрахунку .....</b>	<b>124</b>
9.1. Обґрунтування мінімально допустимого радіуса .....	124
9.2. Кінематика котка .....	125
9.3. Теорія водоналивного котка .....	128
<b>Список літератури .....</b>	<b>135</b>

**Анатолій Степанович КОБЕЦЬ**  
**Борис Анатолійович ВОЛИК**  
**Андрій Миколайович ПУГАЧ**

**ГРУНТООБРОБНІ МАШИНИ:  
ТЕОРІЯ, КОНСТРУКЦІЯ, РОЗРАХУНОК**

**МОНОГРАФІЯ**

Редактор *М.П. Гончаренко*  
Комп'ютерна верстка *Я.О. Воронько*

Редакційно-видавничий відділ  
Дніпропетровського держагроуніверситету  
49600, м. Дніпропетровськ, вул. Ворошилова, 25

Підписано до друку 29.07.11. Формат 60×84/16.  
Обл.-вид. арк. 13,35. Ум. друк. арк. 14,35.  
Наклад 300 прим. Папір офсетний. Зам.

---

Видавництво «Свідлер А.Л.»  
49041, м. Дніпропетровськ, а/с 2493, тел./факс +38 (056) 776-39-16  
Ідентифікатор видавця у системі ISBN: 8490  
Надруковано в типографії видавництва «Свідлер А.Л.»  
<http://svidler.dp.ua>