

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

01.01 – КМР. 463 «С» 2023.03.23. 046 ПЗ

ЛІСОВОГО АНДРІЯ ВАСИЛЬОВИЧА

НУБІП України

2023 р.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
УКРАЇНИ

НУБІП України

Факультет Конструювання та дизайну

УДК 631.352

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету

Конструювання та дизайну
(назва факультету)

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

сільськогосподарських машин
та електротехніки ім. акад.

П.М Василенка

Ружилю З.В.

(підпис)

(ПІБ)

2023 р.

Гуменюк Ю.О.

(підпис)

(ПІБ)

2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Обґрунтування параметрів робочого органу глибокорозпушувача для

технології STRIP-TILL

Спеціальність

133 – «Галузеве машинобудування»

(код і назва)

Освітня програма «Технічний сервіс машин та обладнання
сільськогосподарського виробництва»

(назва)

Орієнтація освітньої програми

освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент

Новицький А.В.

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи:

К.Т.Н., доцент

Гуменюк Ю.О.

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

(ПІБ)

Виконав:

Лісовий А.В.

(підпис)

(ПІБ)

КИЇВ - 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

УКРАЇНИ
НУБІП України
Факультет конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ

НУБІП України
Завідувач кафедри сільськогосподарських машин та системотехніки ім. акад. П.М. Василенка

К.Т.Н., доцент

Гуменюк Ю.О.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис)

(ПІБ)

НУБІП України « » 2023 року

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

НУБІП України
Лісовому Андрію Васильовичу
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
(код і назва)

Освітня програма «Технічний сервіс машин та обладнання

сільськогосподарського виробництва»

НУБІП України
(назва)
Програма підготовки освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Тема роботи Обґрунтування параметрів робочого органу глибокорозпушувача для технології STRIP-TILL

затверджена наказом ректора НУБіП України від «28» березня 2023 р. № 463 С

НУБІП України
Термін подання завершеної роботи на кафедру 7. 11. 2023
Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи:

Базова машина – глибокорозпушувач СР-4, тип ґрунту – підзолистий

чорнозем, глибина обробітку - 0,35 м, попередній кут заточки стовб - 20°

НУБІП України
щільність ґрунту 1300 кг/м³.
Перелік питань, що підлягають дослідженню:
1. Аналіз існуючих робочих органів для смугового обробітку ґрунту

2. Обґрунтування параметрів робочих органів

3. Визначення показників економічної ефективності

Дата видачі завдання «14» жовтня 2022р.

Керівник магістерської роботи _____
(підпис)

Гуменюк Ю.О.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис)

Лісовий А.В.
(прізвище та ініціали)

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РЕФЕРАТ

Деякі сільськогосподарські культури, такі як соняшник або кукурудза, володіють властивістю за період вегетації поглинати значну кількість ґрунтової вологи та поживних речовин на глибині до 5 метрів. Тому, щоб отримати заплановану урожайність, потрібно своєчасно ці запаси поповнювати. Зазвичай, робиться це звичайною оранкою з одночасним підживлення мінеральними добривами. Однак при цьому ґрунт стрімко зневоднюється, погіршується його структура та формується плужна підшва, яка не сприяє збереженню родючості ґрунту в глибоких шарах. До того ж при відсутності рослинних домішок на поверхні, ґрунт не в змозі ефективно протистояти вітровій та водній ерозіям.

В умовах зміни клімату використання оранки у технологічному процесі може викликати зменшення урожайності, оскільки після полицевого обробітку після опадів і дії високих літніх температур ґрунт швидко перетворюється у щільну затверділу субстанцію.

Альтернативою оранці може бути спосіб глибокого смугового розпушення ґрунту, який за попередніми дослідженнями дасть змогу якісно обробити головні горизонти розміщення кореневої системи рослин у ґрунті і забезпечити зменшення затрат. Для реалізації такого способу обробітку доцільно використовувати машини з «об'ємним» типом робочих органів. Такі глибокорозпушувачі складаються із розіжжених пар похилих стовб і, виконуючи ґрунтозахисні функції, не будуть створювати плужну підшву і забезпечать високоякісне розпушення.

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМ ОСНОВНОГО ОБРОБІТКУ ГРУНТУ	6
1.1. Аналіз і тенденції поліпшення основного обробітку ґрунту	6
1.2. Варіанти робочих органів глибокорозпушувача для смугового обробітку ґрунту	12
1.3. Порівняння робочих органів для смугового обробітку ґрунту	16
1.4. Компонувальна схема і параметри пропонованого робочого органу для смугової обробки ґрунту	22
Висновки до розділу 1	24
РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ СМУГОВОГО ГЛИБОКОРОЗПУШУВАЧА І ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО РОБОЧИХ ОРґАНІВ	25
2.1. Вибір математичної моделі ґрунту для дослідження об'ємного розпушування	25
2.2. Дослідження впливу параметрів робочого органу на форму оброблюваної смуги	29
2.3. Розробка імітаційної моделі процесу резпушування ґрунту похилими стовбами	35
Висновки по розділу 2	40
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	42
3.1. Програма експериментальних досліджень	42
3.2. Методика експериментальних досліджень	42
3.2.1. Перевірка розробленої імітаційної моделі процесу розпушування ґрунту похилими стовбами.	42
3.2.2. Методика дослідження розпушування ґрунту похилими стовбами за допомогою імітаційної моделі	45

3.2.3. Методика експериментального визначення залежності розташування площини сколювання від кута загострення	48
3.2.4. Методика експериментального дослідження стиснення ґрунту похилими стовбами	51
3.2.5. Методика польового дослідження залежності тягового опору робочого органу глибокорозпушувача від його параметрів	57
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	63
4.1. Результати імітаційного моделювання	63
4.2. Визначення залежності розташування площини сколювання від кута загострення	64
4.3. Визначення раціонального кута заточування стовби	70
4.4. Дослідження стиснення ґрунту похилими стовбами	71
4.5. Визначення залежності тягового опору смугового глибокорозпушувача від параметрів робочих органів. Енергоємність технологічного процесу	75
Висновки по розділу 4	78
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ	80
5.1. Визначення раціональних параметрів об'ємного смугового глибокорозпушувача	80
5.2. Розрахунок стійкості ходу смугового глибокорозпушувача з робочими органами об'ємного типу	85
5.3. Економічна ефективність використання смугового глибокорозпушувача СГР-4	87
Висновки по розділу	91
ЗАДАЛЬНІ ВИСНОВКИ	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	93
ДОДАТКИ	98

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЧВС - лизельна вертикальна стовба

ЧПС - лизельна похила стовба

ОРЗК - об'ємний розпушувач із замкнутим контуром

ОРРК - об'ємний розпушувач з розімкненим контуром

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВСТУП

Виробництво технічних та олійних культур, є найбільш перспективне і високорентабельне. Тому в Україні за останні 15 років площі посівів соняшнику та кукурудзи зросли майже вдвічі а то і втричі досягнувши мільйони гектарів. Це

значно перевищило допустиму межу і негативно позначилося на продуктивності діючих сівозмін. Для вирішення даної проблеми є два шляхи. Перший - економічний, що передбачає створення ефективних механізмів стримування подальшого зростання площ під дані культури; другий - технологічний,

спрямований на створення нетрадиційних агротехнічних прийомів, здатних помітно скоротити термін повернення соняшнику на попереднє місце без зниження врожайності і продуктивності сівозміни.

Окремі культури, типу соняшника чи кукурудзи, мають властивість, за період вегетації поглинають із ґрунту глибиною до 5 м значну кількість вологи

та харчових сполук. Тому, для отримання запланованої врожайності, необхідно своєчасно поновлювати їх запаси. Як правило, робиться це звичайною оранкою з одночасним залученням підживлення мінеральними добривами. Однак при цьому спостерігається інтенсивне зневоднення ґрунту, погіршується його

структура та утворюється плужна підшва, яка запобігає збереженню родючості більш глибоких прошарків. До того ж, без рослинного покрову ґрунт не в змозі ефективно протистояти водній та вітрової ерозії, особливо при недостатньому внесенні органічних добрив. Незадовільно працює оранка й у якості регулятора

водного балансу, так як після опадів і високих літніх температур ефект від розпушення діє тимчасово і ґрунт швидко перетворюється у моноліт. В результаті витрати на виробництво культури зростають, стан ґрунту погіршується, врожайність зменшується.

Із числа альтернативних, перспективним являється спосіб глибокого смугового розпушення, котрий в змозі забезпечити якісний обробіток головних

зон розташування кореневих систем рослин у ґрунті при зменшених енерговитратах. Для його здійснення доцільно залучати машини з об'ємним

типом робочих органів, що мають V-подібну форму й складаються із розімкнених пар похилих стовб. Дані глибокорозпушувачі, виконуючи ґрунтозахисні функції, не створюють плужної підшви, забезпечують високу безполицеву якість розпушення.

Мета і завдання дослідження. Метою магістерської роботи є зниження енергетичних і трудових затрат основної обробки ґрунту, а також підвищення якості виконання технологічного процесу та покращення стану ґрунту за рахунок застосування об'ємного смугового глибокорозпушувача.

Для досягнення сформульованої мети в роботі були визначені такі основні завдання:

– здійснити вибір найбільш доцільного типу робочих органів смугового розпушення ґрунту;

– визначити раціональні параметри робочих органів глибокорозпушувача, за яких в міжстовбовому просторі відбувається розпушення ґрунту;

– розробити і формалізувати модель розпушення ґрунту глибокорозпушувача з похилими стовбами;

– дослідити вплив пропонованих параметрів глибокорозпушувача на енергоємність і якість розпушення ґрунту;

Об'єкт досліджень – технологічний процес глибокого смугового розпушення ґрунтового середовища та робочі органи для його здійснення.

Предмет дослідження – взаємозв'язок параметрів робочих органів смугового глибокорозпушувача з енерговитратами та якістю обробки ґрунту.

Методи дослідження. Основою теоретичних досліджень слугували теорія клина та загальні положення теорії пружності і пластичності, а також основні положення теоретичної механіки, імітаційного моделювання і вищої математики. Проведення експериментальних досліджень здійснювалось із застосуванням методів математичної статистики і планування багатofакторних експериментів. Ефективність застосування розробленого ґрунтообробного знаряддя оцінювалась за допомогою методів економічного аналізу використання техніки.

Новизна отриманих результатів.

НУБІП України
 - розроблено модель деформації ґрунтового пласта розімкненими похилими стовбами, яка враховує вплив основних параметрів робочого органу на фізико-механічні властивості ґрунту;

НУБІП України
 - отримано математичну модель, яка описує взаємозв'язок енергоємності та якості процесу смугового розпушення ґрунту з основними параметрами і режимами роботи глибокорозпушувача;

НУБІП України
 - встановлено залежність впливу конструкторських параметрів, технологічних режимів роботи і стану ґрунтового середовища на показники тягового опору

НУБІП України
 об'ємного смугового глибокорозпушувача.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ОСНОВНОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

НУБІП України

1.1. Аналіз і тенденції поліпшення основного обробітку ґрунту

Система обробітку ґрунту для технічних та олійних культур включає в себе основний, передпосівний та післяпосівний обробіток.

НУБІП України

Основний обробіток ґрунту є найважливішим технологічним процесом в отриманні запланованого врожаю. Як правило, він проводиться відповідно до

агротехнічних вимог в період між завершенням збирання попередника і

НУБІП України

настанням стійких холодів, тобто від початку серпня до першої половини листопада. Ефективність основного обробітку залежить від правильного вибору і

кваліфікованого застосування ґрунтообробної техніки з урахуванням

агрофізичних стану орного шару, кліматичних і погодних умов, особливостей

попередника, видового складу бур'янів, ступеня засміченості поля і т.д.

НУБІП України

Незважаючи на істотні відмінності, будь-який вид основного обробітку ґрунту є суцільним, глибоким і ґрунтується на застосуванні полицевої оранки.

Тому в літературі з проблем землеробства дуже часто поняття «традиційний основний обробіток ґрунту» асоціюється з поняттям «оранка».

НУБІП України

Альтернативою оранці служать ґрунтозахисні технології, засновані на безполицевому способі обробітку ґрунту із залишенням стерні та інших

рослинних решток на її поверхні. А вже полицевий обробіток – одне з найтяжчих

втручань в природну структуру ґрунту, негативні наслідки якого часто

виявляються не відразу, а через тривалий час: руйнування гумусу, запливання, втрати та водна ерозія.

НУБІП України

Це говорить про те, що оранка залишається раціональною до тих пір, поки не використаються запаси гумусу в ґрунті або поки вносяться високі дози

органічних добрив. В іншому випадку ґрунт втрачає структурність, стає

непридатним для біологічного саморозпушення і породжує необхідність в додатковій механічній обробці, ефективність якої не завжди виправдовується.

НУБІП України

Розглянемо результати досліджень найбільш важливих характеристик

процесу оранки: енергоємність, вологонакопичення, агрофізичні стан ґрунту, вміст гумусу, ерозія, засміченість. При цьому слід врахувати, що всі характеристики тісно пов'язані між собою.

Енергоємність. Оранка відноситься до числа найбільш енергоємних прийомів при вирощуванні сільськогосподарських культур. При цьому на одному гектарі, залежно від фізичного стану ґрунту, витрачається пального від 20 до 30 літрів, що в 2,5...3 рази більше в порівнянні з дрібним розпушуванням [48]. В результаті основний обробіток ґрунту споживає близько 40% енергетичних і 25% трудових витрат. [47]. Ці обставини обумовлюють пошук

абсолютно нових, нетрадиційних способів і систем обробки ґрунту на основі її мінімізації, яка в останні роки набуває все більшої популярності в багатьох країнах світу.

Вологонакопичення. Проблема поліпшення вологозабезпеченості земель є вирішальною у справі отримання високих і стабільних врожаїв. Особливо це відноситься до виробництва соняшнику та кукурудзи, які, володіючи потужною кореневою системою, споживають з ґрунту величезну кількість вологи, що використовується для вологозабезпечення не менше потужної надземної його частини [25]. Процес накопичення вологи в ґрунті складається з двох частин:

поглинання ґрунтом максимальної кількості опадів і попередження непродуктивних втрат вологи у вигляді поверхневих стоків, випарів, споживання вологи бур'янами-конкурентами і т.д.

Актуальним стає питання направлення поверхневих стоків всередину ґрунтових шарів шляхом застосування різного роду ґрунтообробних стійок замість плужних корпусів. Дослідами встановлено, що водопоплення на 53,6% залежить від пористості ґрунту, на 30,6% - від структурності ґрунту (наявності в ґрунті водостійких агрегатів розміром від 0,2 до 10мм), на 13,6% від щільності ґрунту. Механічний обробіток ґрунту покликаний збільшувати показники його пористості. Однак метою механічного обробітку ґрунту має бути не штучне тимчасове збільшення пористості і зниження щільності, а активізація в ґрунті біологічних процесів, що призводять до підвищення кількості гумусу і

поліпшенню природної структури ґрунту, її родючості.

Досвід застосування полицевої оранки показав, що інтенсивне розпушування ґрунту сприяє підвищенню вологонакопичувальних властивостей ґрунту. Однак, з іншого боку, без захисного покриття рілля швидко втрачає вологу через випаровування. Дрібне додаткове розпушування навесні і після випадання опадів у якійсь мірі знижують капілярні випаровування з нижніх ґрунтових шарів. Однак замінити раціональну вологозахисну роботу ґрунтового покриття вони не в змозі. Витрата енерговитрат і ущільнення ґрунту від пересування тракторів по полю зростає, а захисний ефект залишається мінімальним.

Численними дослідженнями не тільки в нашій країні, а й за кордоном, встановлено, що збереження на поверхні ґрунту рослинних залишків попередника, а також її мульчування рослинних решток створює своєрідний ґрунтовий покрив, котрий регулює водообмін в ґрунті, сповільнюючи процес випаровування вологи.

Агрофізичні стан ґрунту. Важливим критерієм якості оранки є поліпшення агрофізичних показників ґрунту. Для основного обробітку оптимальними показниками вважаються: щільність – $1,1...1,2 \text{ г/см}^3$, загальна пористість – $55...60\%$, твердість – $0,1...0,2 \text{ МПа}$. Переущільнений ґрунт погіршує вологоємність і умови проникнення кореневої системи в більш глибокі шари ґрунту. В результаті сповільнюється розвиток рослин, знижується врожайність.

Якісно проведена оранка в змозі забезпечити необхідне агротехнічний стан ґрунту. Однак стійкість набутих властивостей залежить від вмісту в ґрунті гумусу, його структурності, кліматичних умов. Тому для стабілізації і поліпшення агрофізики таких ґрунтів необхідно використовувати спеціальні способи основного обробітку.

Вміст гумусу. Відомо, що родючість і стійкий стан ґрунтів визначається оптимальним вмістом гумусу, котрий для чорноземів повинен складати $4,5\%$ [14]. Більшість територій України почали втрачати цей запас на початку 70-х років, саме в часи інтенсивного застосування плужних обробок ґрунту, коли

щорічні втрати гумусу становили 0,015%. В даний час вміст гумусу в орному шарі значно менше потрібного і в кращому випадку становить лише 4,2%, а по окремих районах коливається в межах 3,5...3,8% [19]. Збитки від цього величезні, так як втрата 1% гумусу в виробничих умовах призводить до великих втрат урожаю всіх сільськогосподарських культур, наприклад, соняшнику 2,7 ц/га.

Для виходу з положення, що склалося, поряд з розробкою збалансованих по гумусу систем сівозмін, необхідно розширювати застосування безполицевого ґрунтозахисного обробітку ґрунту, створювати нові типи машин, здатні в умовах глибокого безполицевого розпушування виробляти мульчування поверхні, повертати в ґрунт пожнивні рештки, сприяти швидкій їх переробці мікроорганізмами і найпростішими тваринними формами ґрунтового середовища. [25].

Ерозія. Одна з причин ерозії – висока питома вага інтенсивно оброблюваних просапних культур і чистих парів. Ефективним шляхом боротьби з ерозією є мінімізація обробітку ґрунту, тобто скорочення деяких прийомів або заміна їх внесенням гербіцидів [29]. Недодбінка протиерозійних заходів в минулому призвела до значного зниження родючості ґрунтів в Україні. Відомо, що ерозійні процеси визначаються здатністю поверхневого стоку і протиерозійної стійкістю ґрунтів. Зниження викликане втратою гумусу, погіршенням структури ґрунту, зменшенням біомаси в ґрунтовому покриві, ліквідацією ґрунтового покриву в результаті оранки. За прогнозами вчених, у майбутньому слід очікувати посилення ерозійних процесів і в зв'язку з потеплінням клімату. На думку кліматологів, посушливий клімат поступово просувається на північ, що викликає посилення ерозії в лісостеповій зоні. Наслідком потепління є підвищення модуля стоку, інтенсивності злив, збільшення числа відлиг.

Таким чином, на ґрунтах з ухилом 3 і більше градусів в протиерозійних шлях недопустиме часте застосування полицевої оранки. Сьогодні особливо актуальним стає перехід до ґрунтозахисних систем обробки ґрунту, в основі яких повинні лежати щадна безполицева обробка, нарощування біомаси ґрунтового

покриву, управління станом ґрунту не тільки на поверхні, але і на можливих глибинах.

Засміченість. Однією з проблем обробітку будь-якої культури вважається боротьба з бур'янами. Вирішується вона в значній мірі застосуванням основного обробітку. За засміченості будь-який вид основного обробітку поступається глибокій полицевій оранці, при якій глибоко зароблені у ґрунт насіння бур'янів затримуються у розвитку і частково гинуть. Це дозволяє культурним рослинам соняшнику отримати своєрідну фору. Однак при полицевій обробці значна частина насіння бур'янів в законсервованому вигляді здатна багато років знаходитися в малодоступних глибинних шарах ґрунту.

Застосування безполицевих способів основного обробітку збільшує забур'яненість посівів, однак, на відміну від полицевого обробітку, все насіння бур'янів знаходяться у верхньому шарі ґрунту і може бути знищеним, наприклад, хімічними методами боротьби. В цілому ж встановлено, що при безполицевому обробітку ґрунту економічний поріг шкідливості з боку бур'янів залишається в межах допустимого значення, врожайність при цьому може навіть зростати в межах 0...20% [49].

Сформулюємо основні напрямки поліпшення основного обробітку ґрунту, під якими будемо розуміти використання таких обробних технологій, які спрямовані на скорочення господарських ресурсів за умови збереження і збільшення врожайності вирощуваних культур. Сюди можна віднести енергетичні, трудові, матеріально-технічні, інші витрати, здатні помітно знизити собівартість обробки ґрунту і отриманого врожаю в цілому.

В останні роки сільгоспвиробники все з більшою довірою ставляться до систем землеробства з мінімальною обробкою ґрунту [16]. Нерозривно пов'язана з ними біогенна активізація верхнього шару ґрунту, через збереження рослинних залишків на поверхні, знижує згубну дію вітрів, зберігає родючість ґрунту, знижує виробничі витрати на обробіток ґрунту. Відбувається закріплення в ґрунті рухомих елементів живлення, стабілізується оптимальний рівень вмісту гумусу. Найбільш гостро це проявляється в роки з посушливою осені, коли

приріст врожаю соняшнику за рахунок застосування поверхневого обробітку ґрунту замість традиційної оранки може досягти 7ц/га. У зв'язку з цим великий інтерес представляє застосування глибокорозпушувача.

Високим попитом користується недорога комбінована, високопродуктивна протиерозійна техніка, здатна виконувати за один прохід одночасно 2...6 технологічних операцій. Її використання призводить до зниження собівартості вирощуваної культури за рахунок зниження витрат на основний обробіток ґрунту і збільшення її врожайності. Таким чином, застосування комбінованої ґрунтообробної техніки є одним з пріоритетних напрямів поліпшення основного

обробітку ґрунту [36]. Однак важливо пам'ятати, що успіх створюваної комбінації машини визначається компактністю задіяних пристроїв і їх взаємної сумісності. У зв'язку з цим найбільш перспективними є способи смугового розпушування ґрунту і суцільне дрібне розпушування ґрунту одночасно з смуговим розпушуванням. Вони дозволяють не тільки заощадити енерговитрати, а й підвищити ерозійну стійкість поверхні ґрунту зберегти і додатково накопичити енергію ґрунту у вигляді гумусу.

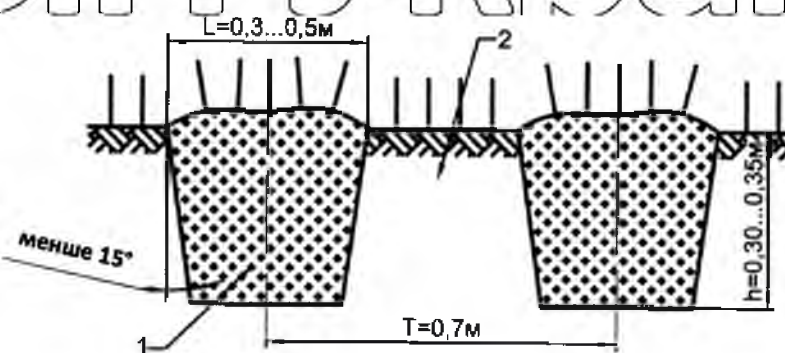


Рис.1.1. Технологічна схема смугової обробки ґрунту під обробіток просапних культур: 1 – оброблена смуга; 2 – необроблена смуга.

Основний обробіток ґрунту в технологічному ланцюгу обробітку займає дуже важливе місце, але існує багато проблем, які потребують вирішення. При цьому основні пріоритети досліджень слід направити на наступне:

- скорочення найбільш енергоємних видів обробки ґрунту, в основі яких традиційно лежить полицева оранка, і перехід до глибокої безполицевої обробки ґрунту;

- суміщення глибокого обробітку ґрунту з одночасним закладенням в ґрунт на задану глибину поживних і структуроутворюючих елементів;

- освоєння комбінації суцільний поверхневого обробітку ґрунту з глибокої смугової обробкою;

- насичення ґрунтової поверхні органікою, мікроелементами, гумусом, іншими адсорбентами, з метою створення надійного ґрунтового покриву для

ефективного регулювання водного, повітряного і теплового режимів ґрунту, захисту її від ерозії;

- зниження вартості ґрунтообробної техніки, збільшення її продуктивності.

1.2. Варіанти робочих органів глибокорозпушувача для смугового обробітку ґрунту

Глибоке смугове розпушування є перспективним, нетрадиційним ґрунтозахисним видом обробки ґрунту. Воно застосовується з метою збереження

та ефективного відновлення родючих ресурсів орних горизонтів. Відрізняється

від суцільного глибокого розпушування тим, що обробці піддається тільки частина поверхні поля, з максимально можливим збереженням ґрунтового покриву.

У землеробстві відомий набір пасивних і активних технічних пристроїв, за допомогою яких можна виробляти глибоке смугове розпушування ґрунту. Серед

них перспективними є пасивні ґрунтообробні органи: низький розпушувач з вертикальною похилою стовбою, розпушувач об'ємного типу. Для здійснення

смугового розпушування робочі органи встановлюються по фронту роботи знаряддя з деяким інтервалом, котрий в змозі забезпечити виконання заданої

обробки ґрунту.

Розглянемо технологічний процес і конструкції робочих органів, які в тому чи іншому наближенні можуть відтворити заданий профіль смугової обробки.

Робочий орган чизельного типу з вертикальною стійкою забезпечує безпощадне розпушування ґрунту. Являє собою пряму або вигнуту по ходу руху агрегату стійку з ґрунтосбробними елементами у нижньої основи, котрий викликає сколювання ґрунту по ходу руху агрегату і по боках, забезпечуючи при цьому хороше занурення знаряддя [17].

Застосування стовб чизельного плуга дозволяє пошпити фізичні властивості ґрунту в орному і підорному горизонтах за рахунок забезпечення заданої глибини розпушування без обороту пласта. Це сприяє більш ефективному накопиченню запасів вологи, краще їх розподілу по периметру

обробки, руйнування плужної підшви, збільшення товщини кореневого шару, збереженню на поверхні до 60% стерні, яка захищає ґрунт від дефляції і зберігає верхній орний шар від ерозії.

Вертикальні розпушувальні стовби використовуються у чизельних плугах типу ПЧ-4.5, ПЧ-2.5 (рис. 1.2). Застосування ПСТ-2.5 необхідно для вирівнювання гребнистої поверхні і додаткового кришення ввернутих на поверхню брил.



Рис. 1.2. Чизельний плуг ПЧ-2.5 з пристосуванням ПСТ-2.5

Представником чизельних плугів є глибокорозпушувач John Deere 915 ширина захвату від 2,5 до 7,0 м, максимальна глибина обробки 0,6 (рис.1.3).

Розпушувальні стовби прямі, на замовлення поставляються безпечні стовби, параболічні, з автоматизованим поверненням в початкове положення. Кількість стовб – 5, 7, 9, 11, 13, відстань між ними 50,8 см, 63,5 см або 75,2 см.



Рис 1.3. Глибокорозпушувач John Deere моделі 915

Робочий орган чизельного типу з похилою стовбою служить для поглиблення орного горизонту без обороту пласта, розпушування парів і ріллі, поліпшення луків і пасовищ. За рахунок того, що ґрунт після еколювання рухається похилою стовбою (рис.1.4), відбувається додаткове розпушування, підвищується якість обробки.



Рис. 1.4. Робота похилих стовб плуга-розпушувача «Fagorlow»

Крім цього, за рахунок нахилу стовби знижується тяговий опір, забезпечується більш вирівняна поверхня обробки. Під впливом глибокого розпушування похилими стовбами об'ємна маса ґрунту зменшується на 3...41%, пористість збільшується на 4...10 %, а водопрохідність зростає в кілька разів

[30]. Обробіток цими засобами забезпечує додатково накопичення в ґрунті продуктивної вологи на 12...15 мм, що при обробленні соняшнику дуже важливо.

Цікавою є тенденція використання параболічних робочих органів з метою надання більшої жорсткості стовбам [4] (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Плуг розпушувач з параболічними стовбами «Delta Plow»

Робочий орган об'ємного типу (Рис. 1.6) складається з двох похилих стовб 1, замикає які долото або леміш 2. Такі робочі органи називають V-подібними і використовуються для глибокої (до 1 м) меліоративної обробки. При об'ємному розпушуванні руйнування ґрунту відбувається трьома способами: різанням в горизонтальній площині лемешем і у вертикальній площині бічними ножами, стисненням бічними стінками, «гравітаційним гадінням» пласта вниз з висоти з одночасним його стиранням. Ці способи забезпечують максимальну якість обробки ґрунту. Оброблене об'ємним розпушуванням поле зберігає стерньових покрив на 90...95%, не має на поверхні брід. При такому розпушуванні найбільш інтенсивно протікає процес утворення ґрунтових мікропор розміром 200...300 мкм, що сприяє не тільки підвищенню вологості ґрунту, але і швидкому відновленню її природної родючості. В результаті обробки спостерігається збільшення пористості ґрунту на 15...20%, а також поліпшення її фільтраційної здатності [33]. Ефект об'ємного розпушування ґрунту зберігається протягом 2-3 років [11].

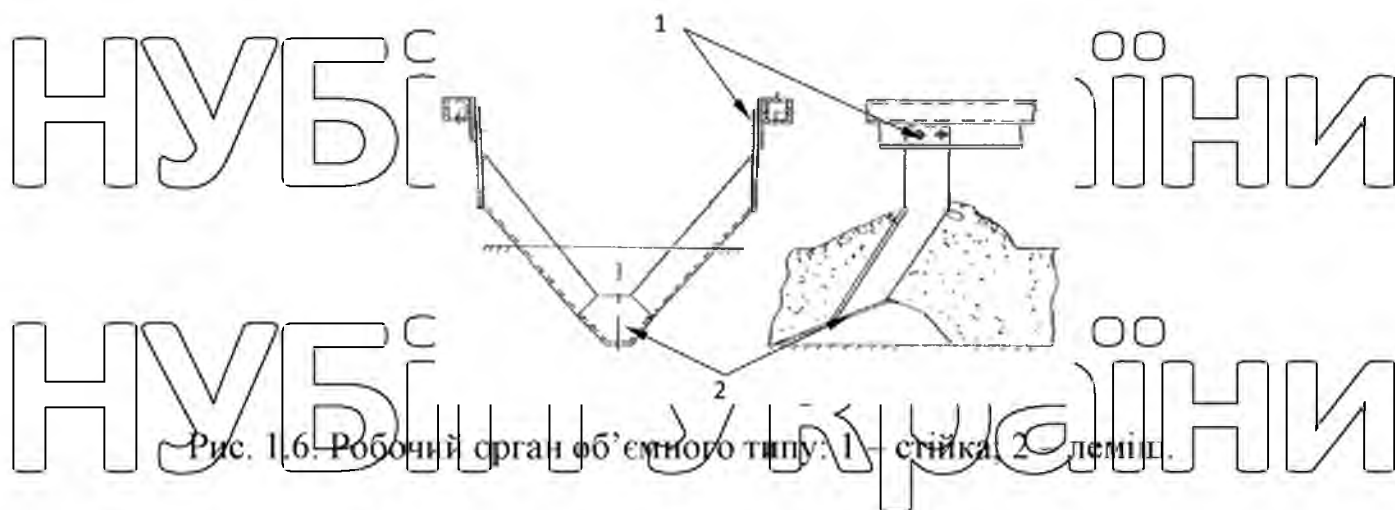


Рис. 1.6. Робочий орган об'ємного типу: 1 – стійка, 2 – плечі.

Поліпшення водно-повітряного і теплового режимів ґрунту позитивно відбивається на врожайності сільськогосподарських культур [36], підтверджуючи тим самим високу ефективність застосування об'ємного глибокого розпушування.

1.3. Порівняння робочих органів для смугової обробки ґрунту

Порівняємо вищеписані робочі органи і виберемо з них найбільш підходящий для смугової обробки. Параметри робочих органів можуть колитися в залежності від марки машини або її налаштувань. Критерії порівняння: якість розпушування і повнота смугової обробки. Критерій якості - ступінь розпушування. З урахуванням рівності щільності ґрунту

$$\varepsilon = \frac{v_{<5}}{V}, \quad (1.1)$$

де $v_{<5}$ - обсяг частинок розміром менш 5 см;

V - загальний обсяг проби.

Цінність обробки зростає з глибиною, оскільки при цьому волога накопичується в нижніх шарах, звідки менше випаровується. Отже, критерієм повноти обробки може служити статичний момент площі S , котрий, оцінюючи величину площі кожного обробленого шару, враховує його віддаленість від поверхні поля (рис 1.7).

$$S = \int_0^h b_1 \cdot h \, dh, \quad (1.2)$$

де b_1 - ширина смуги на глибині h .

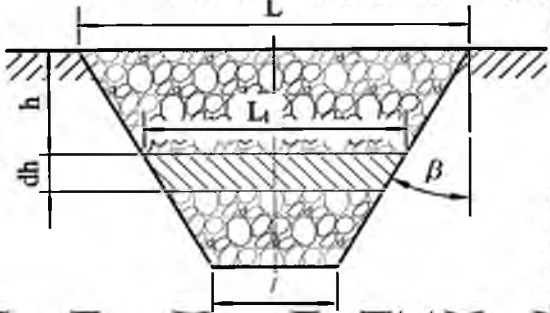


Рис. 1.7. Визначення статичного моменту площі

Визначимо умови порівняння різних робочих органів один з одним. З теорії подібності два процеси обробки ґрунту подібні при дотриманні сталості відношення витрачених на їх здійснення зусиль P_1/P_2 . З урахуванням закону Ньютона ця умова має вигляд:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{A_1 \rho_1 v_1^2}{A_2 \rho_2 v_2^2} \quad (1.3)$$

де A_1 і A_2 - площі перерізів оброблених смуг;
 ρ_1 і ρ_2 - щільності ґрунту;
 v_1, v_2 - швидкості обробки.

Оскільки ґрунт і швидкість обробки у всіх випадках порівняння незмінні, критерій подібності набуває вигляду:

$$\frac{P_1}{A_1} = \frac{P_2}{A_2} = \dots = \frac{P_i}{A_i} \quad (1.4)$$

Припустимо, що для порівнюваних варіантів обробки, сили опору розпушування взаємно рівні. Тоді для дотримання критерію подібності необхідне дотримання рівності площі поперечних перерізів оброблюваних смуг.

При порівнянні, повноту смугового розпушування можна оцінити коефіцієнтом, рівним відношенню статичного моменту обробленої площі до його сталого значення. За еталон обробки приймемо прямокутний поперечний профіль. Після інтегрування (1.2) для прямокутного поперечного профілю смуги отримаємо:

$$\eta = \frac{2 \cdot h_e}{h_s} \quad (1.5)$$

де η - коефіцієнт повноти обробки,
 h_s - відстань від поверхні до центра ваги перерізу,
 h_e - глибина еталонної обробки.

Керуючись агротехнічною доцільністю, задамо для порівняння такі параметри еталонної смуги: глибина $h_e = 0,3$ м, ширина $l_s = 0,5$ м.

В кінцевому рахунку, загальний коефіцієнт застосовності робочого органу для смугової обробки повинен скласти добуток ступеня розпушування ε на коефіцієнт повноти обробки η :

$$\varepsilon_{заг} = \varepsilon \cdot \eta \quad (1.6)$$

Робочий орган чизельного типу з вертикальною стовбою. При роботі чизельної вертикальної стовби (ЧВС) розпушування відбувається шляхом сколювання і підняття пласта ґрунту 2 (рис. 1.8) лемішем 3, який є двограним клином. Відхилення β бічної площини відколу від вертикалі [49]:

$$\beta = \arctg \left[\frac{0.66 \cdot \text{ctg} \phi_2}{\cos(\alpha_p + \phi_2)} \right] \quad (1.7)$$

де α_p - кут нахилу леміша до горизонталі, прийємо $\alpha_p = 20^\circ$;
 ϕ_2 - кут внутрішнього тертя, прийємо $\phi_2 = 30^\circ$.

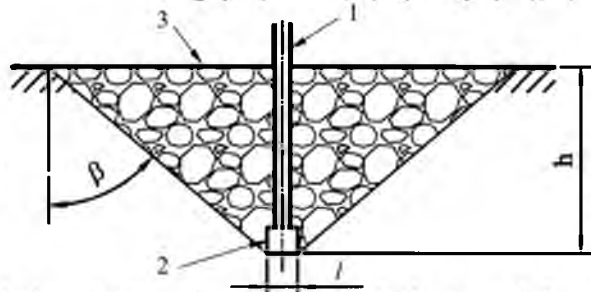


Рис. 1.8. Поперечний переріз смуги, обробленої робочим органом чизельного типу з вертикальною стовбою: 1 - стійка; 2 - леміш; 3 - оброблювана смуга.

Глибину обробки знайдемо з формули площі трапезії:

$$h^2 \cdot \text{tg}(\beta) + l \cdot h - A = 0 \quad (1.8)$$

де l – ширина лемеша;
 A – площа обробленої трапеції.

Величина l коливається в межах 0,05...0,20 м. При однаковій площі статичний момент S буде більшим при обробітку ґрунту більш вузьким лемешем, тому прийmemo $l = 0,05$ м. Тоді ступінь розпушування для чизеля з вертикальною стовбою буде дорівнювати $\varepsilon = 0,25$ [33, с. 31].

Робочий орган чизельного типу з похилою стовбою. Технологічний

процес розпушування чизельної похилої стовби (ЧПС) (рис. 1.9) починається, як і у ЧВС, зі сколювання призми ґрунту лемешем 2. Тому параметри сколювання перетину для цього робочого органу будуть такими ж. Після відколу пласт рухається по стійці 1, нахилоною до вертикалі на кут $\beta_1 = 45^\circ$ [33]. В результаті відбувається додаткове подрібнення нерівнобічної призми 3 площею A_1 до ступеня розпушування $\varepsilon_1 = 0,5$ [33]. Замінивши у формулі (1.7) обсяг на п'ятому величину, чисельно рівну площі, отримаємо загальний ступінь подрібнення ґрунту чизельної похилої стовби:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 \cdot A_1 + \varepsilon_2 (A - A_1)}{A} \quad (1.9)$$

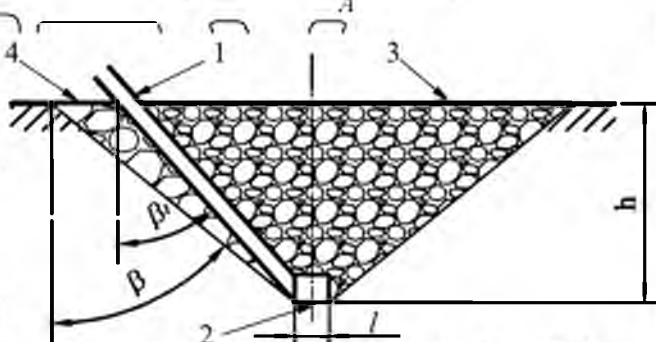


Рис. 1.9. Поперечний переріз смуги, обробленої робочим органом чизельного типу з похилою стовбою. 1 - стійка; 2 - леміш; 3 - смуга, оброблена зі ступенем розпушування ε_1 ; 4 - смуга, оброблена зі ступенем розпушування ε_2 .

Робочий орган об'ємного типу із замкнутим контуром.

Використовуючи пару похилих стовб, можна підвищити ступінь кришення м ж

ними до $\varepsilon_1=0,81$ [38] (рис 1.10). При цьому загальний ступінь кришення об'ємного розпушування із замкнутим контуром (ОРЗК) визначимо за формулою (1.9), аналогічно ПНС, при $\beta_1 = 30^\circ$; $l=0,18$ м [48]. Робочі органи цього типу використовуються для меліоративного розпушування на глибину до 1м [18].

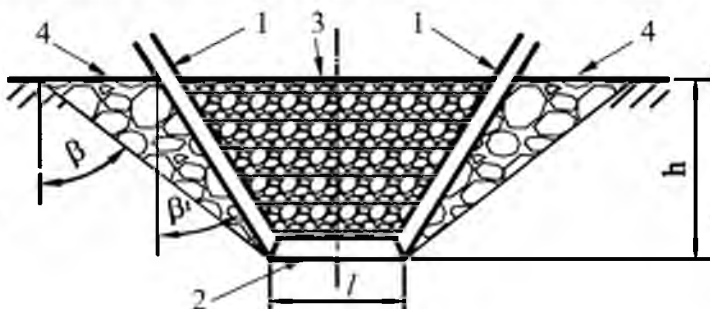


Рис. 1.10. Поперечний переріз смуги, обробленої робочим органом об'ємного типу із замкнутим контуром: 1 - сійка; 2 - леміш; 3 - смуга, оброблена зі ступенем розпушування ε_1 ; 4 - смуга, оброблена зі ступенем розпушування ε_2 .

Робочий орган об'ємного типу з розімкненим контуром. При обробці ґрунту похилими стовбами на глибину до 0,4 м леміш 2 (рис 1.12) можна не використовувати. Розпушувач з таким робочим органом назовемо об'ємним розпушувачем з розімкненим контуром (ОРПК) (рис.1.11).

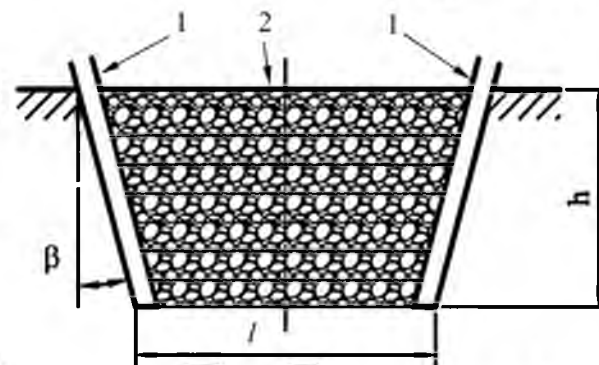


Рис. 1.11. Поперечний переріз смуги, обробленої робочим органом об'ємного типу з розімкненим контуром: 1 - сійка; 2 - оброблена смуга.

Його технологічний процес роботи аналогічний процесу ОРЗК. Однак на першому етапі ґрунт сколюється не лемешем, а безпосередньо стовбами. При цьому кут нахилу бічних площин сколу β можна прийняти рівним куту нахилу стовба (прийнемо $\beta=10^\circ$), тоді $\varepsilon=0,81$. Оскільки у розглянутого робочого органу

відсутній леміш, відстань l може бути змінною. Заданою глибиною $h=h_e$ і знайдемо l :

$$l = \frac{4 - h^2 / \text{tg}^2 \alpha}{h} \quad (1.11)$$

Використовуючи отримані дані, можна порівняти якість смугової обробки,

виконаної різними робочими органами (рис.1.12).

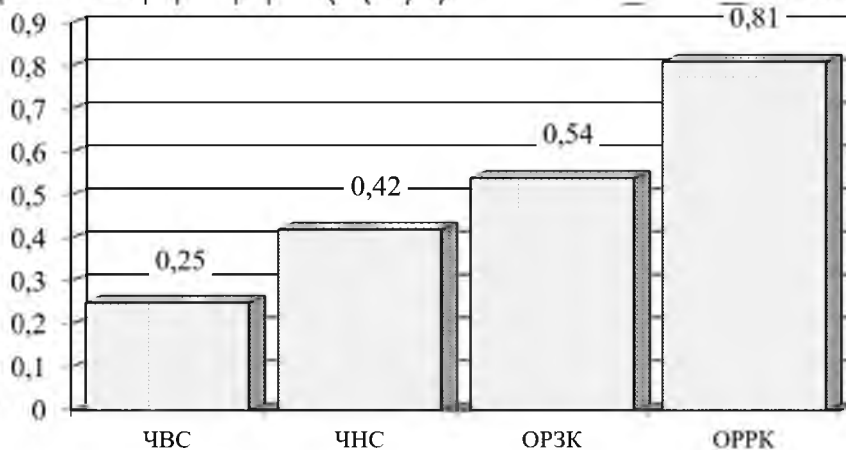


Рис.1.12. Якість розпушування ґрунту безпліцевими робочими органами

Одиночний леміш (ЧВС) не в змозі забезпечити високої якості розпушування ($\epsilon=0,25$). Однак якість можна підвищити за рахунок переміщення ґрунту по поверхні похилої стовби ($\epsilon = 0,42$ у ЧПС), а ще краще - застосувавши об'ємне розпушування. Причому, відмовившись від використання горизонтального лемеша (ОРПК), розпушування можна обмежити лише міжстовбним простором, досягнувши при цьому його максимальної якості ($\epsilon=0,81$).

Використання горизонтального лемеша призводить до формування смуги трапецієдальної форми з великим (до 60°) кутом нахилу бічних стінок. Тому у чизельних стовб коефіцієнт повноти розпушування становить всього 0,64. Збільшення ширини лемеша ще зменшує цей коефіцієнт (до 0,62 у ОРЗК). Зате використання ОРПК дозволяє довести коефіцієнт повноти розпушування до 0,95 за рахунок формування смуги безпосередньо стовбами.

Перемноживши коефіцієнти згідно (1.6), отримаємо значення, що визначають застосовність робочих органів для смугового обробки. В результаті

можна зробити висновок, що об'ємний розпушувач з розімкненим контуром є найбільш підходящим для смугової обробки ґрунту ($\epsilon_{заг} = 0,77$).

1.4 Компонувальна схема і параметри пропонуваного робочого органу

для смугової обробки ґрунту

До основних параметрів об'ємного глибокорозпушувача слід віднести (рис.1.13): поперечний β і поздовжній γ кути нахилу стовб розпушувача, товщину стовб t , міжстовбна відстань L , кут загострення стовб α . Параметри конструкції

повинні забезпечувати можливість здійснення заданої технології обробки

ґрунту [13]. Тому деякі з них теж мають свої межі: поперечний кут нахилу стовб - $0...15^\circ$, міжстовбна відстань $0,3...0,5$ м. Режим роботи смугового глибокорозпушувача характеризується його швидкістю руху і глибиною обробки ґрунту.

Між геометричними параметрами і режимами роботи існує взаємозв'язок, яка призводить до спільного впливу як на якість обробки ґрунту, так і на енергоємність забезпечується процесу.

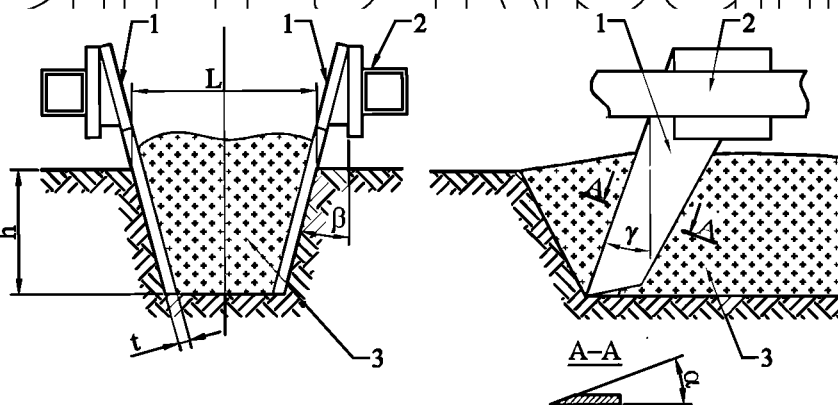


Рис.1.13 – Схема глибокорозпушувача: 1 - похилі стовби; 2 - рама; 3 - оброблювана смуга.

За результатами досліджень, проведених вітчизняних вчених Б.А. Шелудченка, А.Н. Панченка та ін. в залежності від розв'язуваної задачі і конструкції робочих органів глибина h основного обробки може змінюватися від $0,3$ до $1,0$ м, міжстовбна відстань - від $0,4$ м до $2,4$ м, крок T обробки - від $0,8$

до 3,0 м, швидкість V обробки - від 0,068 м/с до 1,000 м/с, поперечний кут нахилу стовб β - від 20° до 35° , поздовжній кут нахилу стовб γ - від 25° до 72° , кут заострення ножів - 25° [6, 7, 26]. Відстань між нижніми підставами ножів не

може бути меншим 18 см, оскільки в іншому випадку спостерігається забивання похилих стовб ущільненої ґрунтом, що приводить до різкого зростання енерговитрат.

За нашими спостереженнями на процес об'ємного розпушування ґрунту великий вплив робить товщина похилих стовб і її відношення до міжстовбної відстані. Однак на сьогоднішній день результати досліджень з даної проблеми у пресі відсутні.

При порушенні симетричності поперечного кута нахилу стовб спостерігається виникнення бікового зусилля, яке може привести до поперечного відведення робочого органу з переміщенням розпушеного пласта ґрунту вгору і на одну зі сторін. Значний вплив на тяговий опір робочого органу об'ємного типу надає глибина обробки (Рис. 1.14), але при цьому зі збільшенням глибини збільшується і деформація пласта, тобто ступінь його кришення [18].

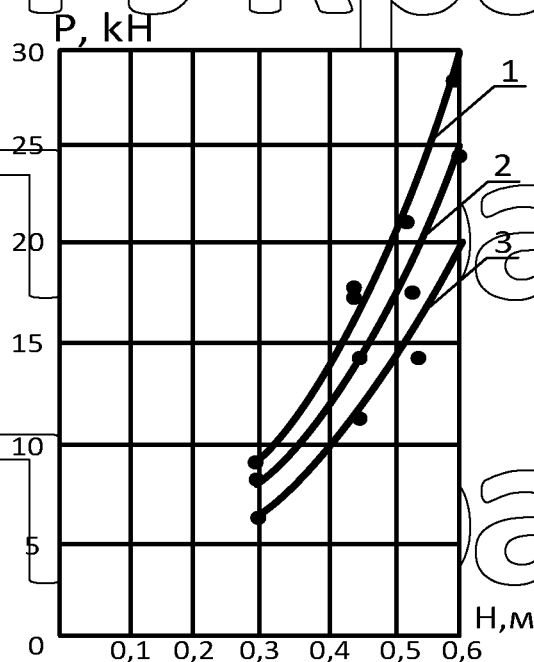


Рис. 1.14. Залежність тягового опору розпушувача РГ-0,5м від глибини обробки

Висновки розділу 1:

1. Для проведення смугової обробки ґрунту на глибину 0,30...0,35 м, найбільш підходящим робочим органом є об'ємний розпушувач з розімкненим контуром.

2. Область застосування об'ємних розпушувачів обмежена обробкою підорних шарів важких ґрунтів, глибина яких становить 0,40...0,85 м. При цьому ширина оброблюваних смуг коливається в межах 1,0...2,4 м;

3. Ґрунтообробні машини об'ємного типу використовуються для суцільного розпушування, швидкість обробки ґрунту низька - 0,06...1,00 м/с.

4. З конструктивних параметрів найбільш дослідженим слід вважати поперечний кут нахилу бічних стовб, що становить 25...30°. Поздовжній кут нахилу бічних стовб досліджений менше, запропонована його величина коливається в межах 30...48°. Рекомендоване значення кута заточування ножів - 25°.

5. Слід вважати вплив товщини похилих стовб на процес об'ємного розпушування істотним. Проте, залишаються недослідженими співвідношення між товщиною стовб і шириною оброблюваної смуги, товщиною стовб і енергоємністю процесу, товщиною стовб і якістю обробки ґрунту.

6. Значним недоліком існуючих досліджень є відсутність необхідної комплексності, що не дозволяє в повній мірі застосовувати отримані результати в практиці проектування робочих органів об'ємних глибокорозпушувача. При цьому важливо відзначити, що до складу комплексу повинні входити не тільки процеси взаємодії робочих органів з ґрунтом, а й особливості вирощуваних культур.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ СМУГОВОГО ГЛИБОКОРОЗПУШУВАЧА І ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО РОБОЧИХ ОРГАНІВ

2.1 Вибір математичної моделі ґрунту для дослідження об'ємного розпушування

Існує три основні типи моделей ґрунту [23, 34]: тверде тіло, суцільне середовище і дискретне середовище.

Моделюючи ґрунт, як тверде недеформаційне тіло, всі розрахунки ведуться методами теоретичної механіки. При вирішенні завдань взаємодії робочого органу з ґрунтом, з боку робочого органу діють сили зводяться до головного вектору та головного моменту сил, які іноді переносяться до носка клина. При цьому в розрахунковій схемі і її аналітичних наслідки відсутня властивість деформації ґрунту. При використанні цієї моделі передбачається розвиток тріщини в ґрунті по лінії дії головного вектора сил. [34].

Використання моделі твердого тіла для рішень завдань впливу ґрунтообробних органів на ґрунт виключає можливість врахувати її механічні властивості і здатність змінювати об'ємну масу в процесі обробки [34]

Найпоширенішою моделлю ґрунту є «суцільне середовище». Під цим поняттям мають на увазі модель такого матеріального тіла (твердого, рідкого або газоподібного), яке хоча і складається з окремих частинок, але заповнює частину простору безперервним (суцільним) чином. Безперервність будови такого ідеалізованого тіла зберігається в процесі деформування. Гіпотеза про безперервність матеріального тіла дозволяє, розглядаючи напруження і деформацію нескінченно малих обсягів і використовуючи апарат диференціального обчислення, переходити до вивчення напружено-деформованого стану всього тіла [19].

Однак ґрунт, по суті, є не суцільною, а дискретним середовищем, оскільки вона являє собою поєднання окремих частинок, між якими є вільні простору, заповнені повітрям або водою. Тому реальною моделлю ґрунту буде модель, яка

описує взаємодію окремих частинок з урахуванням фізичного виду зв'язків між ними.

Таким чином, ґрунт слід розглядати як пружно-в'язкопластичне деформоване середовище. Однією з найбільш поширених моделей цього середовища є модель Шведова (рис. 2.1) [35, 44].

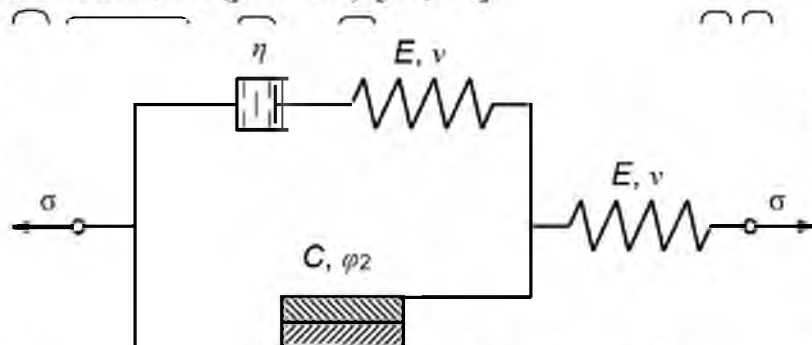


Рис 2.1. Пружно-в'язкопластична модель Шведова: E - модуль пружності; ν - коефіцієнт Пуассона; C - коефіцієнт зчеплення; φ_2 - кут внутрішнього тертя; η - коефіцієнт в'язкості.

Використання повної реологічної моделі веде до ускладнення досягнення мети, тому для вирішення конкретних завдань використовують моделі (в'язкопружні або пружно-пластичні) [44]. Академік Г.Є. Листопад провів експеримент

по визначенню впливу різних властивостей ґрунту на тяговий опір [45].

Досліджувався вплив наступних властивостей: модуля пружності, коефіцієнта зчеплення, кутів внутрішнього і зовнішнього тертя, коефіцієнта динамічної в'язкості. Ці дослідження показали, що при вологості ґрунту 16...18%

найбільший вплив на тяговий опір чинять модуль пружності і коефіцієнт

зчеплення, тобто властивості, що визначають пружно-пластичну середовище. Їх частка в загальному тяговому балансі становить 73,4%. У той же час вплив коефіцієнта в'язкості, що визначає ґрунт як «в'язку рідину» порівняно невелика

- 4,2%. Ці результати справедливі для ґрунтів, що піддаються основному

обробі, вологість яких, як правило, не перевищує 18%. Тому для вирішуваних

в даній роботі завдань слід використовувати вироджену модель ґрунту - нелінійну пружно-деальнопластичне середовище Спрандтля (рис.2.2).

Нелінійність проявляється в зміні інтенсивності наростання деформацій зі збільшенням напружень; пружність - в наявності у ґрунту деформацій, прямо пропорційних напруженню; пластичності - в здатності ґрунту текти; ідеальність - у відсутності зміцнення.

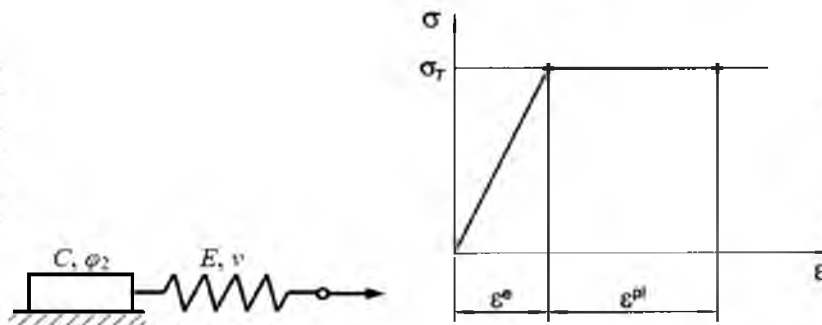


Рис. 2.2. Пружно-деальнопластичне середовище Прандтля: а) механічна модель; б) реологічна крива.

Слід мати на увазі, що механіка суцільного середовища не розглядає процеси та мікропроцеси, які відбуваються в реальних тілах і не враховує особливостей будови тіла - ці питання належать до завдань фізичної теорії.

Для пружно-ідеальнопластичної моделі загальна деформація складається з пружної і пластичної складової (рис. 2.2, б):

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^e\} + \{\varepsilon^{pl}\} \quad (2.1)$$

де $\{\varepsilon\}$ - вектор загальних деформацій;

$\{\varepsilon^e\}$ - вектор пружних деформацій;

$\{\varepsilon^{pl}\}$ - вектор пластичних деформацій.

На початковому етапі навантаження ґрунт поводить себе як пружне середовище. Деформації визначаються з узагальненого закону Гука:

$$\{\sigma\} = [E] \cdot \{\varepsilon^e\} \quad (2.2)$$

де $\{\sigma\}$ - вектор напружень;

$[E]$ - матриця пружності, для просторової задачі вона має вигляд:

$$[E] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

де ν - коефіцієнт Пуассона,

E - модуль пружності при розтягуванні-стисненні.

Коли величина еквівалентного напруження σ_e досягає межі текучості σ_T , в матеріалі починають розвиватися пластичні деформації. Існує ряд теорій міцності, що визначають еквівалентні напруження (Треска, Сен-Венана, Губера-Мізеса, Мора) [7, 31, 37]. Для сипучих середовищ і ґрунту рекомендується використовувати теорію міцності Друкера-Прагера [10]:

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \sqrt{\frac{1}{2}\{s\}^T[M]\{s\}}; \quad (2.4)$$

де σ_m – середня або гідростатична напруга:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z);$$

$\{s\}$ – девіатор напружень;

β – постійна матеріалу;

$[M]$ – матриця мас:

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Ця теорія міцності є модифікацією теорії міцності Губера-Мізеса, з урахуванням впливу гідростатичного напруження σ_m .

Константа матеріалу β визначається за формулою:

$$\beta = \frac{2 \sin \phi_2}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi_2)} \quad (2.5)$$

де ϕ_2 – кут внутрішнього тертя.

Межа плинності дорівнює:

$$\sigma_T = \frac{6C \cdot \cos \phi_2}{\sqrt{3(3 - \sin \phi_2)}} \quad (2.6)$$

де C – коефіцієнт зчеплення.

Якщо встановлено, що умова плинності виконується, тоді напрямки і величини пластичних деформацій будуть визначатися законом течії [7]:

$$\{d\varepsilon^{pl}\} = \lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \quad (2.7)$$

де $\{d\varepsilon^{pl}\}$ – приріст пластичної деформації;
 Q – пластичний потенціал, котрий визначає напрямки пластичних деформацій і є функцією напруження;
 λ – узгоджувальний множник, що обумовлює величину деформацій.

З вищевведених рівнянь видно, що для моделювання ґрунту пружно-ідеальнопластичного середовища необхідно знати такі його механічні характеристики: **пружність** (модуль пружності E , коефіцієнт Пуассона ν); **пластичність** (кут внутрішнього тертя ϕ_2 , коефіцієнт зчеплення C).

Однак, незважаючи на велику перспективність дослідження ґрунту, як суцільного середовища, не слід забувати і про інші моделі. Так, існує ряд завдань, які можна успішно вирішити, моделюючи ґрунт як тверде середовище. До таких завдань належить дослідження сколювання ґрунту.

2.2. Дослідження впливу параметрів робочого органу на форму оброблюваної смуги

Сколювання ґрунту - перший етап об'ємного розпушування. Ця операція визначає форму поперечного перерізу оброблюваної смуги. Найбільш раціональною є форма, що повторює фронтальну проекцію робочого органу. Цього можна досягти, якщо бічна площина відколу співпадає з площиною переміщення ріжучої кромки стовби (рис. 2.3, б).

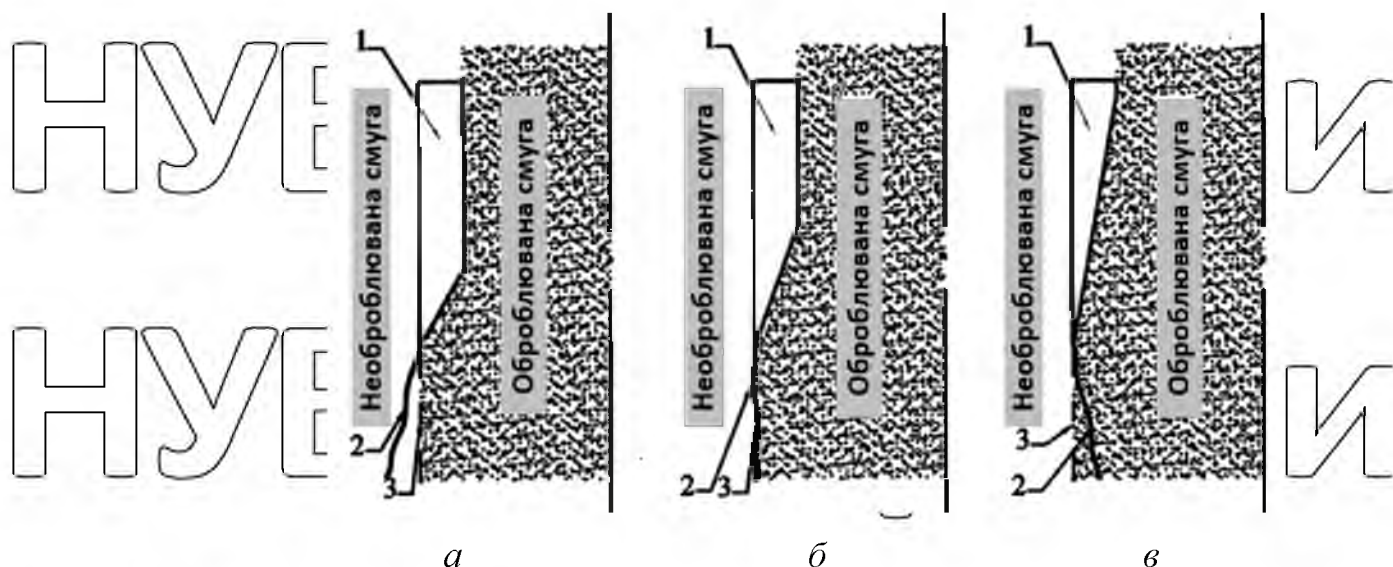


Рис. 2.3. Можливі варіанти розташування площині відколу при смуговому розпушуванні: *а*) - площина відколу проходить по необробленій смугі; *б*) - площина відколу збігається з площиною руху ріжучої кромки стовби; *в*) - площина відколу проходить по обробленій смугі; 1 - стійка; 2 - площина відколу; 3 - площина переміщення ріжучої кромки.

При цьому виключається зайві витрати на розпушування необробленої смуги в разі відхилення площини відколу в її сторону (рис. 2.3, *а*) і витрати енергії на прорізання ріжучою кромкою нової площини в разі відхилення площини відколу в сторону обробленої смуги (рис. 2.3, *б*). Слід також зазначити, що енергетичні витрати руйнування ґрунту по випереджаючій тріщині значно нижче витрат на різання непошкодженого матеріалу [31].

Напруження біля вершини тріщини визначається за такою формулою:

$$\sigma_x \approx \sigma_0 \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right), \quad (2.8)$$

де σ_0 – напруження, що виникають від заданого навантаження;

a - довжина тріщини;

ρ - радіус кривизни в вершині тріщини.

З формули (2.8) видно, що при одному і тому ж витраченому зусиллі зі зменшенням радіусу кривизни, напруження біля вершини тріщини значно

зростають, а отже, тяговий опір падає. Для дослідження процесу сколювання ґрунту скористаємося моделлю твердого тіла. У зв'язку з цим введемо такі припущення: пласт є нерухомим твердим тілом; механічні характеристики ґрунту постійні у всьому обсязі.

При русі двогранного клина в ґрунті утворюється призма відколу (рис. 2.4), у якій передня площина $ADGF$ нахилена до горизонталі під кутом ψ .

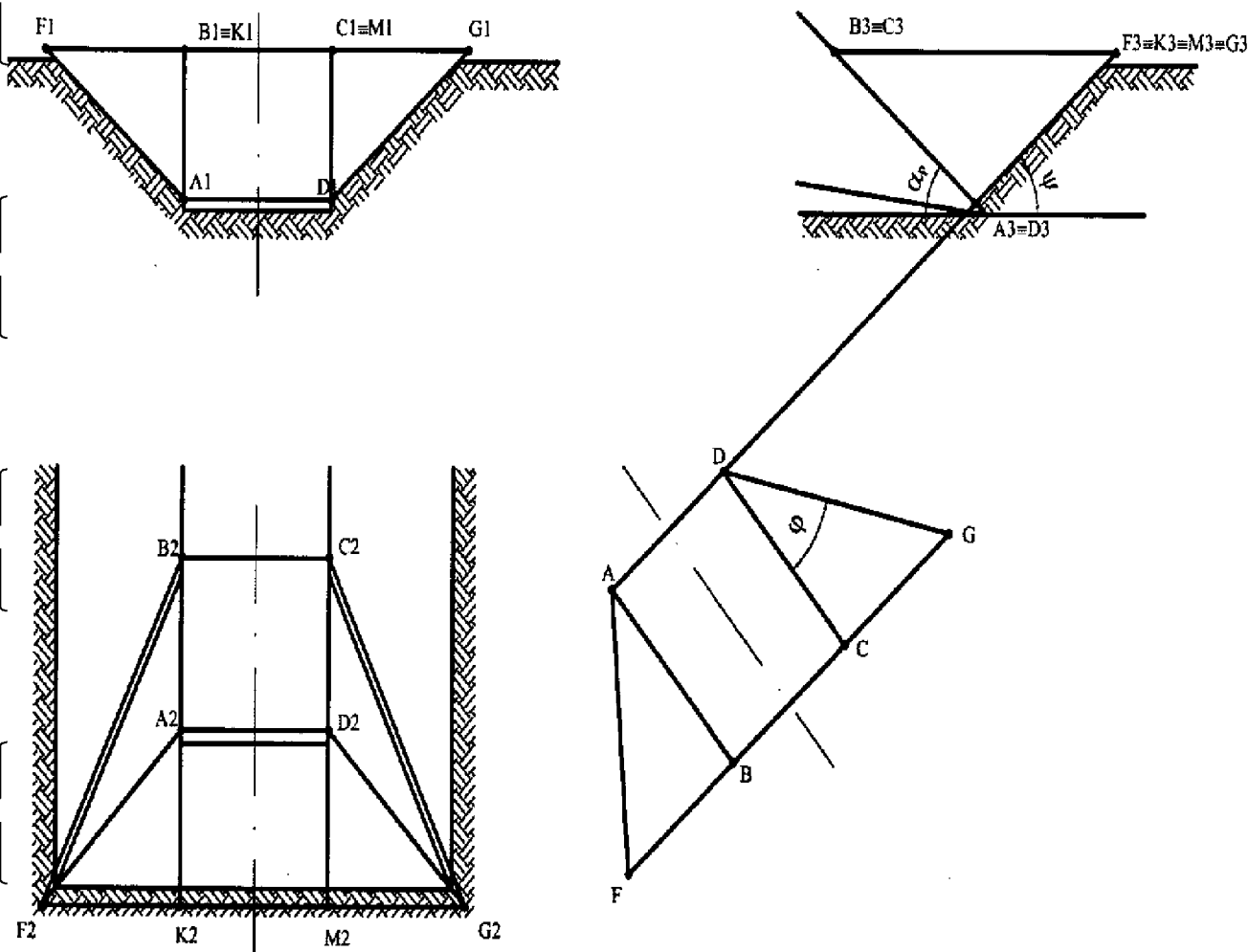


Рис. 2.4. Робота двогранного клина

Бічні площини з одного боку проходять через бічні грані клина, а з іншого боку перетинають передню площину по лінії, нахиленої під кутом φ до проекції поверхні клина на цю площину. Кут φ знаходиться за формулою:

$$\varphi = \arctg(0,66 \operatorname{ctg} \varphi_2) \quad (2.9)$$

Роботу похилої стовби можна уявити як роботу тригранного клину, яка ідентична роботі двогранного клина, повернутого навколо вертикальної осі на

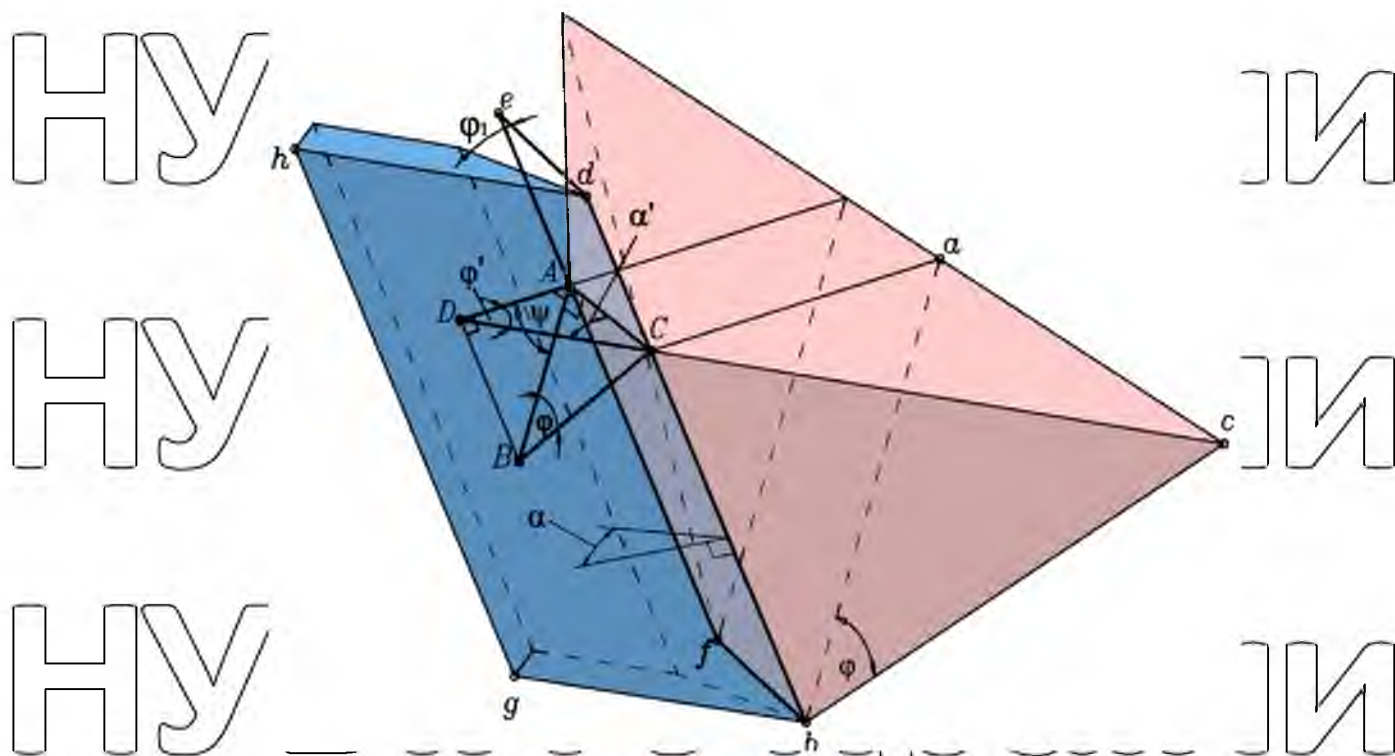


Рис. 2.6. Визначення кута заточування стовби

Проведемо горизонтальну пряму AC , що належить антифрикційній площині $bdef$. Перпендикулярно цій площині проведемо ще одну горизонтальну пряму AD до перетину з площиною $bdhg$. Отриманий прямокутний трикутник ADC лежить в горизонтальній площині. Передня площину відколу утворює з

горизонтальною поверхнею кут φ . Проведемо пряму AB , паралельну цій площині і перпендикулярну прямій AC до перетину з $bdhg$. Отримаємо прямокутний трикутник ABC , що лежить в площині паралельній передній площині відколу.

Кут заточування стовби буде раціональний при збігу площини $bdhg$ з бічної площиною відколу bcC . В цьому випадку всі сторони трикутника ABC паралельні сторонам трикутника abc , а кути цих трикутників рівні. Отже, в трикутнику ABC кут при вершині B дорівнює φ . Розглянемо горизонтальний трикутник ACD .

$$\varphi' = \arctg(\cos\psi \cdot \tg \varphi) . \quad (2.10)$$

Кут при вершині C є горизонтальною проекцією суми кутів заточування і кута зовнішнього тертя φ_1 , позначимо його α' . Умова, при якій площина відколу співпаде з площиною руху ріжучої кромки стовби, запишеться:

$$\alpha' = 90 - \varphi' \quad (2.11)$$

Спроектувавши кут α' на площину перпендикулярну ріжучій кромці і віднявши кут зовнішнього тертя ϕ_1 , з урахуванням (2.9), отримуємо кут заточування, при якому площина відколу збігається з площиною переміщення ріжучої кромки стовби:

$$\alpha = \arctg[\cos \gamma \cdot \operatorname{tg}(90 - \arctg(\cos \psi \cdot 0,66 \cdot \operatorname{ctg} \phi_2))] - \phi_1, \quad (2.12)$$

де γ – кут нахилу стійки в поздовжньо-вертикальній площині.

Щоб перевірити отримане рівняння дослідним шляхом, необхідно розглянути загальний випадок, коли площина відколу відхилена в бік обробленої смуги на певний кут δ . При цьому формула (2.11) набуде вигляду:

$$\alpha' = 90 - \varphi' + \delta \quad (2.13)$$

Підставивши в неї рівняння (2.12) і виразивши α' через кут заточування, знайдемо відхилення δ :

$$\delta = 90 - \arctg(\cos \psi \cdot 0,66 \cdot \operatorname{ctg} \phi_2) - \arctg \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \gamma} \quad (2.14)$$

Для випадку, коли стійка нахилена в поперечній площині на кут β , рівняння (2.12) набуде вигляду:

$$\alpha = \arctg[\cos \gamma \cdot \operatorname{tg}(90 - \arctg(\cos(\psi - \beta) \cdot 0,66 \cdot \operatorname{ctg} \phi_2))] - \phi_1. \quad (2.15)$$

З аналізу отриманої формули видно, що тільки кут зовнішнього тертя ϕ_1 має зворотний зв'язок з раціональним кутом загострення стовби α . Причому з усіх факторів найбільш значущими є властивості ґрунту. Цей факт створює

простір для раціоналізації інших геометричних параметрів робочого органу і

необхідність використовувати рівняння (2.15) в якості останнього кроку при його розрахунку. При варіюванні кутів нахилу стовб в поперечній і поздовжньо-вертикальній площині в межах від 0 до 20° при роботі на чорноземі, для якого

$\phi_1=22^\circ$, $\phi_2=30^\circ$, раціональний кут загострення стовб α змінюється в межах

20°...25°.

НУБІП УКРАЇНИ

2.3. Розробка імітаційної моделі процесу розпушування ґрунту похилими стовбами

Для дослідження процесу обтискання ґрунту необхідно розробити імітаційну модель, в якій досліджуваний процес здійснюється методом кінцевих елементів. Беручи ґрунт суцільним середовищем, об'ємне розпушування можна уявити як проходження в ґрунтовому масиві двох похилих стовб (рис 2.7).

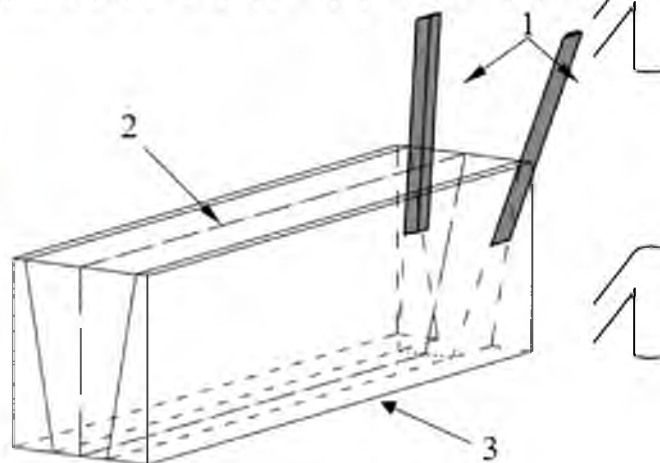
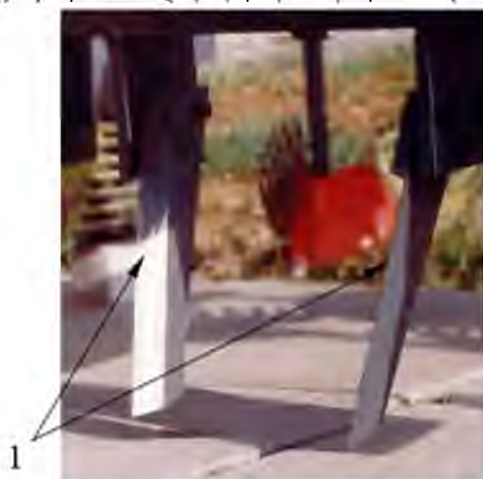


Рис. 2.7. Робочий орган для об'ємного розпушування ґрунту:

а) – реальний робочий орган; б) – схематичне зображення робочого органу; 1 – похилі стовби; 2 – сколюваний пласт; 3 – необроблена частина поля.

Оскільки процес об'ємного розпушування похилими стовбами симетричний, в розрахунковій схемі розглядається тільки його половина з відповідними граничними умовами. На робочу поверхню стовби з боку пласта діє сукупність просторово-спрямованих зосереджених сил. Виберемо систему координат з центром в точці O . До довільній точці $i(x_i, y_i, z_i)$, що належить робочій площині прикладене навантаження R_i , яке можна розкласти на три складові: R_{xi} , R_{yi} і R_{zi} . Знаючи всі сукупність цих сил, підсумувавши її для кожної з трьох проекцій, отримуємо складові головного вектора сил:

$$R_x = \sum_{i=1}^N R_{xi}, \quad R_y = \sum_{i=1}^N R_{yi}, \quad R_z = \sum_{i=1}^N R_{zi}, \quad (2.16)$$

де N – кількість точок (вузлів), на які розбита робоча поверхня; O

R_x – складова, що характеризує силу обтиску пласта в поперечному напрямку;

R_z – складова, що характеризує стійкість ходу робочого органу;

R_i – складова, що характеризує тяговий опір робочого органу

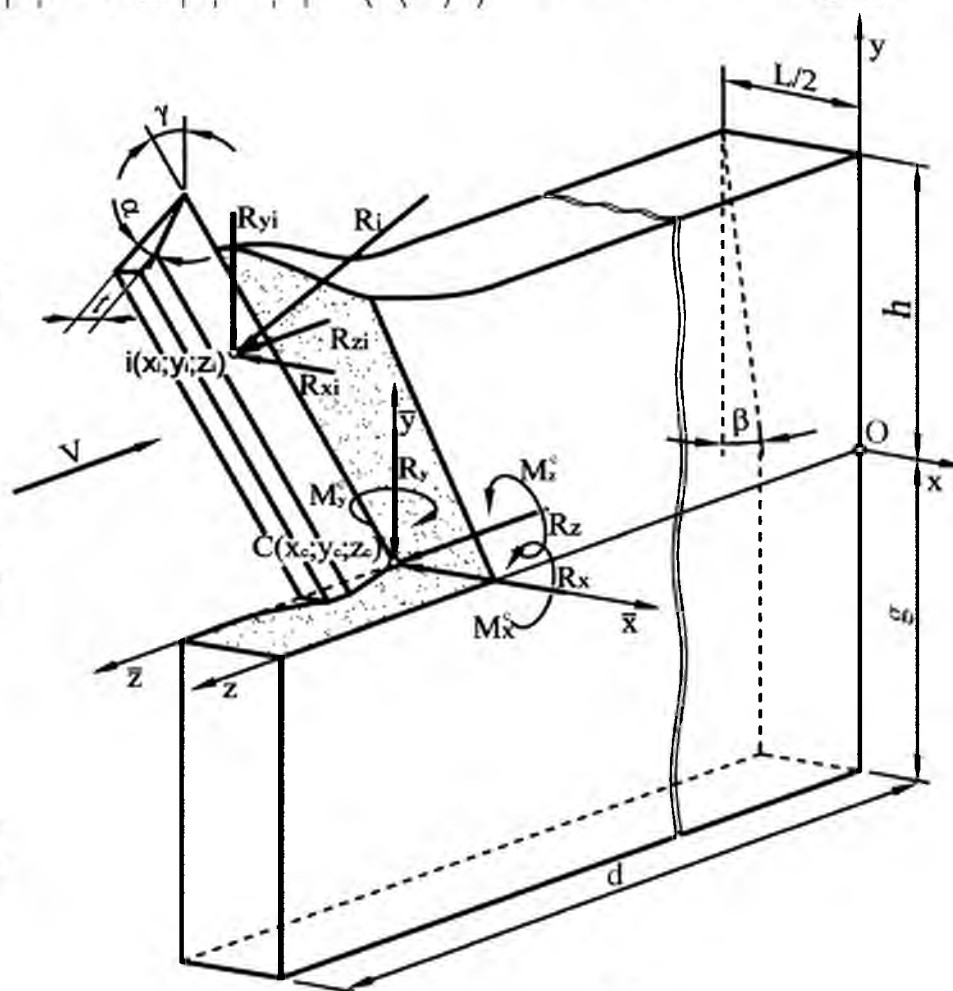


Рис. 2.8. Схема сил, що діють на стійку під час розпушування ґрунту

Знайдені проєкції головного вектора прикладені до різних точок, причому положення цих точок залежить від характеру розподілу навантаження по площині, а, отже, і від геометричних параметрів робочого органу. Це ускладнює їх аналіз. Для зручності зведемо ці сили до однієї точки, при цьому для кожної об'єкта додається момент. В якості точки приведення виберемо носок стовби (точка С). Для того, щоб виконати це приведення, створимо нову систему координат з центром в точці С. Додаткові моменти визначаються за формулами [12]:

$$M_x^C = \sum (R_{zi} \cdot y_i - R_{yi} \cdot z_i),$$

$$M_y^C = \sum (R_{xi} \cdot z_i - R_{zi} \cdot x_i), \quad (2.18)$$

$$M_z^C = \sum (R_{yi} \cdot x_i - R_{xi} \cdot y_i).$$

де x_i, y_i, z_i – координати i -ої точки в системі координат $Cx'y'z'$.

Оскільки створення нових поверхонь в процесі розрахунку викликає деякі складнощі, задамо щільну, через яку переміщається ріжуча кромка стовби, при цьому зусилля, що витрачаються на скол бічній площині пласта, включені в силу тертя.

Геометричні параметри, що визначають розміри моделі, можна розділити на дві групи: параметри робочого органу і параметри пласта. Параметри робочого органу є досліджуваними величинами, тому їх значення встановлюються в залежності від обраного плану експерименту при моделюванні процесу. У цю групу входять: міжстовбна відстань L , товщина

стовби t , кут загострення стовби α , кут нахилу стовб в поперечній площині β , кут нахилу стовба в поздовжньо-вертикальній площині γ (див. Рис. 2.8). До другої групи входить довжина пласта d і глибина підлогового горизонту g . Обидві ці величини вибрані з таким розрахунком, щоб при повному переміщенні стовби виникаючі напруження не доходили до переднього і нижнього краю моделі.

Після вирішення низки тестових завдань ці величини прийняті рівними: $d=2,3$ м, $g=0,5$ м.

Для того, щоб в процесі стиску пласт вичавлювати в сторону необробленого поля, в розрахункову схему включено його ділянку 3 (див. рис. 2.7, б).

Задаємося властивостями моделі взаємодії: ґрунт розглядається як пружно-ідеальнопластичне середовище Прандтля, а стійка як лінійно-пружне середовище Гука. Ґрунтовий пласт необхідно моделювати просторовими характеристиками міцності твердотілесними кінцевими елементами, які можуть бути двох типів: лінійними (першого порядку) (рис. 2.9, а) і квадратичними (другого порядку) (рис. 2.9, б). Квадратичний кінцевий елемент має проміжний вузол уздовж кожної зі сторін, завдяки якому межі можуть бути криволінійними (параболічними). При рівній кількості елементів квадратичні дають більшу точність обчислень, тому що вони точніше відтворюють криволінійну геометрію моделі і мають більш точні функції форми.

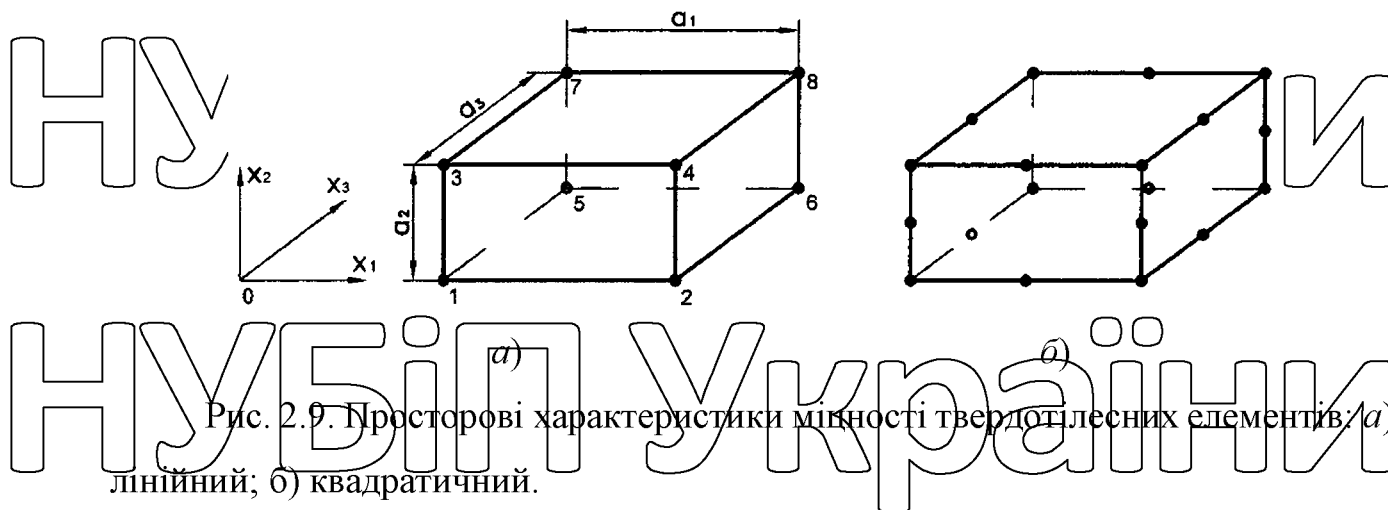


Рис. 2.9. Просторові характеристики міцності твердотілесних елементів: а) лінійний; б) квадратичний.

Однак елементи другого порядку вимагають значних комп'ютерних ресурсів і більше машинний час, тому для нелінійних структурних досліджень, які самі по собі є досить ресурсоемними, рекомендується використовувати кінцеві елементи першого порядку. У зв'язку з цим ґрунтовий пласт описується сукупністю кінцевих елементів першого порядку.

Правильне розбиття досліджуваного тіла на кінцеві елементи одне з найважливіших умов для отримання адекватної моделі процесу [43]. Занадто велика сітка дає неточний результат, а надто дрібна призводить до додаткових витрат машинного часу. Тому нами вирішено ряд тестових завдань, в яких розмір

сітки оброблюваної смуги змінювався від 0,08 м до 0,04 м, з кроком 0,005 м. Сили, що діють на стійку, встановилися на одному рівні при розмірі осередків 0,05 м. Для «страховки» ми зменшили його ще на один крок, отримавши 0,045 м.

Ця величина обрана для проведення подальших досліджень. Однак кінцеві елементи не обов'язково повинні бути всі однакового розміру. Більш дрібна сітка потрібна там, де очікується великий градієнт деформацій або напружень. У той же час в більш спокійних зонах можна використовувати сітку крупніше [43].

Переміщення стовби (високе напруження) відбувається тільки на початку смуги, інша її частина моделює нескінченний простір поля, напруження тут будуть незначні і будуть зменшуватись з віддаленням від стовби. Тому в міру віддалення від ділянки переміщення стовби, розміри кінцевих елементів збільшуються. З тієї ж причини збільшуються розміри кінцевих елементів вглиб смуги.

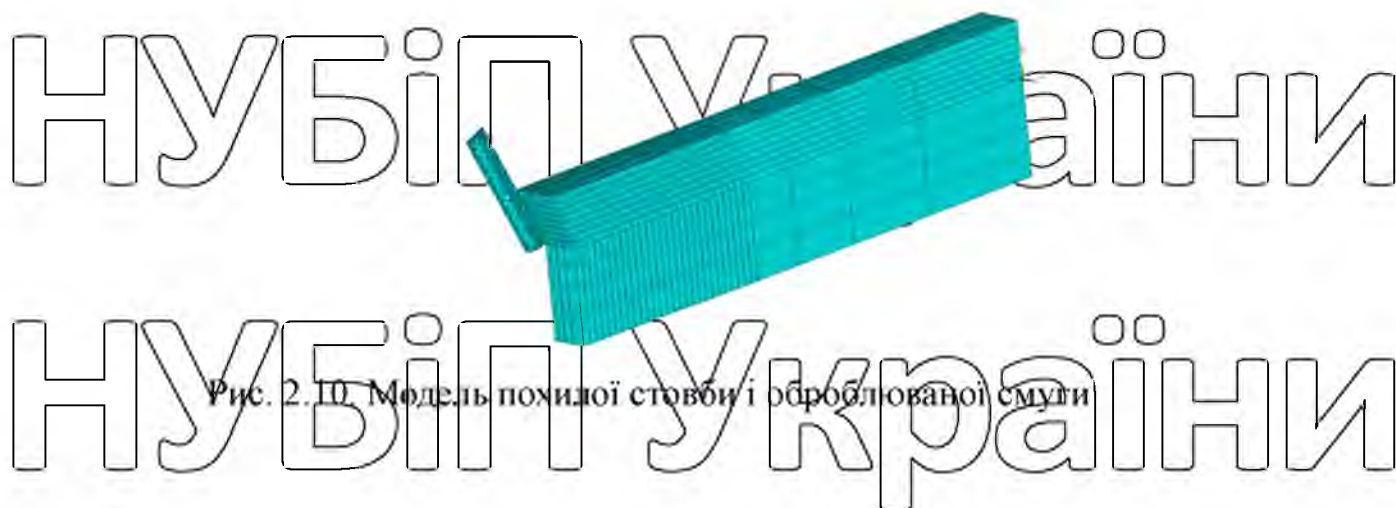


Рис. 2.10. Модель похилої стовби і обробленої смуги

Модель враховує дві контактні взаємодії:

- 1) між робочою площиною стовби і площиною відколу смуги (рис. 2.10, а);
- 2) між площиною відколу смуги і площиною необробленої частини поля (рис. 2.12, б).

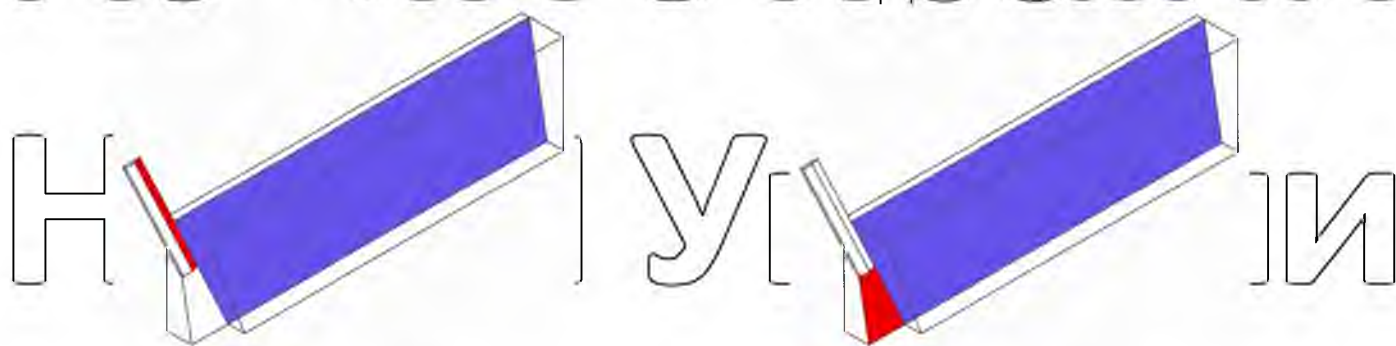


Рис. 2.10. Контактні взаємодії моделі: а) між робочою площиною стовби і площиною відколу смуги, б) між площиною відколу смуги і площиною необробленої частини поля.

Сила тертя між поверхнями контакту рівна:

$$\tau = p \cdot \operatorname{tg} \phi_1 + C, \quad (2.24)$$

де p – контактний тиск.

Навантаження побудованої кінцево-елементної моделі реалізовано за допомогою переміщення робочої площини стовби на задану величину уздовж пласта ґрунту (уздовж осі Z), при цьому заборонено її переміщення в напрямку осей X і Y (рис. 2.13). Пласт закріпленій своєю нижньою площиною у всіх напрямках, а дальньою поперечною площиною в напрямку осі Z . Також

зафіксована площину необроблюваної частини поля, по якій вона контактує з пластом.

Використання імітаційної моделі дає можливість досліджувати в будь-якій точці оброблюваного пласта зміну в процесі навантаження таких величин як зусилля, еквівалентні напруження, загальні та пластичні деформації, робота, напрямок деформування (рис. 2.11)

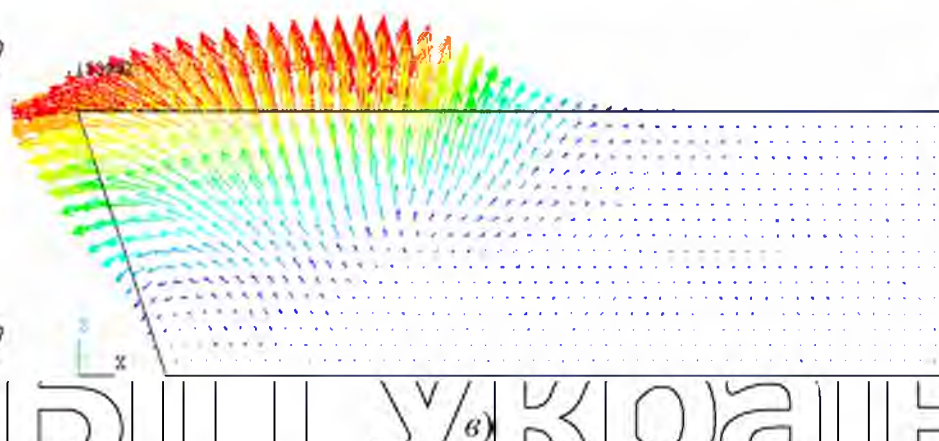
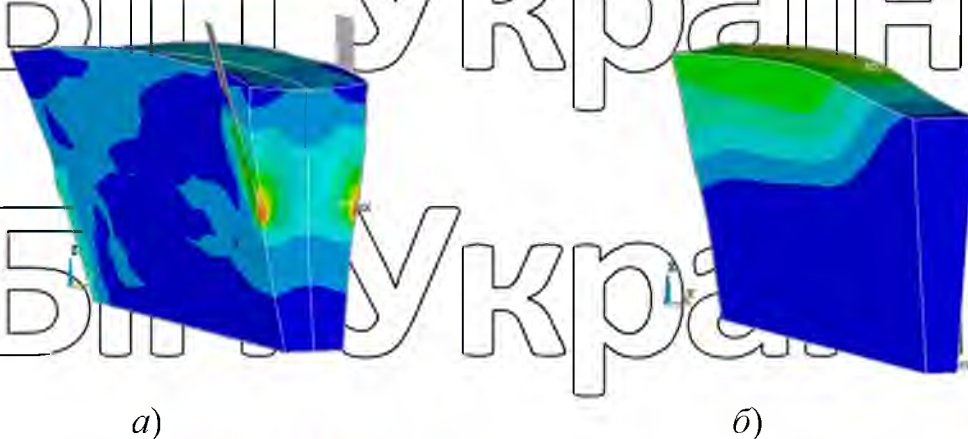


Рис. 2.11. Приклади отриманих результатів при моделюванні об'ємного розпушування: а) розподіл еквівалентних напружень в перерізі пласта; б) сумарна деформація, в) вектори деформації.

Висновки розділу 2:

1. При дослідженнях відколу ґрунту найбільш раціональною моделлю є тверде тіло, а при дослідженні напружено-деформованого стану - пружно-ідеальнопластичне середовище.
2. Доцільна форма оброблюваної смуги забезпечується за рахунок кута заточування стовби. Для чорнозему його раціональне значення коливається в

межах 20° , 25° і мало залежить від інших параметрів робочого органу.

3. Імітаційна модель процесу об'ємної смугової обробки ґрунту похилими стовбами дозволяє досліджувати в будь-якій точці повну картину напружено-деформованого стану робочих органів і оброблюваного ґрунтового шару, що сприяє більш глибокому вивченню механізмів розпушування ґрунту.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма експериментальних досліджень

Мета експериментальних досліджень - перевірка теоретичних положень і висновків, отримання математичних моделей процесу об'ємного розпушування ґрунту і раціоналізація параметрів робочого органу глибокорозпушувача.

Програма експериментальних досліджень включає вирішення таких

питань:

- проведення перевірки імітаційної моделі процесу розпушування ґрунту похилими стовбами;
- перевірка теоретичної залежності, яка встановлює вплив кута заточування стовби на напрямок розвитку площині відколу ґрунту;
- встановлення залежності зусилля обтиску ґрунту від найбільш значущих параметрів, визначення їх раціональних значень;
- встановлення впливу основних конструкційних параметрів робочого органу, його режимів роботи і властивостей ґрунту на тяговий опір розпушувача.

3.2. Методики експериментальних досліджень

3.2.1 Перевірка розробленої імітаційної моделі процесу розпушування ґрунту похилими стовбами.

Для перевірки моделі на реальному робочому органі було проведено експеримент, входними факторами якого були: міжстовбна відстань L і кут нахилу стовб в поперечній площині β .

Вихідним параметром був тяговий опір P . Фактори варіювалися на трьох рівнях (таблиця 3.1). Інші геометричні параметри робочого органу залишалися незмінними: $t = 0,02$ м; $h = 0,3$ м; $\alpha = 20^\circ$; $\gamma = 20^\circ$. Вимірювання тягового опору реального робочого органу здійснювалося за допомогою другого трактора [18] (рис. 3.1).

Рівні варіювання факторів

Рівні	Фактори	
	Міжстовбна відстань L , м	Кут нахилу стовб β , °
Верхній		
Середній		
Нижній		



Рис. 3.1. Заміри тягового опору: 1 – тяговий трактор; 2 – робометр; 3 – допоміжний трактор; 4 – робочий орган.

Суть методу зводиться до двократного визначення тягового опору трактора 3 з навішеним на нього знаряддям 4: перше - визначення при холостому пересуванні трактора P_f , тобто з робочим органом, що знаходиться в транспортному положенні, і друге - визначення при пересуванні трактора в роботі $P_{заг}$. Робочий тяговий опір P_n визначається як різниця $P_{заг}$ і P_f :

$$P_n = P_{заг} - P_f. \quad (3.1)$$

Тяговий опір визначається за допомогою робометра РТК-АФІ. Методика його використання полягає в наступному [38, 45]. Робометр 2 (рис. 3.10) встановлюють між тяговим 1 і допоміжним трактором 3 за допомогою ексб 1-2 (рис. 3.2). Привод лічильника шляху 4 здійснюється від вала відбору потужності тягового трактора, за допомогою гнучкого валу. Робочий орган заглиблюють в ґрунт на задану глибину, зупиняють агрегат і записують початкові показання лічильника шляху L_n і роботи A_n .

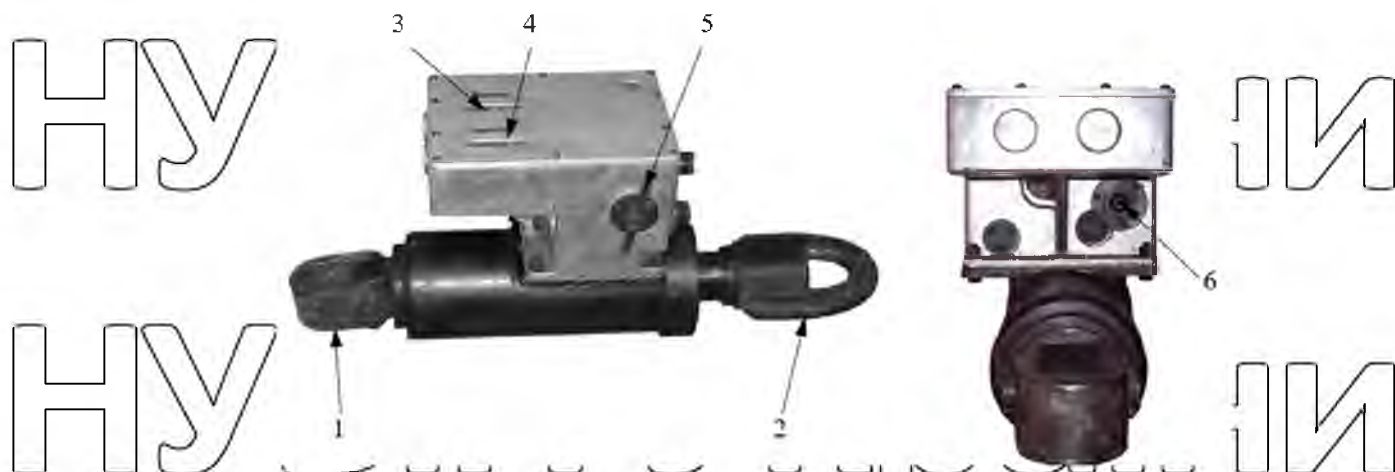


Рис. 3.2. Тяговий тракторний роботомір РТТК-АФІ: 1 – скоба для зчеплення с тяговим трактором; 2 – скоба для зчеплення з допоміжним трактором; 3 – лічильник роботи; 4 – лічильник шляху; 5 – важіль включення; 6 – валик приводу лічильнику шляху.

Трактор плавно зрушують з місця, після чого включають роботомір і продовжують роботу до кінця гону. За 2...3 м до виглиблення розпушувача роботомір вимикають. Зупиняють агрегат знову записують показання лічильників L_k і A_k . Потім агрегат розвертають, і в тій же послідовності продовжують роботу до отримання необхідного шляху динамометрування. В даному випадку цей шлях склав 2 км. Середній тяговий опір агрегату визначається за формулою.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n A_{ki} - A_{ni}}{\sum_{i=1}^n L_{ki} - L_{ni}} \quad (3.2)$$

де A_k і A_n – показання лічильника тягових зусиль в кінці і на початку проходу, кН;
 L_k и L_n – показання лічильника числа вимірів в кінці і на початку проходу;
 n – кількість проходів.

При проведенні експерименту були відібрані проби ґрунту з метою визначення його фізико-механічних характеристик, які згодом використовувалися при моделюванні.

Значимі відмінності між результатами, отриманими в ході моделювання і

польового експерименту, встановлені за допомогою F -критерію Фішера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{n \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-d} \cdot \frac{N-1}{\sum_{i=1}^n (y_{xi} - \bar{y}_x)^2} \quad (3.3)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності моделі;

S_y^2 – дисперсія помилки дослідів;

y – значення вихідного параметра, отриманого за допомогою моделі;

y_i – середнє арифметичне значення вихідного параметра, отримане в ході проведення експерименту з реальним робочим органом, з повторностями в рядках.

- число визначених коефіцієнтів рівняння регресії;

- число повторностей одного досвіду;

- кількість дослідів.

Різниця між двома сукупностями значень вважається не значущим при F -критерії менше табличного. Це буде свідчити про адекватність розробленої моделі.

3.2.2. Методика дослідження розпушування ґрунту похилими стовбами за допомогою імітаційної моделі.

При дослідженні розпушування ґрунту похилими стовбами нами використовувалася складена програма, листини якої наведено в додатку А. Мета моделювання – дослідження енергетичної та якісної сторони моделі, а отже, і самого процесу об'ємного розпушування. Енергетичними характеристиками процесу є реакції, що виникають від тиску ґрунту на стовби (рис.2.8). Якість обробки характеризується середнім ступенем збільшення обсягу ґрунту в поперечному переріз смуги, після проходження стовби, тобто середньої відносної об'ємною деформацією, яка визначається за формулою:

$$\varepsilon_V = \frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_{xi} + \varepsilon_{yi} + \varepsilon_{zi})}{n} \quad (3.4)$$

де ε_{xi} , ε_{yi} , ε_{zi} – відносні деформації по осях, i -го елемента,

n – кількість елементів в перерізі.

Знак деформації показує її напрямок: «+» - розширення; «-» - ущільнення ґрунту. Оскільки частка твердої компоненти в загальному обсязі ґрунту залишається постійною, можна прийняти, що отримані об'ємні деформації відбуваються за рахунок зміни пористості. Тоді відносна об'ємна деформація ε_V дорівнюватиме протилежності (позитивному/негативному) пористості ґрунту.

При плануванні експерименту використовувався трирівневий план Бокса-Бенкіна, котрий дає можливість скласти рівняння регресії другого порядку виду:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i>j} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^2, \quad (3.5)$$

де Y – функція відгуку (середня відносна об'ємна деформація);

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – теоретичні коефіцієнти регресії;

x_i – фактори;

k – кількість факторів.

Визначення коефіцієнтів регресії вироблялося шляхом підбору моделі другого порядку (3.5) [39]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_k \cdot x_k. \quad (3.6)$$

При цьому члени другого порядку замінюються членами першого порядку:

від квадратичної моделі до лінійної, коефіцієнти регресії якої визначаються методом найменших квадратів.

В якості досліджуваних факторів обрані параметри, що визначають геометрію робочого органу:

міжстовбна відстань, L ;

- товщина стовби, t ;

- глибина обробки, h ;

- кут нахилу в поздовжньо-вертикальній площині, γ ;

- кут заточування, α ;

- кут нахилу стовби в поперечній площині β .

Межі варіювання факторів встановлені відповідно до агрономічними

рекомендаціями для смугової обробки [33] і принципом сумісності факторів (таблиця 3.2). Адекватність отриманих моделей визначалася за допомогою критерія Фішера (3.3).

Таблиця 3.2

Межі варіювання факторів

Рівень	Фактори					
	$L, \text{ м}$	$t, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$\gamma, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$\beta, ^\circ$
+	0,5	0,01	0,20	10	10	0
0	0,4	0,02	0,30	20	20	7
-	0,3	0,03	0,40	30	30	14

Чим менша різниця значень залишків близько лінії регресії по відношенню до загального розкиду, тим краще модель. Наприклад, якщо зв'язків між змінними і функцією немає, то відношення залишкової мінливості функції y до первісної/дисперсії рівне 1,0. І навпаки, якщо змінні і функція жорстко пов'язані, то залишкова мінливість відсутня, і відношення дисперсій дорівнюватиме нулю. У більшості випадків відношення лежить десь між цими екстремальними значеннями, тобто між 0,0 і 1,0. Одиниця мінус це відношення називається R -квадратом (R^2) або коефіцієнтом детермінації. Це значення показує, який відсоток мінливості пояснює отримана функція, а який залишається не поясненим, або іншими словами, скільки відсотків мінливості припадає на невраховані фактори, тому якість отриманих моделей оцінювалося коефіцієнтом детермінації:

$$R^2 = \frac{\sum (y - \bar{y}_{\text{факт}})^2}{\sum (y_{\text{факт}} - \bar{y}_{\text{факт}})^2}, \quad (3.7)$$

де $y_{\text{факт}}$ – фактичне значення шуканої функції;

$\bar{y}_{\text{факт}}$ – середнє значення шуканої функції.

Для отриманих моделей перевірялася статистична значимість коефіцієнтів регресії за допомогою t -критерію Стюдента.

$$t_i = \frac{b_i}{S_{b_i}} \quad (3.8)$$

де S_{b_i} – квадратична помилка у визначенні i -го коефіцієнта регресії:

$$S_{b_i} = \sqrt{\frac{S_{y^2}}{N}} \quad (3.9)$$

Якщо знайдений t -критерій більше табличного ($t_i > t_{табл}$), то відповідний коефіцієнт значущий. У разі незначущості одного з факторів, він виключається, а сама модель перераховується повторно. Цей крок виконується до отримання моделі, що включає тільки значущі чинники. Після цього вони ранжуються, в залежності від рівня достовірності p .

3.2.3. Методика експериментального визначення залежності розташування площини сколювання від кута загострення стовби.

Мета цього експерименту - визначити залежність між кутом загострення стовби і розташуванням бічної площини відколу.

Експеримент проводився за допомогою лабораторної установки (рис. 3.3). В якості ґрунтового середовища використовувався чорнозем і попіл. Вибір саме цих матеріалів обумовлений необхідністю отримання чіткої картини тріщиноутворення. Для порівняння отриманих експериментальних залежностей з теоретичними, визначений коефіцієнт зчеплення і кути внутрішнього і зовнішнього тертя використовуваних зразків ґрунту [30].

Суть експерименту полягала в тому, що модель стовби 2 (рис. 3.3) заглиблюють в ґрунт, який потім ретельно ущільнювався (чорнозем до $1,2 \text{ г/см}^3$, попіл до $0,5 \text{ г/см}^3$). За допомогою гвинта 1 стійка переміщала до появи першої добре розвиненої тріщини 2 (рис. 2.3) призми сколювання. Значення кута δ між цією тріщиною і напрямком руху стовби записувалося в журнал, причому позитивним вважався кут з боку оброблюваної смуги, а негативним з протилежного боку. Кут нахилу стовби в поздовжньо-вертикальній площині становив 20° , а в поперечній 0 . Ці кути жорстко фіксувалися за допомогою направляючої 4 (рис. 3.3).

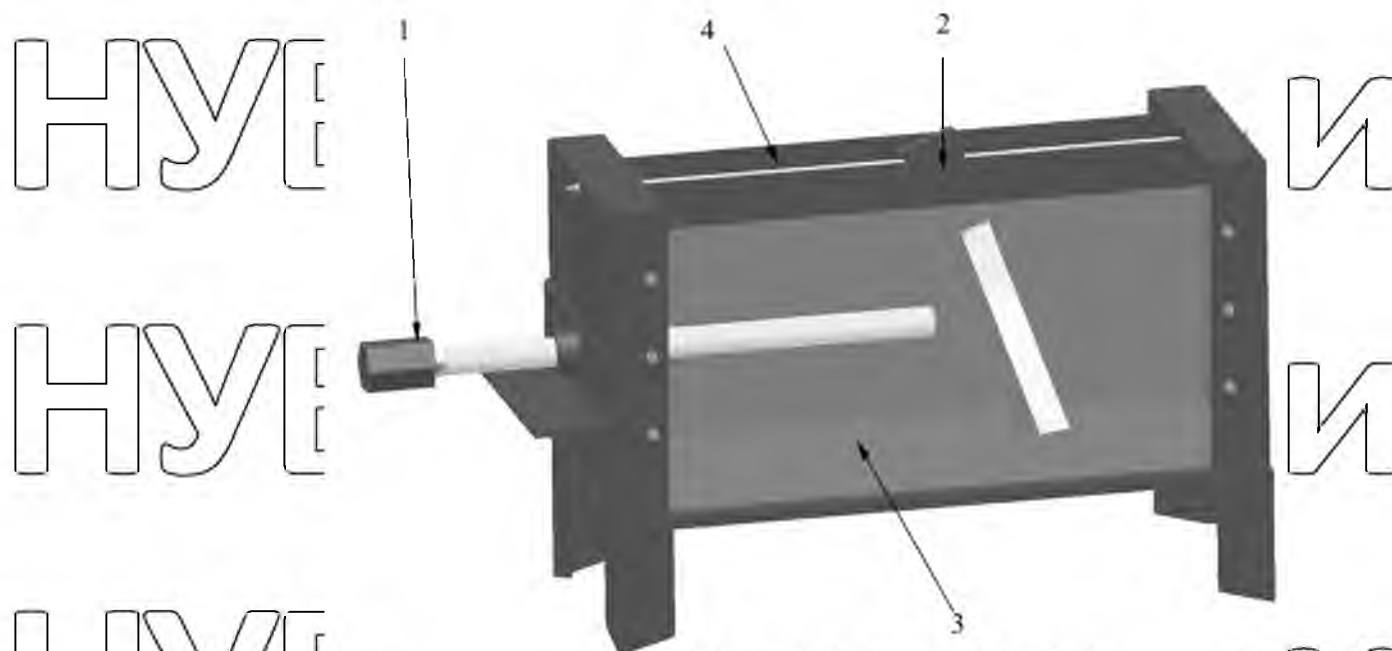


Рис. 3.3. Схема лабораторної установки для дослідження площини відколу ґрунту: 1 - приводний гвинт; 2 - модель стовби; 3 - ємність для ґрунту; 4 - напрямна.

Необхідна кількість дослідів визначено за допомогою критерію достовірності Стюдента. Для цього проводився один і той же експеримент з повторністю $n=5; 6; 7$ (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3

Визначення повторності досвіду

Повторність, n	Критерій достовірності, t	Надійність, P
5	2,38	0,92
6	2,77	0,95
7	2,78	0,96

Потім, для кожної серії дослідів визначалося середнє значення \bar{y} , середньоквадратичне відхилення σ , величина n , і критерій достовірності t , за формулами:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad t = \frac{\sqrt{n}\Delta}{\sigma} \quad (3.10)$$

де y_i – результати кожного досвіду;

Δ – інтервал.

Інтервал прийнятий $\pm 10\%$. За отриманим для кожної серії дослідів t -критерієм, використовуючи таблицю Стьюдента-Фішера, визначалося значення надійності [39].

З урахуванням надійності $P \geq 0,95$, додали один дослід, остаточно для проведення експерименту обрана семиразова повторність.

Виходячи з теоретичних досліджень, можна припустити, що залежність між кутом заточування і кутом відхилення площини відколу від напрямку переміщення стовби близька до лінійної:

$$y(x) = a_0 + a_1 x, \quad (3.11)$$

де y – критерій оптимізації (кут δ відхилення площини відколу від напрямку переміщення стовби);

x – досліджуваний фактор (кут α загострення стовби);

a_0, a_1 – коефіцієнти лінійної апроксимації, які визначаються за допомогою методу найменших квадратів.

Для підтвердження правильності використання лінійної залежності, визначався коефіцієнт кореляції Пірсона [32]:

$$r = \frac{k_{yx}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (3.12)$$

де σ_x і σ_y – середні квадратичні відхилення цих величин;

k_{yx} – кореляційний момент випадкових величин x і y :

$$k_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - m_y)(x_i - m_x), \quad (3.13)$$

де m_y, m_x – математичне очікування x і y .

Для визначення середньоквадратичного відхилення аналітичного опису шуканої залежності від результатів експерименту необхідно провести не менше

3 дослідів. Кут заточування в них прийнято рівним: $\alpha = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ (рис.3.4).

Коефіцієнт кореляції статично достовірний, якщо його фактичне значення $r_{\text{факт}}$ вище табличного $r_{\text{табл}}$, яке для рівня значущості $p = 0,05$ і трьох дослідних точок рівне 0,996. В іншому випадку, необхідно збільшити ступінь многочлена і

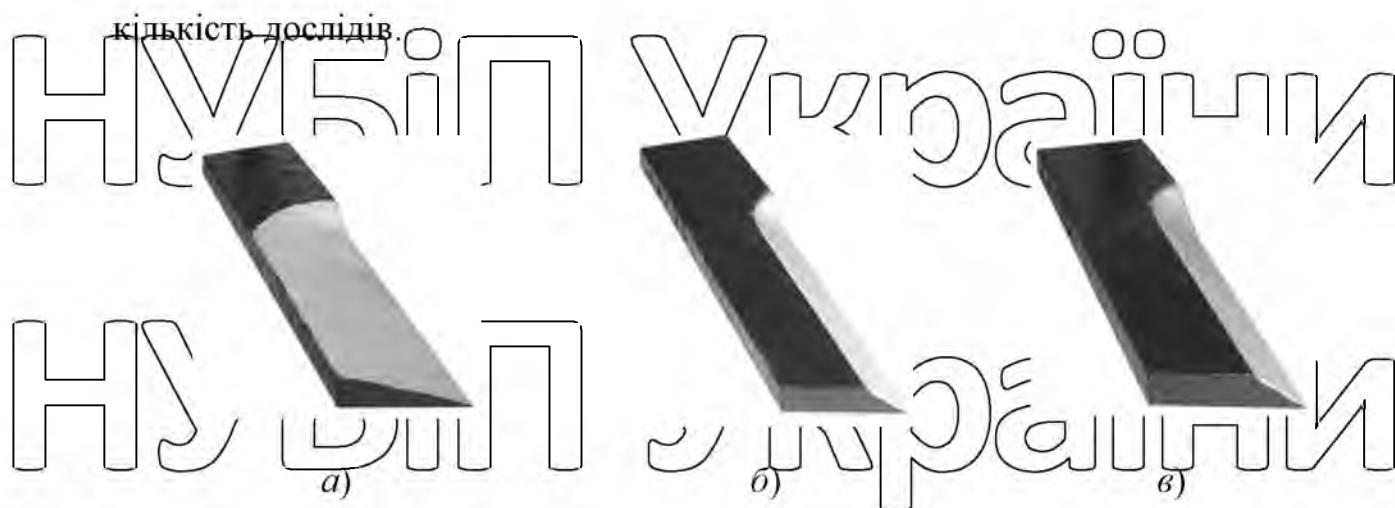


Рис. 3.4. Моделі стовб: а) Кут заточування 10°; б) кут заточування 20°; в)

кут заточування 30°.

Після проведення експериментів виключалися грубі помилки за допомогою коефіцієнта Стюдента:

$$t_p = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (3.14)$$

де x_i – перевіряється значення фактора;
 \bar{x} – середнє значення фактора.

Якщо $t_p \geq t_t$, то результат виключається з статистичного ряду, і тоді знову визначають \bar{x} і σ . Складене рівняння (3.11) досліджувалося на адекватність за допомогою F -критерію Фішера (3.3).

3.2.4. Методика експериментального дослідження стиску ґрунту

похилими стовбами.

Технологічний процес об'ємного розпушування можна розділити на три етапи: сколювання, обтиснення і схід пласта. Метою представлених досліджень послужило вивчення другого етапу - обтиску.

При розпушуванні на робочу поверхню похилій стовби з боку ґрунту діє деформаційна сила P_d і сила тертя $F_{тр}$ (рис. 3.5). Ці сили врівноважує тягова сила трактора T , яка чисельно дорівнює і протилежно спрямована тяговому опору P , який складається з проєкцій на вісь x деформаційної сили P_d і сили тертя $F_{тпу}$. Як показали теоретичні дослідження, обидві ці сили, а отже і тяговий опір, в значній

мірі визначає обтискаюча сила P_v , тому виникає необхідність дослідження закономірностей зміни сили викликаних обтиском ґласта.

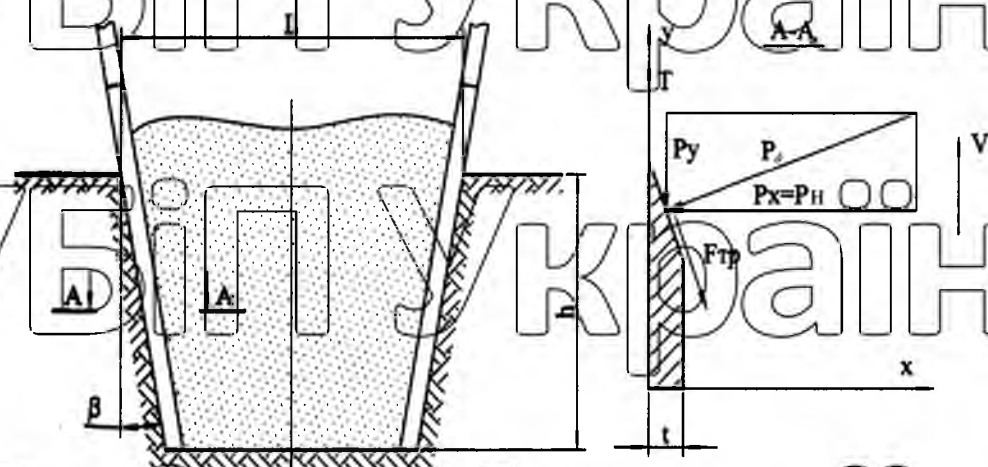


Рис. 3.5. Дія сил на асиметричні стовби в горизонтальній площині

Для моделювання процесу обтиску спроектована і виготовлена лабораторна установка (рис.3.6, 3.7), яка складається з ємності 1, в яку засипають ґрунт, і двох похилих пластин 2 і 3, шириною $b_m=0,2$ м і встановлених на відстані L_m одна від одної.

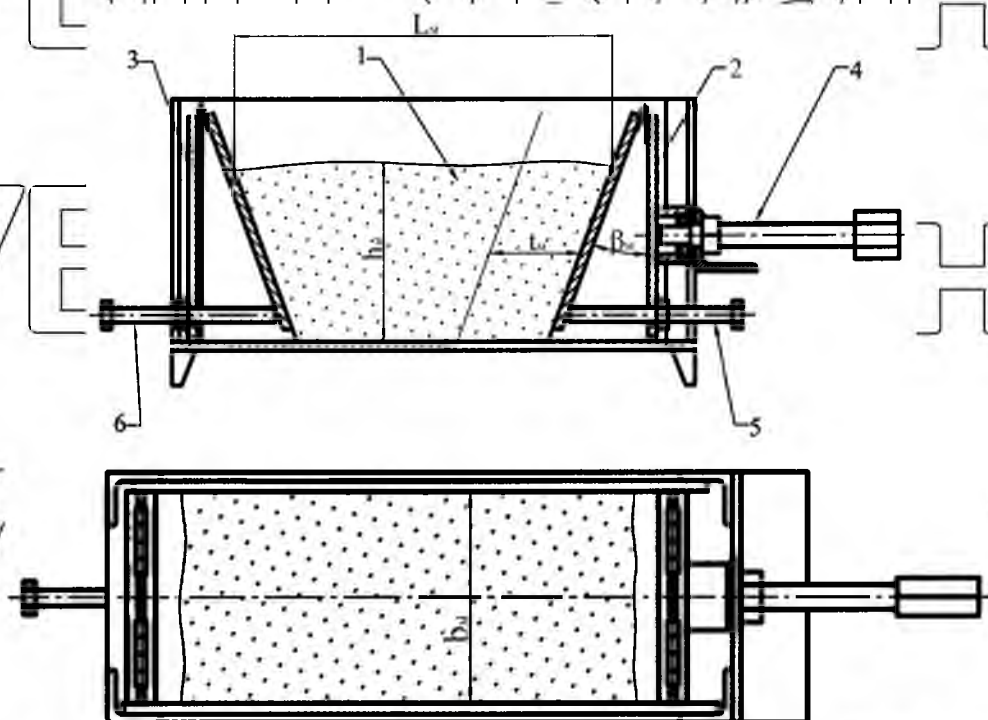


Рис. 3.6. Схема лабораторної установки для дослідження обтиску ґрунту: 1 - ємність для ґрунту; 2 - рухома похила пластинка; 3 - нерухома похила пластинка; 4 - приводний гвинт; 5, 6 - упорні гвинти.

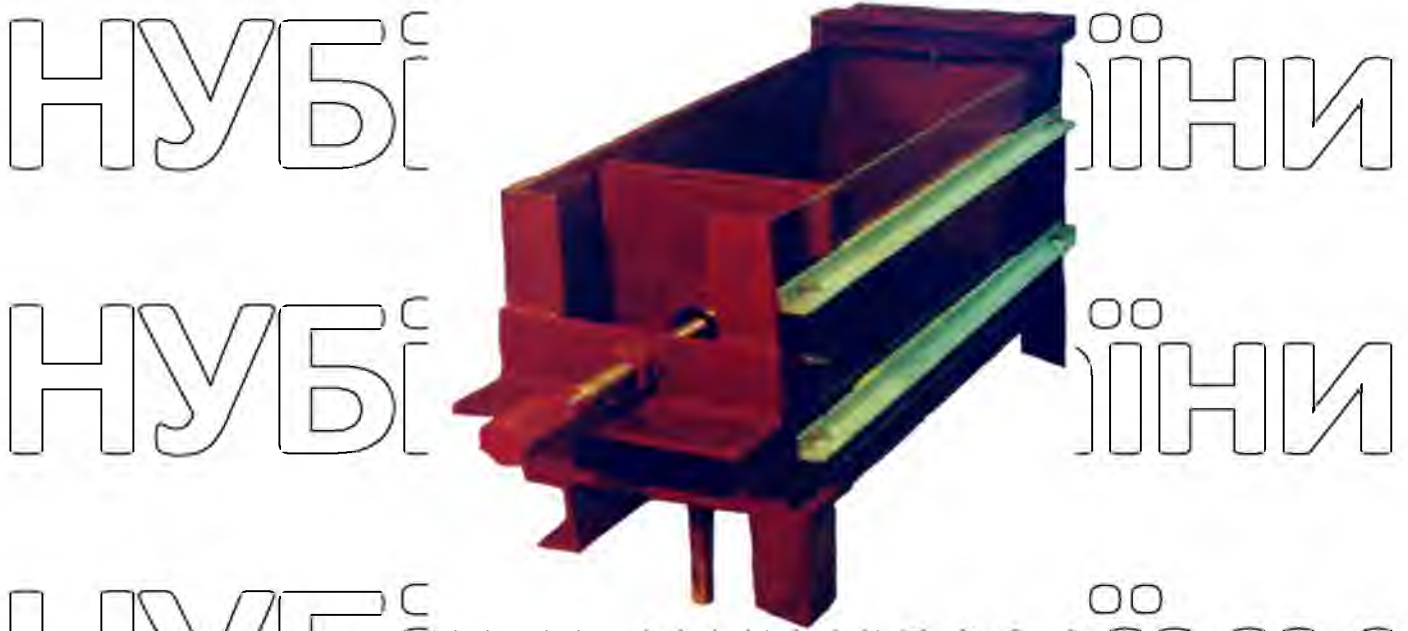


Рис. 3.7. Лабораторна установка

Одна з пластин рухлива, інша - нерухома. Рухома пластина переміщається на величину l_m , за допомогою приводного гвинта 4. Сила стиєння ґрунту в емності визначається по крутному моменту на гвинті, котрий вимірюється динамометричним ключем. Для візуального спостереження за процесом передня стінка каналу виготовлена з прозорого матеріалу, укріпленого ребрами жорсткості. Кут нахилу пластин β_m змінюються за допомогою гвинтів 5 і 6.

Зв'язок між геометричними параметрами установки і реальним робочим органом така:

- відстань між похилими пластинами відповідає міжстовбній віддалі розпушувача;
- кут нахилу пластин відповідає поперечному нахилу стовб;
- переміщення рухомий пластини відповідає сумарній товщині стовб.

Таким чином, за допомогою лабораторної установки можна простежити вплив найбільш важливих, з точки зору енергоємності процесу, параметрів товщини стовби і кута її нахилу в поперечній площині.

Динамометричний, ключ складається з ключа 1, до якого шарнірно прикріплюється руків'я 2 (рис. 3.8). До ключа і руків'я хомутами прикріплюються важелі 4 і 5, що впираються в пружину 6.

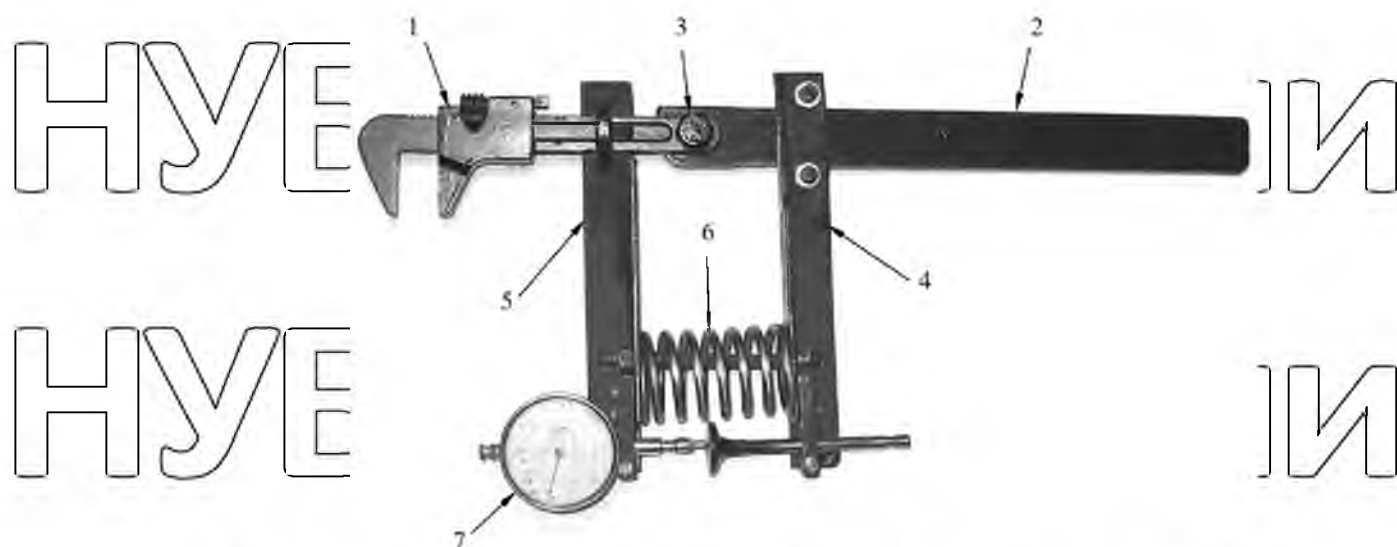


Рис. 3.8. Динамометричний ключ: 1 - ключ; 2 - рукоятка; 3 - шарнір; 4, 5 - важелі; 6 - пружина; 7 - тензومتر годинного типу

Ключ працює наступним чином. До руків'я прикладається деяке зусилля, при цьому вона повертається щодо ключа на шарнірі 3 і стискає за допомогою важелів 4/5 пружину 6. Після виміру зміни довжини пружини 6 за допомогою тарувального коефіцієнта визначається крутний момент, діючий на ходовий гвинт установки. Проводити вимірювання довжини пружини можна за допомогою вимірювальної лінійки, індикатора годинникового типу або штангенциркуля.

Замість пружини 6, можна змінювати межі вимірюваних моментів. Для визначення тарувального коефіцієнта складемо схему сил, прикладених до нього (рис.3.9).

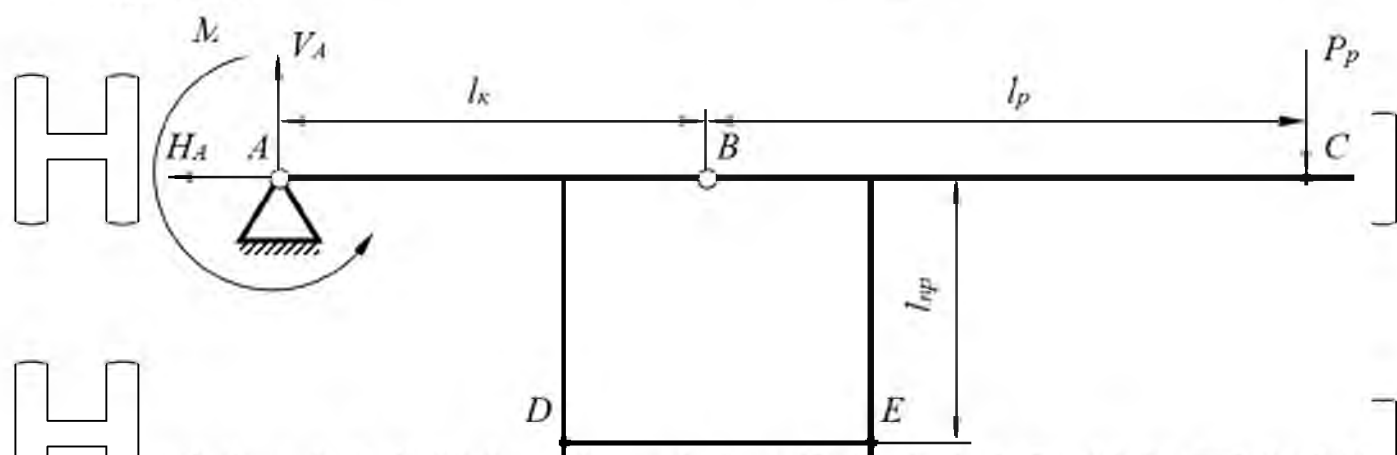


Рис. 3.9. Схема сил, що діють на ключ

При цьому приводний гвинт замінює шарнірно нерухомою опорою A з двома реакціями та крутним моментом M , котрий чисельно дорівнює моменту від сили P_p , яка прикладена до руків'я ключа. Пружину представимо у вигляді стрижня DE .

Розривавши складену схему по шарніру B і пружині DE , використовуючи рівняння стастики, отримаємо формулу тарувального коефіцієнта:

$$k_{кл} = \frac{k_{пр} \cdot l_{пр}}{l_p} \cdot (l_k + l_p), \quad (3.16)$$

де l_k – відстань від осі гвинта до осі шарніра;

l_p – відстань від осі шарніра до точки прикладання сили P_p ;

$l_{пр}$ – відстань від осі пружини до осі шарніра;

$k_{пр}$ – тарувальний коефіцієнт пружини (визначається дослідним шляхом).

Для приведення досліджуваного процесу обтиску ґрунту до реальної системи, використаємо теорію подібності. Виходячи з геометричної подібності, між розмірами моделі і натурі повинен бути такий зв'язок [35]:

$$l_{ім} = \frac{l_{ін}}{k_l}, \quad \varphi_{ім} = \varphi_{ін}, \quad (3.17)$$

де $l_{ім}$, $\varphi_{ім}$ – лінійний і кутовий розміри моделі;

$l_{ін}$, $\varphi_{ін}$ – лінійний і кутовий розміри натурі;

k_l – масштаб лінійних розмірів.

Використовуючи кінематичну і динамічну подібність, встановлена залежність між силою обтиску для моделі і натурі:

$$P_k = P_m \cdot k_l^2 \left(\frac{C_n}{C_m} \right), \quad (3.19)$$

де C_n – коефіцієнт зчеплення ґрунту натурі;

C_m – коефіцієнт зчеплення ґрунту, що використовується в моделі.

Слід зауважити, що лабораторна установка моделює процес обтиску не всієї робочої площини стовби, а тільки її елементарної ділянки. Тому при

дослідженні енергоспоживання процесу обтиску необхідно порівнювати не зусилля, а роботу моделі і реального робочого органу, витрачену на стиснення смуги одиничної площі поперечного перерізу.

Як фактори, що впливають на цю величину, нами розглядалися: кут нахилу пластин β , величина обтиснення ґрунту t , відстань між пластинами L . Досліди проводилися на піску вологістю 5%, з коефіцієнтом зчеплення $\epsilon_{\text{м}}=0,4$ кПа.

Кількість необхідних повторів визначалася за допомогою критерію достовірності Стюдента (3.10). Приймаючи значення довірчого інтервалу рівним $\pm 10\%$, а надійність $P \geq 0,95$, додавши один «страхувальний» дослід,

остаточно для проведення експерименту обрана шестикратна повторність.

Для знаходження математичної моделі, яка описує залежність сили стиснення від обраних факторів, обраний стандартний план Бокса-Бенкена з варіюванням факторів на трьох рівнях [59]. Він дає можливість з необхідною

точністю описати процес рівнянням регресії другого ступеня (3.5). Значення факторів встановлювалися з урахуванням умови геометричної подібності (3.18), при $n=2$ (таблиця 3.4).

На установці, згідно з планом проведеного експерименту, виставлялися необхідні кути нахилу пластин і відстані між ними. Засипали і ущільнювали ґрунт на глибину $h_{\text{м}}=0,12$ м. Далі за допомогою приводного гвинта ліва пластина пересувалася на необхідну відстань. Одночасно вимірювалося зусилля обтиску. Отриманий масив даних перевірявся на наявність грубих помилок за допомогою коефіцієнта Стюдента (3.14).

Таблиця 3.4

Рівні варіювання факторів

Рівні	Фактори					
	Міжстовбна відстань L , мм		Величина стиснення t , мм		Кут нахилу β , °	
	Натура	Модель	Натура	Модель	Натура	Модель
Верхній					°	°
Середній					°	°
Нижній					°	°

Після визначення сили стиснення, на моделі, використовуючи формули

(3.19), перейдемо до питомого зусилля природи, тобто зусилля, віднесеного до одиниці площі поперечного перерізу пласта:

$$p = \frac{P_s \cdot C_f}{b_M \cdot h_M \cdot d_M} \quad (3.20)$$

За отриманими даними складалося рівняння регресії виду (3.5), яке проводилося на адекватність за F-критерієм Фішера (3.3). Якість складеного рівняння оцінювалося коефіцієнтом детермінації R^2 (3.7). Значимість коефіцієнтів регресії перевірялася за допомогою t-критерію Стьюдента (3.8), а ступінь значущості встановлювалася в залежності від рівня достовірності p .

Для остаточного переходу від пластинок, що обтискають ґрунт до реального робочого органу необхідно визначити роботу, затрачену на стиск:

$$a = \int_0^L p(L; t; \beta) dt. \quad (3.21)$$

Рационалізацію параметрів робочого органу слід здійснювати, виходячи з отриманого рівняння питомої роботи (3.21).

3.2.5. Методика польового дослідження залежності тягового опору робочого органу об'ємного типу від його параметрів

Характеристики ґрунту при проведенні експериментів були такими: тип ґрунту - чорнозем звичайний; вологість - 15%; щільність - 1,3 г/см³; коефіцієнт зчеплення 75 кПа. Вимірювання тягового опору здійснювалося так як і при верифікації імітаційної моделі. На тяговий опір впливають: геометричні параметри робочого органу; його технологічні режими роботи; фізико-механічні властивості ґрунту.

Як геометричні виділимо параметри, що визначають лобовий профіль робочого органу: міжстовбну відстань L , товщину стовба t і кут її нахилу в поперечній площині β (рис. 1.19). У досліджуваному розпушувачі можна виділити ще два параметри: кут заточки α і кут нахилу в поздовжньо-вертикальній площині γ . Кут заточування не включений в список факторів, оскільки його рационалізація пов'язана з «чиєтотою» обробки і розглянута у відповідному розділі.

Як показали результати імітаційного моделювання, кут нахилу стовб в

поздовжньо-вертикальній площині γ є малозначущими фактором для тягового опору, проте, оскільки він впливає на якість обробки, при вирішенні компромісної задачі рівняння, що описує енергетичну сторону процесу теж повинно містити цей параметр. Щоб не ускладнювати польові дослідження малозначущими чинниками, в емпіричну формулу тягового опору $P=f(x_1, x_2, x_3, \dots)$ нами введено поправочне зусилля ΔP , отримане на основі рівняння регресії (3.6), яке враховує вплив кута γ . Визначення цього зусилля засновано на припущенні, що тенденції, отримані в ході імітаційного моделювання, переносяться і на реальні процеси, причому для кута γ вони апроксимуються лінійною залежністю.

При імітаційному моделюванні нами отримана залежність тягового опору від геометрії робочого органа, прийнявши інші параметри рівними постійним середнім значенням, отримаємо залежність опору R_z від поздовжнього кута γ $R_z=f(\gamma)$. Вона має вигляд похилої лінії. Експериментальна залежність має вигляд горизонтальної прямої, оскільки в неї не включено параметр γ (рис. 3.10).

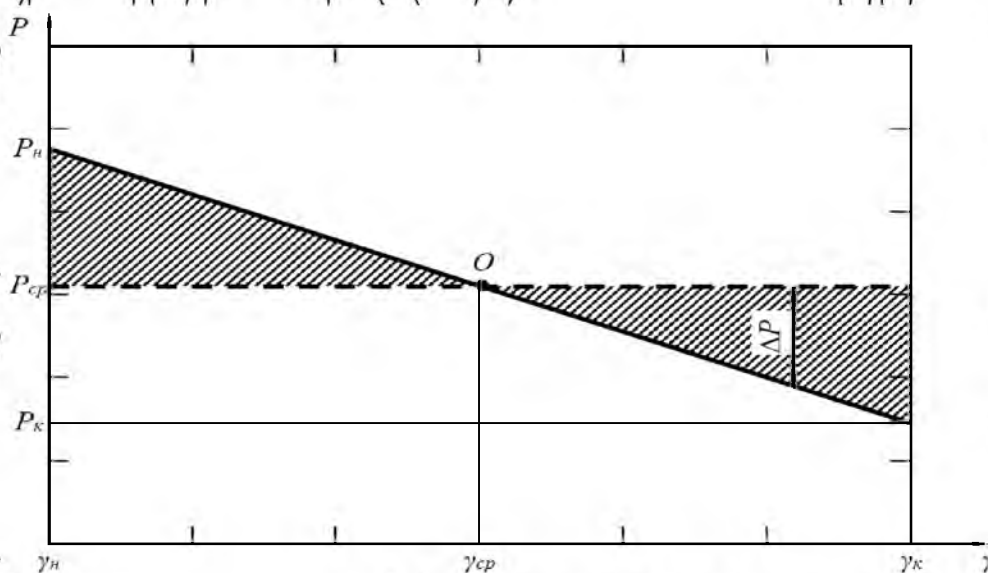


Рис. 3.1. Визначення поправочного зусилля ΔP :

— теоретична залежність;

--- емпірична залежність.

Для компенсації існуючих теоретичних похибок змістимо залежність $R_z=f(\gamma)$ таким чином, щоб вона проходила через точку середніх значень O . Відхилення теоретичної прямої від емпіричної є шуканим поправочним

зусиллям ΔP , яке з рис. 3.10 знайдемо як:

$$\Delta P = (\gamma - 20) \cdot K_T, \quad (3.22)$$

де 20 – кут нахилу стовб в поздовжньо-вертикальній площині при проведенні польового експерименту;

K_T – коефіцієнт нахилу теоретичної прямої (має розмірність сили):

$$K_T = \frac{P_v - P_n}{\gamma_v - \gamma_n}, \quad (3.23)$$

де γ_n, γ_v – нижній і верхній рівень варіювання поздовжнього кута нахилу стовби;

P_n, P_v – зусилля, відповідні межі варіювання кута γ .

Основними режимами роботи розпушувача є швидкість V і глибина обробки h . Пружно-ідеальнопластичне середовище, яким згідно з теоретичних викладок ми формалізуємо ґрунт характеризується чотирма основними величинами: модулем пружності, коефіцієнтом Пуассона, кутом внутрішнього тертя і коефіцієнтом зчеплення. Ці величини можна виключити зі списку факторів, залишивши тільки один значимий фактор - коефіцієнт зчеплення C .

При розпушуванні, стовби піднімають значний обсяг ґрунту. На це витрачається певна енергія, тому необхідно врахувати ще одну характеристику ґрунту - щільність ρ .

Таким чином, ми виділили сім основних факторів, що впливають на тяговий опір:

$$P = f(L, t, \beta, h, V, C, \rho). \quad (3.24)$$

Для зменшення кількості факторів скористаємося методом аналізу розмірностей і складанням безрозмірних комплексів [29].

Теорема Букінгема говорить: «Якщо будь-яке рівняння є однорідним відносно розмірностей, то його можна перетворити у співвідношення безрозмірних комбінацій величин, тобто безрозмірних комплексів».

Інтерпретуючи цю теорему в зворотну сторону, можна сказати, що, склавши співвідношення безрозмірних комплексів, можна перейти до однорідного рівняння, тобто рівняння, результат якого не залежить від вибору основних одиниць. Таким чином, нам необхідно скласти з обраних факторів і тягового опору набір безрозмірних комплексів. Виразимо всі фактори через три основні

одиниці виміру: масу M , час Θ і довжину L (таблиця 3.5)

Припустимо, що між параметрами процесу розпушування ґрунту існує наступне співвідношення:

$$\varphi(L^a, t^b, h^c, \beta^d, V^e, C^f, \rho^g) = P. \quad (3.25)$$

Підставами сюди замість символів їх розмірності з таблиці 3.5:

$$\varphi[L^a, L^b, L^c, (L/L)^d, (L/\Theta)^e, (ML^{-1}\Theta^{-2})^f, (ML^{-3})^g] = ML\Theta^{-2} \quad (3.26)$$

Таблиця 3.5

Розмірності змінних

Назва змінної	Позначення	Формула розмірності
Міжстовбна відстань	L	L
Товщина стовби	t	L
Глибина обробки	h	L
Кут нахилу стовби в поперечній площині	β	L/L
Швидкість обробки	V	$L\Theta^{-1}$
Коефіцієнт зчеплення	C	$ML^{-1}\Theta^{-2}$
Щільність ґрунту	ρ	ML^{-3}
Тяговий опір	P	$ML\Theta^{-2}$

Щоб отримане рівняння було однорідним щодо розмірностей, повинні виконуватися наступні співвідношення між показниками ступенів:

$$\text{для } M: 1 = f + g,$$

$$\text{для } \Theta: -2 = -e - 2f,$$

$$\text{для } L: 1 = a + b + c + d - e - f - 3g,$$

Маємо три рівняння з сімома невідомими. Спростимо їх, виключивши f , e і b . Тоді $f = 1 - g$; $e = 2g$; $b = 2 - a - c$. Підставляючи ці співвідношення для показників ступенів в формулу (3.25), отримуємо:

$$\varphi(L^a, t^{2-a-c}, h^c, \beta^d, V^{2g}, C^{1-g}, \rho^g) = P. \quad (3.27)$$

Об'єднуючи члени з однаковими показниками ступенів, отримуємо безрозмірні комбінації:

$$\Phi \left[\left(\frac{L}{t}\right)^a; \left(\frac{h}{t}\right)^c; \beta^d; \left(\frac{\rho \cdot V^2}{C}\right)^g \right] = \frac{P}{t^2 \cdot C} \quad (3.28)$$

Комбінації L/t , h/t і β висловлюють умови геометричної подоби системи. Комбінація $\rho \cdot V^2/C$ показує відношення сили інерції мас до граничного напруження середовища.

Правильність перетворень перевіримо за допомогою π -теорему, згідно з якою кількість отриманих комплексів має дорівнювати:

$$N = n - k \quad (3.29)$$

де n – кількість факторів ($n=7$);

k – кількість основних одиниць вимірювання ($k=3$).

Так як в нашому випадку кількість безрозмірних комплексів дорівнює величині N , перетворення виконані правильно.

Для встановлення функціонального зв'язку між отриманими критеріями розкладемо рівняння (3.28) як статичний ряд, розглядаючи тільки його перший

член [39]:

$$P = k \cdot t^2 \cdot C \cdot \left(\frac{L}{t}\right)^a \cdot \left(\frac{h}{t}\right)^c \cdot \beta^d \cdot \left(\frac{\rho \cdot V^2}{C}\right)^g \quad (3.30)$$

Постійну k , і показники ступенів a , c , d і g необхідно визначати експериментальним шляхом. Для проведення цього експерименту скористаємося трирівневим планом Бокса-Бенкена, в якому факторами служать чотири безрозмірних комплекси. Щоб зберегти умови незалежності факторів, варіювати їх будемо змінними, які зустрічаються тільки в одному комплексі - це міжстовбна відстань L , глибина обробітку h , кут нахилу стовб в поперечній площині β і швидкість V . Решта змінні мають постійні значення: $t=0,02\text{м}$, $\rho=1300\text{кг/м}^3$, $C=75\text{кПа}$. При плануванні експерименту з безрозмірними комплексами для задання кроку варіювання можуть використовуватися два шляхи [22]:

- визначаються області зміни і крок для змінних, потім для кожної реалізації змінних обчислюють безрозмірний комплекс;
- встановлюють можливі межі для комплексу і крок його зміни, потім визначають необхідні значення факторів.

Нами використовувався перший спосіб (таблиця 3.6). Можна передбачити, що збільшення кута нахилу стовб в поперечній площині викличе зменшення тягового опору. Тому змістимо асимптоту функції в область негативних кутів, замінивши фактор β на $\beta+1$, при цьому він залишається безрозмірною величиною.

Таблиця 3.6

Фактори і рівні їх варіації

Рівні	Фактори (безрозмірні комплекси)			
	L/t	h/t	$\beta+1$	
Змінні і рівні їх варіювання				
	$L, \text{м}$	$h, \text{м}$	$\beta, ^\circ$	$V, \text{м/с (км/год.)}$
+	0,60	0,35	14	2,78 (10)
0	0,45	0,25	7	1,11 (4)
1	2	3	4	5
-	0,30	0,15	0	0,56 (2)
Рівні варіювання безрозмірних комплексів				
+	30	17,5	14	0,134
0	22,5	12,5	7	0,021
-	15	7,5	0	0,005

Невідомі коефіцієнти визначалися за допомогою методу найменших квадратів, реалізованого ітераційним методом Квазі-Ньютона.

РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

НУБІП України

4.1. Результати імітаційного моделювання

Для ґрунту встановлено такі значення фізико-механічних характеристик (таблиця 4.1).

НУБІП України Таблиця 4.1
Фізико-механічні характеристики ґрунту

Характеристики ґрунту	Значення
Модуль пружності E , Н/м ²	$2 \cdot 10^7$
Коефіцієнт Пуассона ν	0,25
Щільність ρ , кг/м ³	$13 \cdot 10^3$
Коефіцієнт зчеплення C , Н/м ²	$7,5 \cdot 10^4$
Кут внутрішнього тертя ϕ_2 , °	30
Кут зовнішнього тертя (ґрунту по сталі) ϕ_1 , °	22

Використовуючи їх, проведено аналогічний експеримент на імітаційній моделі. Отримані значення тягового опору реального робочого органу і його моделі зведені в таблицю 4.2.

Різниця між отриманими сумами не суттєва, оскільки знайдений для них критерій Фішера, рівний $F = 0,002$ менше табличного, рівного $F_{табл} = 5,1$. Отже,

імітаційна модель адекватна.

НУБІП України Таблиця 4.2
Тяговий опір реального робочого органу і його моделі

№	Значення факторів		Тяговий опір робочого органу, кН	
	L , м	β , °	реального	моделі
1	0,60	0	25,37	23,37
2	0,30	14	9,86	8,58
3	0,45	0	19,37	14,24
4	0,45	7	13,81	12,82
5	0,60	7	16,76	12,29
6	0,30	0	18,23	15,22
7	0,45	14	8,57	10,76
8	0,60	14	9,06	11,12
9	0,30	7	8,95	13,13

4.2. Визначення залежності розташування площини сколювання від кута загострення

Використовуючи розроблену модель смугового розпушування ґрунту відповідно до обраного плану експерименту, визначені реакції стовби (рис.2.9) і відносну об'ємну деформацію, тобто приріст пористості ґрунту (додаток Б).

На підставі отриманих даних складені рівняння регресії (див. додаток Б), які після

Після виключення малозначущих факторів, знайдені рівняння приймуть вид:

$$R_x = 11 \cdot 10^3 + 44 \cdot 10^3 \cdot t \cdot \alpha + 91 \cdot 10^3 \cdot t \cdot \beta - 134 \cdot \alpha \cdot \beta - 22 \cdot 10^6 \cdot t^2 + 13 \cdot 10^4 \cdot h^2 \quad (4.1)$$

характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,85$; $F=1 \cdot 10^{-6}$; $p=4,8 \cdot 10^{-15}$.

$$R_y = -1947 + 469 \cdot L \cdot b + 4853 \cdot t \cdot \gamma + 12 \cdot 10^3 \cdot t \cdot \beta + 888 \cdot h \cdot \beta + 2 \cdot \gamma \alpha - 7 \cdot \gamma \cdot \beta - 37 \cdot 10^5 \cdot t^2 + 7755 \cdot h^2 - 14 \cdot \beta^2 \quad (4.2)$$

характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,97$; $F=2 \cdot 10^{-6}$; $p=1,13 \cdot 10^{-24}$.

$$R_z = -1761 - 23 \cdot 10^3 \cdot t \cdot \alpha - 29 \cdot 10^3 \cdot t \cdot \beta + 49 \cdot \alpha \cdot \beta + 90 \cdot 10^5 \cdot t^2 - 44 \cdot 10^3 \cdot h^2 \quad (4.3)$$

характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,88$; $F=3 \cdot 10^{-8}$; $p=6,2 \cdot 10^{-17}$.

$$M_x = 1791 - 182 \cdot L \cdot \gamma - 34 \cdot 10^4 \cdot t \cdot h - 278 \cdot h \cdot \alpha + 6 \cdot \gamma \cdot \beta; \quad (4.4)$$

характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,84$; $F=0$; $p=2 \cdot 10^{-10}$.

$$M_y = 47 \cdot 10^3 - 90 \cdot 10^3 \cdot L - 996 \cdot \gamma - 2377 \cdot \alpha + 1532 \cdot L \cdot \gamma + 4167 \cdot L \cdot \alpha - 35 \cdot \gamma \cdot \alpha - 9 \cdot \gamma \times \times \beta + 37 \cdot 10^5 \cdot t^2; \quad (4.5)$$

характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,68$; $F=0,014$; $p=4,9 \cdot 10^7$.

$$M_z = 720 - 86 \cdot 10^4 \cdot t \cdot h + 13 \cdot 10^3 \cdot t \cdot \beta - 293 \cdot h \cdot \gamma + 11 \cdot \gamma \cdot \beta + 17 \cdot \beta^2; \quad (4.6)$$

характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,91$; $F=0$; $p=7,9 \cdot 10^{-20}$.

$$\varepsilon_v = -5,59 \cdot 10^{-4} + 15,44 \cdot t - 28,67 \cdot L \cdot t + 0,39 \cdot t \cdot \alpha - 0,45 \cdot t \cdot \beta - 4,08 \times 10^{-4} \cdot \gamma - \beta + 7,11 \cdot 10^{-4} \cdot \beta^2 \quad (4.7)$$

характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,90$; $F=1 \cdot 10^{-6}$; $p=1,3 \cdot 10^{-17}$.

З таблиці 4.3 видно, що реакції R_x і R_z залежать від одних і тих же факторів, що говорить про їхню залежність і однакову природу походження. Це ж підтверджує і високий коефіцієнт кореляції Пірсона, рівний 0,83.

Таблиця 4.3
Ранжування значущих чинників

Ранг	R_x		R_y		R_z		M_x		M_y		M_z		ε_v	
	Φ	p	Φ	p	Φ	p	Φ	p	Φ	p	Φ	p	Φ	p
1	h^2	$1 \cdot 10^{-11}$	t^2	$8 \cdot 10^{-8}$	$t \cdot a$	$5 \cdot 10^{-12}$	$t \cdot h$	$7 \cdot 10^{-9}$	a	$2 \cdot 10^{-5}$	$t \cdot h$	$7 \cdot 10^{-12}$	$t \cdot a$	$1 \cdot 10^{-11}$
2	$\alpha \cdot \beta$	$8 \cdot 10^{-9}$	$h \cdot \beta$	$1 \cdot 10^{-7}$	h^2	$5 \cdot 10^{-10}$	$\gamma \cdot \beta$	$9 \cdot 10^{-7}$	$L \cdot a$	$1 \cdot 10^{-4}$	β^2	$7 \cdot 10^{-5}$	$L \cdot t$	$5 \cdot 10^{-9}$
3	$t \cdot \alpha$	$2 \cdot 10^{-8}$	$t \cdot \gamma$	$2 \cdot 10^{-7}$	$\alpha \cdot \beta$	$2 \cdot 10^{-8}$	$h \cdot a$	$2 \cdot 10^{-9}$	L	$3 \cdot 10^{-4}$	$t \cdot \beta$	$3 \cdot 10^{-4}$	t	$1 \cdot 10^{-8}$
4	$t \cdot \beta$	$4 \cdot 10^{-6}$	$t \cdot \beta$	$5 \cdot 10^{-7}$	$t \cdot \beta$	$5 \cdot 10^{-5}$	$L \cdot \gamma$	$2 \cdot 10^{-3}$	$\gamma \cdot a$	$9 \cdot 10^{-4}$	$\gamma \cdot \beta$	$2 \cdot 10^{-3}$	$\gamma \cdot \beta$	$7 \cdot 10^{-5}$
5	t^2	$3 \cdot 10^{-4}$	β^2	$2 \cdot 10^{-6}$	t^2	$1 \cdot 10^{-4}$	-	-	γ	$3 \cdot 10^{-3}$	$h \cdot \gamma$	$1 \cdot 10^{-3}$	β^2	$7 \cdot 10^{-4}$
6	-	-	$\gamma \cdot a$	$6 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-	t^2	$1 \cdot 10^{-2}$	-	-	$t \cdot \beta$	$3 \cdot 10^{-3}$
7	-	-	$\gamma \cdot \beta$	$3 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-	$\gamma \cdot \beta$	$3 \cdot 10^{-2}$	-	-	-	-
8	-	-	$L \cdot \beta$	$9 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-	$L \cdot \gamma$	$4 \cdot 10^{-2}$	-	-	-	-
9	-	-	h^2	$6 \cdot 10^{-4}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Примітка. Φ - значимий фактор.

Основними факторами, що визначають зусилля обтиску пласта R_x , а отже і тяговий опір R_z , є глибина обробки, а також фактори взаємодії між товщиною стовби, кутом її нахилу в поперечній площині і кутом заточки. З них глибина h визначається агрономіями, а іншими факторами можна керувати за допомогою товщини стовби t і кута її нахилу в поперечній площині β . Таким чином, ці два параметри є основними, для раціоналізації з точки зору енергоємності. Це стосується і приросту пористості, тут теж керуючими факторами є t і β . Отже

можна дати рекомендацію: при проектуванні ґрунтообробного агрегату з робочими органами об'ємного типу, товщину стовби і кут нахилу в поперечній площині необхідно робити регульованими. Причому з цих двох параметрів провідну роль відіграє товщина стовби.

До рівняння регресії вертикальної складової реакції додається кут нахилу стовба в поздовжньо-вертикальній площині, що свідчить про його важливе значення для заглиблення робочого органу.

Знайдені моменти приведення не впливають на тяговий опір, але визначають точку прикладання головних векторів сил: чим більше моменти, тим далі від кінця стовби прикладений головний вектор.

Аналізуючи отриману математичну модель приросту пористості ґрунту, з урахуванням значущості факторів, можна зробити висновок, що всі істотні фактори включають або товщину стовби, або кут її нахилу в поперечній площині.

Таким чином, ці два параметри є керуючими для якості обробки ґрунту. Тобто, змінюючи їх, можна впливати на всі фактори моделі і домогтися необхідної якості обробки.

Залежність між досліджуваними функціями відгуку і основними геометричними параметрами робочого органу можна простежити, побудувавши відповідні графіки (рис. 4.1 - 4.4) (значення незадіяних параметрів приймалися рівними їх середнім величинам). На графіках видно тенденції, описані при аналізі значущості факторів. Як і передбачалося, графіки тягового опору R_y (рис.4.3) практично повністю повторюють графіки обтиску ґрунту R_x (рис. 4.1), що підтверджує тісний зв'язок між цими параметрами.

Винятком є тільки залежність реакцій від кута заточки стовба α . При збільшенні його значення до рівня кута зовнішнього тертя ґрунту φ_1 зростає зусилля обтиску, а, отже, і тяговий опір. Разом з цим підвищується якість обробки. При перевищенні куту α рівня кута зовнішнього тертя ґрунту починає інтенсивно підніматися над стовбами, при цьому зусилля обтиску зменшується. Але за рахунок збільшення шляху, котрий проходить ґрунт, тяговий опір знаряддя продовжують рости. При цьому деформація ґрунту теж продовжує

збільшуватися, але з постійно зменшується інтенсивністю, яка в кінцевому підсумку падає до нуля

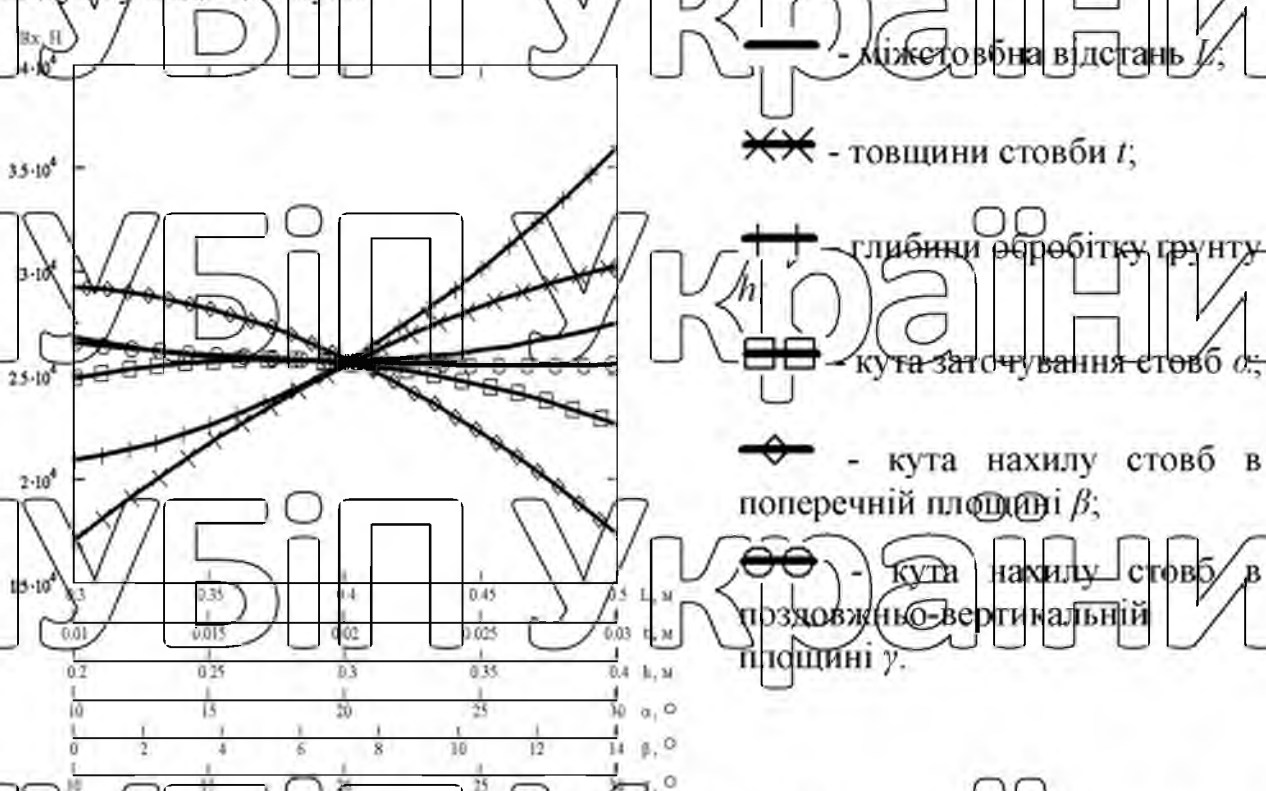


Рис. 4.1. Залежність зусилля обтиску пласта R_x від параметрів робочого органу.

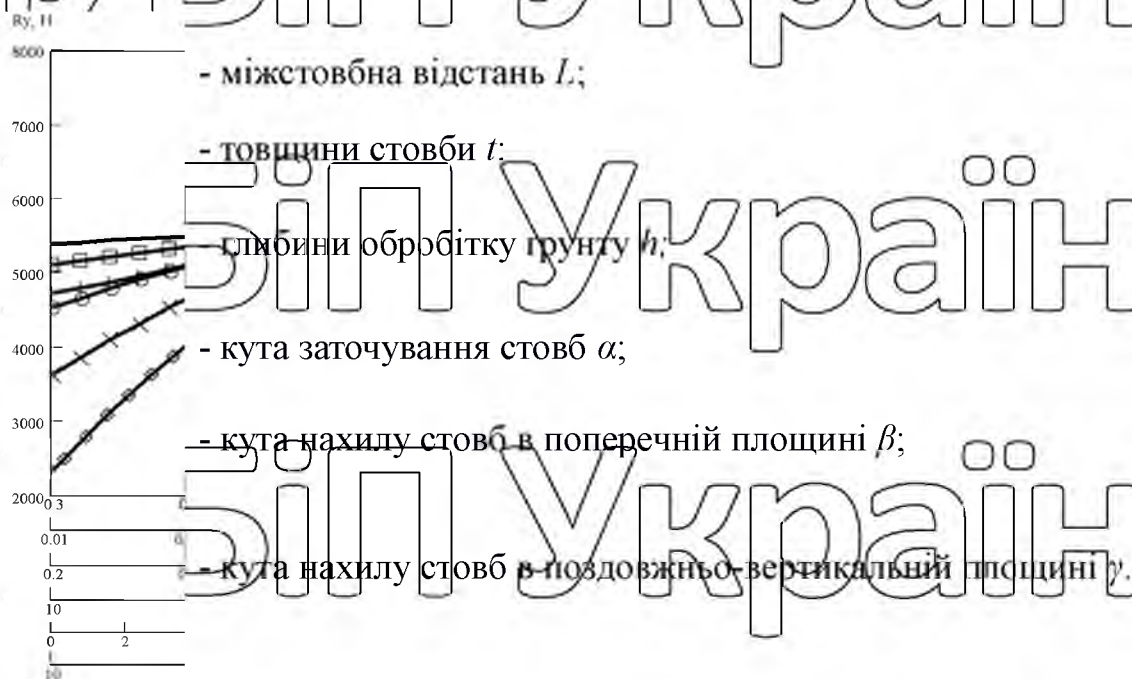


Рис. 4.2. Залежність зусилля заглиблення робочого органу R_y від параметрів робочого органу

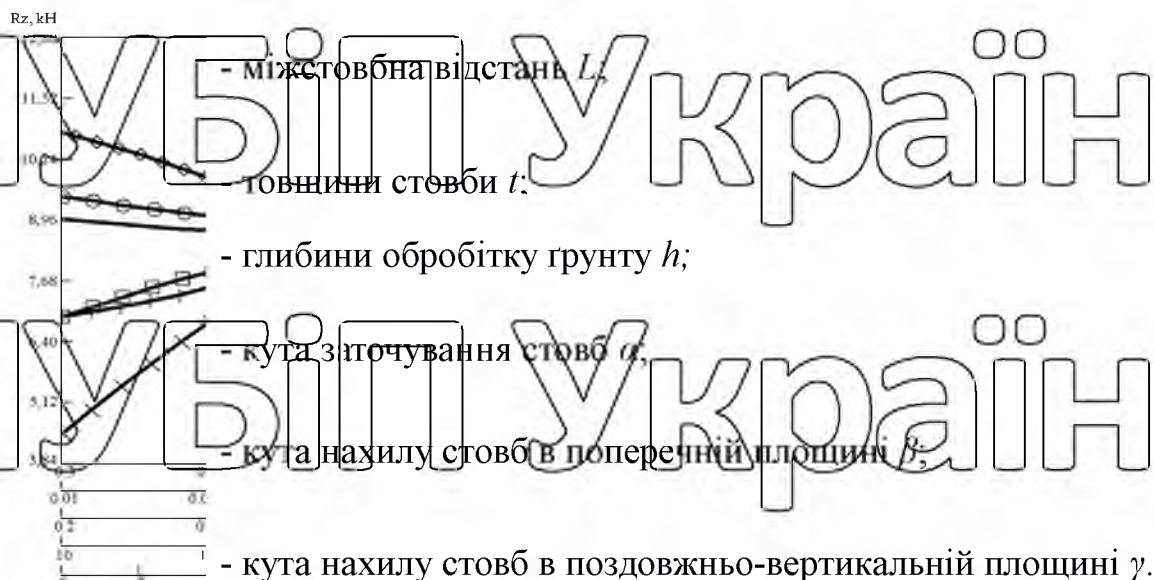


Рис. 4.3. Залежність тягового опору робочого органу R_z від параметрів робочого органу

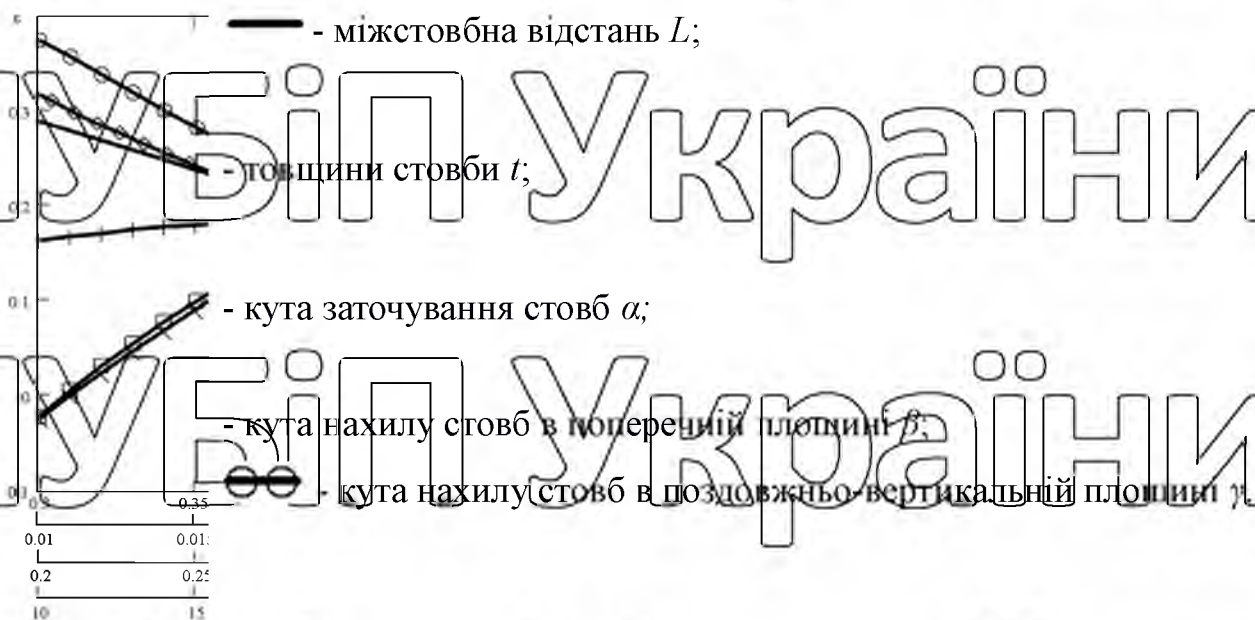


Рис. 4.4. Залежність збільшення пористості ґрунту після розпушування від параметрів робочого органу:

Таким чином, з перевищенням величини α рівня кута φ , ефективність витраченої енергії зникається. У зв'язку з цим рекомендовано робити кут заточки стовб α менше ніж кут зовнішнього тертя ґрунту φ , а якість обробки

слід збільшувати за рахунок інших параметрів. Інші фактори на реакції R_x і R_z впливають наступним чином: істотне підвищення реакцій відбувається при збільшенні глибини обробки, товщини стовбів і при зменшенні кута нахилу стовбів в поперечній площині. Невелике зростання реакцій буде при збільшенні міжстовбної відстані і зменшенні кута нахилу стовбів в поздовжньо-вертикальній площині.

Вертикальна складова реакції стовбів R_z збільшується при активзації будь-якого з параметрів. Причому найбільший вплив має кут заточування і товщина стовбів. Це підтверджує висновок про значне збільшення підйому ґрунту над стовбами при збільшенні кута їх заточування α .

Приросту пористості сприяє зміна товщини стовбів і кута її заточки α в бік більших значень. Хоча при збільшенні кута заточування вище 25° , його вплив нівелюється. Не менший вплив має міжстовбна відстань L і кут нахилу стовбів в поздовжньо-вертикальній площині γ . Для цих параметрів на всій досліджуваній проміжку отримана зворотна залежність. Кут нахилу стовбів в поперечній площині β також має істотне значення для якості обробки, і хоча ця залежність неоднозначна, очевидно, що потрібно прагнути до зменшення цього кута.

При розпушуванні ґрунту робочими органами чизельного типу існує критична глибина обробки, при перевищенні якої нижні шари не розпушуються, а зминаються під дією стовбів [40]. Оскільки проведене моделювання показало, що приріст пористості не залежить від глибини обробки (таблиця 4.3), критична глибина лежить поза досліджуваним проміжком 0,20...0,40 м. Це істотний плюс для розроблюваного робочого органу, оскільки дозволяє використовувати його на глибини, що визначаються технологією обробки культури, не побоюючись зниження якості обробки.

Виходячи з отриманих тенденцій, впливу чинників на якість обробки, найбільш раціонально зробити міжстовбну відстань, кут нахилу в поперечній площині і кут нахилу в поздовжньо-вертикальній площині мінімально можливими, а товщину стовбів і кут заточування максимальними. Однак надмірне підвищення пористості ґрунту негативно позначається на врожайності,

його оптимальне значення дорівнює 0,25...0,30 [28]. Крім того, запропонована раціоналізація параметрів щодо збільшення пристотості, призведе до значного збільшення тягового опору робочого органу. Таким чином, виникає система вимог, яким повинен задовольняти робочий орган з раціональними параметрами.

4.3. Визначення раціонального кута заточування стовб

Використовуючи вищеписану методичку, нами отримані значення кутів відхилення площини відколу від площини переміщення ріжучої кромки стовб

δ , при різних кутах заточення α (рис. 4.5, 4.6). За їх значенням складені рівняння:

$$\text{для чорнозему} \quad \delta = 24,7 - 1,2 \cdot \alpha; \quad (4.8)$$

$$\text{для попелу} \quad \delta = 16,3 - 1,15 \cdot \alpha; \quad (4.9)$$



Рис. 4.5. Площини відколу при русі стовб з різним кутом заточення: а) кут заточування 10° ; б) кут заточування 20° ; в) кут заточування 30° .

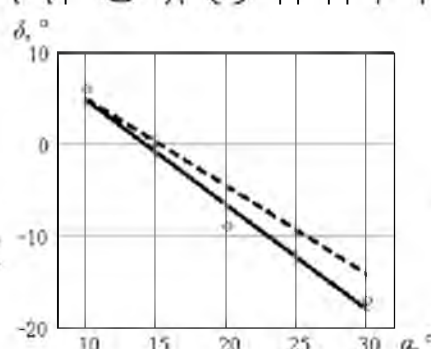
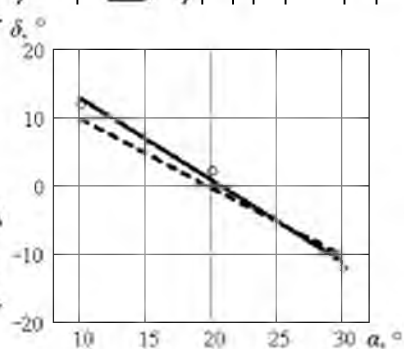


Рис. 4.6 Адекватність отриманої моделі. а) - чорнозем; б) - попіл;

Коефіцієнти кореляції рівні: для чорнозему $r_{\text{факт}} = 0,997$, для попелу

$r_{факт} = -0,998$. Так як абсолютне значення фактичного коефіцієнта в обох випадках вище табличного $r_{табл.} = 0,996$, можна зробити висновок про правильність вибору лінійної моделі. Знак «-» вказує на зворотню залежність між кутом заточування і кутом відхилення площині відколу.

Щоб перевірити правильність отриманих теоретичних залежностей необхідно зіставити їх з експериментальними. Для цього знайдені механічні характеристики ґрунту (таблиця 4.4) [31].

Підставивши їх в (2.14), отримаємо теоретичні рівняння впливу кута заточування α на відхилення кута відколу δ , графічна інтерпретація яких підтверджує їх схожість з результатами проведеного експерименту.

Відповідно до (2.15) знайдемо теоретичні значення раціональних кутів заточки (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4

Результати визначення раціонального кута заточування стовби

Об'єкт	Кут внутр. тертя, φ_1	Кут зовн. тертя, φ_2	Раціональний кут заточування, α		похибка, %
			Теорет.	Експеримент.	
Чорнозем	22°	30°	19,5°	20,6°	5,6
Попіл	45°	48°	15,2°	14,2°	6,6

При розпушуванні ґрунту стовбами видно, що процес розпушування починається з відколу, далі ґрунт проходить між стовбами, де піднімається на висоту до 20 см, стискається, інтенсивно кришиться і після цього повертається на дно борозни. При куті заточування стовб 20° екол пласта відбувається досить «чисто», тобто межа розпушування збігається з площиною руху стовби.

4.4. Дослідження стиснення ґрунту похилими стовбами

Дотримуючись плану експерименту, нами отримана сила обтискання P_m при різних комбінаціях міжстовбної відстані L_m , товщині стовб t_m і кута їх нахилу в поперечній площині β_m . Потім за формулами приведення (3.18), (3.19) визначені параметри реального робочого органу (таблиця 4.5).

Таблиця 4.5

Результати обтискання ґрунту похилими стовбами

№	Параметри моделі				Параметри реального робочого органу			
	$L_m, \text{м}$	$t_m, \text{м}$	$\beta_m, ^\circ$	$P_m, \text{кН}$	$L_n, \text{м}$	$t_n, \text{м}$	$\beta_n, ^\circ$	$p, \times 10^3 \cdot C_n$
1	0,15	0,010	10	2,15	0,3	0,02	10	0,22
2	0,25	0,010	10	2,51	0,5	0,02	10	0,25
3	0,15	0,040	10	11,07	0,3	0,08	10	1,12
4	0,25	0,040	10	4,53	0,5	0,08	10	0,46
5	0,15	0,025	0	12,07	0,3	0,05	0	1,23
6	0,25	0,025	0	5,71	0,5	0,05	0	0,40
7	0,15	0,025	20	5,37	0,3	0,05	20	0,54
8	0,25	0,025	20	3,84	0,5	0,05	20	0,39
9	0,20	0,010	0	4,09	0,4	0,02	0	0,41
10	0,20	0,040	0	14,76	0,4	0,08	0	1,50
11	0,20	0,010	20	3,89	0,4	0,02	20	0,39
12	0,20	0,040	20	5,34	0,4	0,08	20	0,54
13	0,20	0,025	10	3,91	0,4	0,05	10	0,16
14	0,20	0,025	10	2,66	0,4	0,05	10	0,27
15	0,20	0,025	10	2,15	0,4	0,05	10	0,22

Провівши лінеаризацію квадратного рівняння, за допомогою методу найменших квадратів, ми отримали коефіцієнти регресії, які потім були перевірені на значимість. Значимими вважались коефіцієнти для яких коефіцієнт Стюдента перемажав табличне значення ($t_{\text{табл}} = 2,01$). В отриманому рівнянні всі фактори виявились значимими.

Таблиця 4.6

Фактори, які впливають на стиск ґрунту похилими стовбами

Ранг	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Фактори	β^2	$t \cdot \beta$	β	$L \cdot t$	t	$L \cdot \beta$	t^2	L^2	L
Коефіцієнт Стюдента	8,18	6,77	5,47	5,07	3,43	3,55	3,43	2,66	2,61
Рівень достовірності	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$

Рівняння регресії має вид:

$$p = 10^3 \cdot C_{II} \cdot (1,85 - 7,76 \cdot L + 26,83 \cdot t - 0,09 \cdot \beta - 58,5 \cdot L \cdot t + 0,12 \cdot t \cdot \beta - 0,78 \cdot t \cdot \beta + 1,6 \cdot L^2 + 136,58 \cdot t + 2,9 \cdot 10^{-4} \cdot \beta^2) \quad (4.10)$$

У цьому рівнянні питома сила стиснення ґрунту p має розмірність і підставляється коефіцієнта зчеплення реального ґрунту C_{II} . Коефіцієнт

детермінації для отриманої моделі дорівнює: $R^2=0,98$, це означає, що на частку

випадкових факторів, не врахованих цим рівнянням, залишається всього 2%. Так

як $F_{факт} = 0,058 < F_{абл} = 0,287$, можна зробити висновок, що отримана модель адекватна. З таблиці 4.6 видно, що найбільше на питому стискаючу силу, а, отже,

і на тяговий опір, впливає кут нахилу стійок в поперечній площині β , і величина

стиснення ґрунту L . Відповідно до цього впливають і їх парні і квадратичні

взаємодії. Таким чином, найбільше значення має оптимізація найбільш важкого

чинника: кута нахилу стійок β .

Для отриманої моделі нами побудований графік залежності питомої сили

від найістотніших чинників: кута нахилу стійок β і їх товщини t при міжстовбній

відстані рівній 0,4 м (рис. 4.7). З графіка видно, що зі збільшенням стиснення

ґрунту (рис. 4.7), зростає і питома навантаження p . З підвищенням кута нахилу

стійок β навантаження спочатку падає, потім, утворивши точку екстремуму

функції, починає рости. Очевидно, це значення β буде раціональним. Воно

змінюється в залежності від товщини стійки.

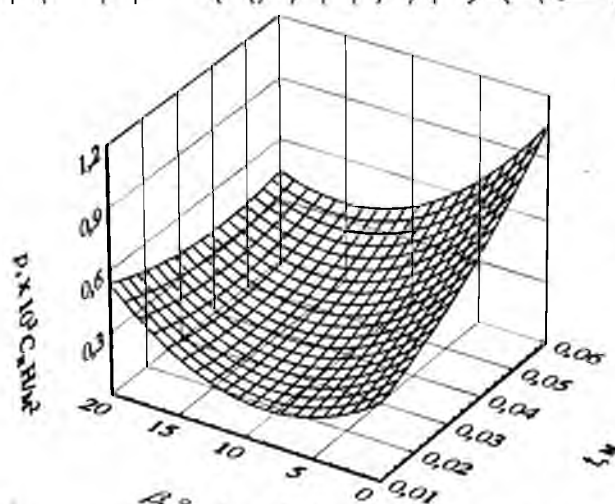


Рис. 4.7. Залежність зусилля обтискання від кута нахилу стійок і величини обтискання при $l=0,4$ м

Більш точною енергетичною характеристикою реального процесу розпушування є робота, що витрачається на стиснення пласта одниничної площі поперечного перерізу. Відповідно до (3.21), вона дорівнює:

$$a = C_H \cdot 10^3 \cdot (1,85 - 7,76 \cdot L \cdot t + 13,41 \cdot t - 0,09 \cdot \beta \cdot t - 29,25 \cdot L^2 \cdot t^2 + 0,12 \cdot L \cdot \beta \cdot t - 0,39 \cdot \beta \cdot t^2 + 45,53 \cdot t^3 + 1,6 \cdot L^2 \cdot t + 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2 \cdot t). \quad (4.11)$$

Отримане рівняння можна спростити, виразивши міжстовову відстань L і переміщення пластин (сумарну товщину стовб) t через відносну деформацію:

$$\varepsilon = \frac{t}{L}. \quad (4.12)$$

Використовуючи дані, отримані в ході проведення експерименту, замінивши при цьому чинники L і t на відносну деформацію ε , отримаємо нове рівняння регресії. Проінтегрувавши його, знайдемо питому роботу:

$$a = C_H \cdot (251,9 \cdot \varepsilon + 1342,2 \cdot \varepsilon^2 - 41,9 \cdot \beta \cdot \varepsilon - 159,0 \cdot \varepsilon^2 \cdot \beta - 5,4 \cdot 10^3 \cdot \varepsilon^3 + 2,93 \cdot \beta^2 \cdot \varepsilon). \quad (4.13)$$

Для кожного значення відносного стиснення ε величина β_{opt} , для якої питома робота має мінімальне значення a_{min} (рис.4.8). Очевидно, що саме цей кут нахилу стовб буде оптимальним. Знайти його значення можна, вирішивши рівняння: $\frac{\partial a}{\partial \beta} = 0$. Отримаємо:

$$\beta_{opt} = 7,2 + 27,1 \cdot \varepsilon. \quad (4.14)$$

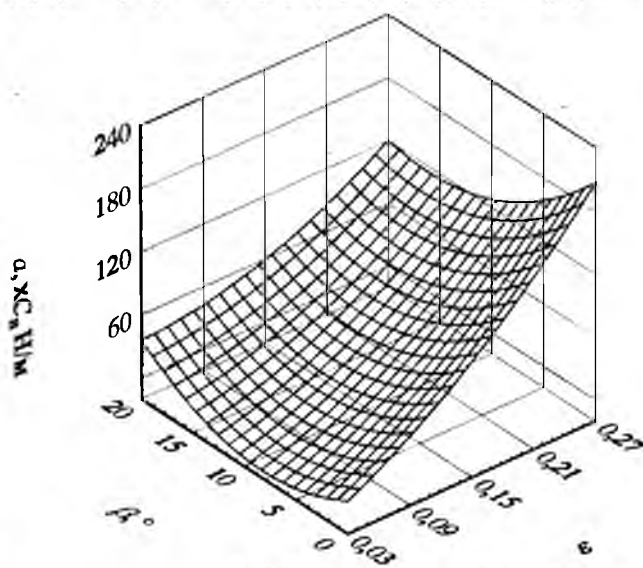


Рис. 4.8. Залежність питомої роботи від відносної деформації і кута нахилу стовб в поперечній площині

Отримане рівняння можна представити у вигляді графіка (рис. 4.9.), згідно з яким оптимальний кут нахилу β змінюється в межах від 8 до 14°. Коефіцієнт зчеплення C_{β} , що є характеристикою ґрунту, не входить в рівняння (4.21), отже, оптимальне значення кута β не залежить від типу і стану ґрунту.

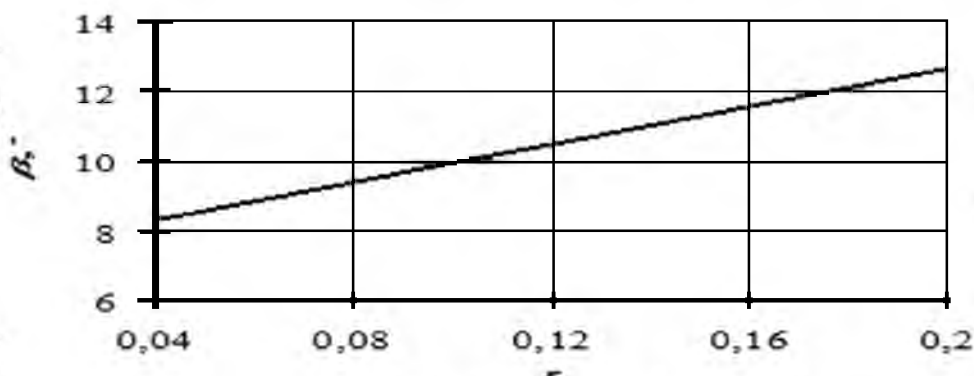


Рис. 4.9. Залежність оптимального кута нахилу стовбів в поперечному напрямку від відносної деформації ґрунту

4.5. Визначення залежності тягового опору смугового глибокорезищувача від параметрів робочих органів. Енергоємність технологічного процесу

Згідно з планом, проведені всі варіанти експерименту, із заданою повторністю, за отриманими даними визначені коефіцієнти рівняння (3.30): $k=42,42$; $a=0,19$; $c=0,80$; $d=-0,21$; $g=0,10$, з урахуванням яких воно набуває вигляду:

$$P = 42,42 \cdot t^2 \cdot c \left[\left(\frac{L}{t} \right)^{0,19} \cdot \left(\frac{h}{t} \right)^{0,80} \cdot (\beta + 1)^{-0,21} \cdot \left(\frac{\rho \cdot v^2}{c} \right)^{0,10} \right] \quad (4.15)$$

Спростивши отриманий вираз, отримаємо:

$$P = \frac{42,42 \cdot t^{1,04} \cdot h^{0,8} \cdot v^{0,2} \cdot L^{0,19} \cdot c^{0,9} \cdot \rho^{0,1}}{(\beta + 1)^{0,21}} \quad (4.16)$$

Для цієї моделі знайдений коефіцієнт Фішера, котрий склав $F=1,38$, так

як $F < F_{\text{табл}} = 1,6$ отримана модель є адекватною.

З рівняння (4.16) видно, що всі досліджувані фактори, крім кута нахилу стовба в поперечній площині, мають прямий зв'язок з тяговим опором.

Найбільший вплив має товщина стовби і глибина обробки, тобто площа, на величину якої відбувається обтиснення поперечного перерізу пласта. Швидкість і міжстовбна відстань мають набагато меншу вагу.

З властивостей ґрунту найбільш значущою є її характеристика міцності - коефіцієнт зчеплення. Інерційна ж (щільність) на тяговий опір впливає менше, що говорить про незначне переміщення ґрунту в поздовжньому напрямку.

Підняття ґрунту вгору хоч і велике, але направлено перпендикулярно до сили тягового опору, тому проявляється в ній тільки через силу тертя, яка при даних параметрах стовби відносно мала.

Порівняємо отриману формулу з існуючими залежностями, що визначають тяговий опір ґрунтообробних робочих органів. Однією з найбільш поширених є раціональна формула Горячкіна [21]:

$$P = Gf + Kab + \varepsilon abV^2,$$

де G - вага плуга;

f - коефіцієнт переміщення плуга;

K - питомий опір різанню;

ab - площа поперечного перерізу пласта;

εabV^2 - опір ґрунту відкинути його лемешем в сторону.

Оскільки ми розглядаємо тільки робочий орган, то перший доданок, що враховує опір перекочування коліс плуга враховувати не будемо. Найбільшу вагу в цій формулі має другий член (50-55%) [35]. Порівнюючи цю формулу до знайденої видно, що нами отримано таке ж значення, але замість питомого опору

різанню використаний коефіцієнт зчеплення: $t^{1.01} \cdot h^{0.8} \cdot C^{0.9}$. Це одна величина враховується в обох порівнюваних формулах - це швидкість V , причому в теоретичних передумовах до визначення нашої формули швидкість також в

квадраті (3.30). Однак експеримент показав, що вона не значно впливає на тяговий опір, і в остаточному вигляді маємо змінну $V^{0,2}$.

Одним з основних недоліків формули Горячкіна є використання питомого опору різання, оскільки ця величина не є чистою характеристикою ґрунту, а залежить від форми робочого органу [35]. Дослідниками [35] була запропонована залежність:

$$P = A \cdot C_{пл} \cdot h^{1,35}$$

де A – величина, що відображає конструктивні особливості робочого органу;

$C_{пл}$ – кількість ударів динамічного твердоміра;

h – глибина обробки.

Запропонована характеристика $C_{пл}$ залежить тільки від стану ґрунту, в яку вдавлюють твердомір. Нами використовується схожа характеристика міцності, але більш поширена в механіці ґрунтів: коефіцієнт зчеплення C , котрий також залежить тільки від стану ґрунту.

Таким чином, отримана нами формула для визначення тягового опору і існуючі мають однакові теоретичні передумови, але оскільки її коефіцієнти знайдені безпосередньо за допомогою об'ємного глибокорозпушувача, вона краще підходить для даного робочого органу, в досліджуваних межах.

Щоб ввести в отриману емпіричну залежність (4.16) кут нахилу стовба в поздовжньо-вертикальній площині γ , визначимо величину поправочного зусилля

ΔP (3.22). З урахуванням формул (3.23) і (4.3), кутовий коефіцієнт дорівнює: $K_T = -111,7$ Н. Тоді функція (4.16) набуде вигляду:

$$P = \frac{42,42 \cdot t^{1,01} \cdot \beta^{0,8} \cdot V^{0,2} \cdot L^{0,19} \cdot c^{0,9} \cdot \rho^{0,1}}{(\beta+1)^{0,22}} + K_T \cdot (\gamma - 20) \quad (4.17)$$

Отримані залежності покажемо графічно (рис.4.10). Вони повторюють графіки, побудовані при моделюванні, що підтверджує адекватність розробленої імітаційної моделі.

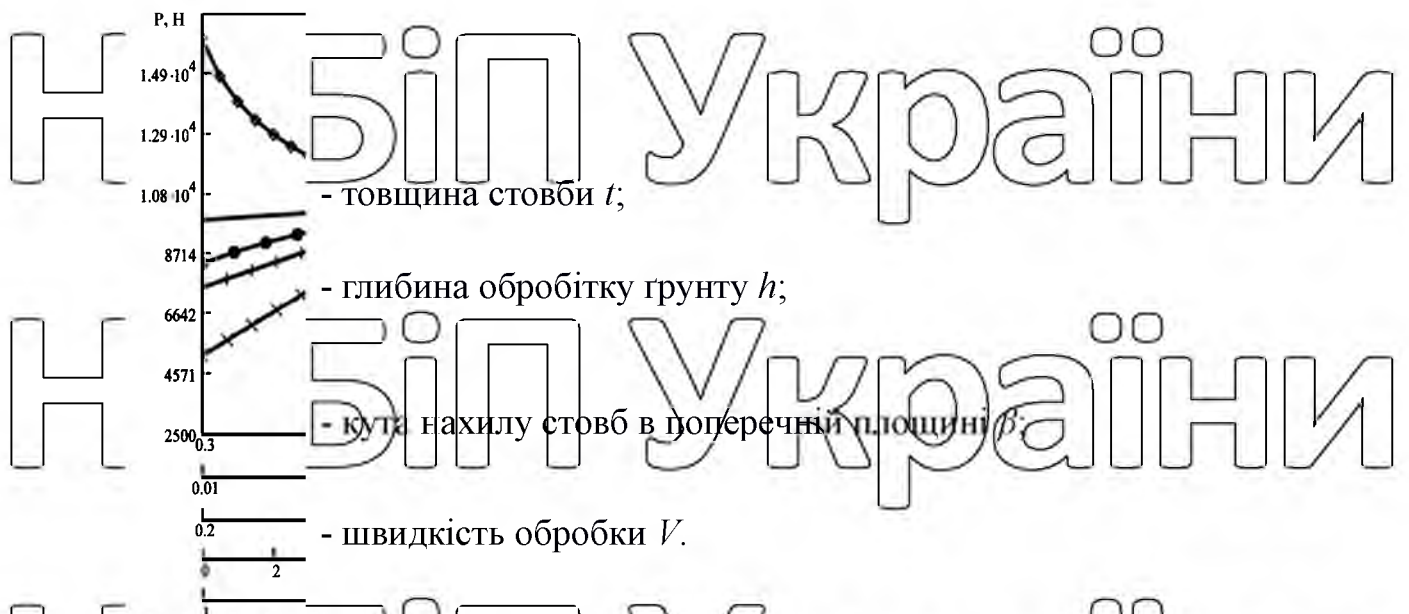


Рис. 4.10. Залежність тягового опору від параметрів робочого органу

Висновки розділу 4:

1. Розроблена імітаційна модель об'ємного розпушування ґрунту адекватна реальному процесу.
2. Сила обтиску пласта характеризує енергоємність всього процесу об'ємного розпушування ґрунту.
3. Товщина стовби t і кут її нахилу в поперечній площині β визначають енергоємність і якість об'ємного розпушування ґрунту (рівняння 4.1 - 4.7).
4. Зміна параметрів робочого органу в бік поліпшення якості обробки призводить до збільшення енергоємності процесу. Тому виникають передумови для вирішення компромісної задачі, яка дозволить знайти їх раціональні величини.
5. Так як при розпушуванні ґрунту розробляються робочим органом якість обробки не залежить від глибини (рівняння 4.7), її гранично допустима величина знаходиться поза досліджуваного проміжку 0,20...0,40 м.
6. Серед характеристик ґрунту на процес об'ємного розпушування в найбільшою мірою впливає коефіцієнт зчеплення C .
7. Експериментальні дослідження напрямки розвитку бічної площині сколюватись пласта підтверджують справедливість теоретичної формули (2.15) раціонального кута заточування стовби α . Для чорнозему його величина коливається в районі

20°
8. На підставі лабораторних досліджень обтиску пласта встановлено, що з точки зору енергоємності процесу, оптимальне значення кута нахилу стовба в поперечній площині β залежить тільки від величини відносного обтиску. Воно коливається в межах 8...14°.

НУБІП Україніи

НУБІП Україніи

НУБІП Україніи

НУБІП Україніи

НУБІП Україніи

НУБІП Україніи

РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

НУБІП УКРАЇНИ

5.1. Визначення раціональних параметрів об'ємного смугового глибокорозпушувача



Рис. 5.1. Загальний вигляд смугового глибокорозпушувача СГР-4



Рис. 5.2. Смуговий глибокорозпушувач СГР-4 в роботі



Рис. 5.3. Робочі органи смугового глибокорозпушувача СГР-4

Глибокородушувач має начіпний спосіб агрегування з енергосабоами класу 30 кН. Складається з жорсткої рами прямокутної форми, яка спереду спирається на два опорних колеса, а ззаду на дисковий каток. Рама

начіплюється на трактор за допомогою звичайного начіпного пристрою і забезпечена чотирма опорними стовбами для постановки машини на зберігання.

Опорні колеса мають пневматичний хід і мають автономні механізми регулювання глибини обробки ґрунту. Крім цього, колеса можуть переміщення на рамі в поздовжньому напрямку, що дозволяє забезпечити стійке заглиблення

глибокородушувача, не залежно від стану ґрунту.

Похилені стовби здійснюють об'ємне смугове розпушування ґрунту на задану глибину і кріпляться до ригелів рами за допомогою перехідників.

Для запобігання забивання стовб поживними залишками і бур'яном попереду кожної зі стовб встановлений похилий дисковий ніж. Його поперечний

кут нахилу і слід на поверхні ґрунту збігається з поперечним кутом нахилу і

слідом відповідної стовби. Крім того, для посилення захисного ефекту від забивання, дискові ножі мають індивідуальне регулювання кута атаки.

Дисковий каток складається з набору плоских дисків, попарно і жорстко пов'язаних маточинами в секції, і вільно насаджених на нерухому вісь катка. В

процесі обробки ґрунту задня частина глибокородушувача спирається на цей каток, вдавлюючи його в ґрунт. Дискові секції обертаються на власній осі, прорізаючи при цьому ґрунт і подрібнюючи поживні залишки і смітну

рослинність. В результаті відбувається взаємне перемішування ґрунту і

рослинності між собою, утворюється захисний покрив з рослинних решток. Для

поліпшення процесу мульчування по периметру кола кожного диска встановлені спеціальні деформатори, які, ущільнюючи мульчу, вирівнюють поверхню

ґрунту, додатково розминаючи великі грудки.

Смуговий глибокородушувач СГР-4 виробляє спільну нарізку чотирьох

смуг з кроком 0,7 м і глибиною до 0,35 м. Одночасно виконується суцільний

обробіток, вирівнювання і коткування поверхні ґрунту на глибину 6 см по всій ширині захвату СГР-4, величина якого становить 2,8 м.

При роботі в загінці край дискового катка повинен перемінатися по краю вже обробленої ділянки. Перекриття проходів має становити 0...10 см. Конструкція глибокорозпушувача передбачає установку на його раму системи для внесення в ґрунт на глибину обробки рідких або сипучих добрив. Маса глибокорозпушувача без системи внесення добрив становить 850 кг.

Конструкція об'ємного смугового глибокорозпушувача допускає використання будь-якої схеми переміщення агрегату по полю. Однак завжди це переміщення повинно бути направлено поперек переважаючого ухилу. На рівних полях смуговий обробіток необхідно проводити поперек або під кутом до глибокої попередньої обробки.

Об'ємне смугове розпушування ґрунту проводиться, як правило, по стерні озимої пшениці або зернобобових культур відразу після збирання врожаю. В результаті покращується структура ґрунту, блокуються втрати вологи від випаровування, створюються сприятливі умови для проростання падалиці насіння попередника і бур'янів, які можна ліквідувати подальшої поверхневої культивуації.

В ході теоретичних і експериментальних досліджень нами отримано залежності впливу параметрів робочого органу на енергетичні та якісні характеристики процесу. Причому ці два види залежностей є діаметрально протилежними, так як для того, щоб краще обробити ґрунт, необхідно затратити більше енергії. Тому необхідно знайти розумний компроміс між якістю обробки і витраченими на неї засобами з метою отримання максимального прибутку.

Якісну сторону процесу розпушування, оцінювану приростом пористості ґрунту, при цьому встановлена межа цієї величини, що дорівнює 0,25...0,30. Для характеристики іншого боку процесу розпушування - енергоємності скористаємося результатами польових досліджень, в ході яких отримана залежність тягового опору від параметрів робочого органу і основних механічних характеристик ґрунту (3.40).

Виходячи з вищесказаного, можна скласти систему:

$$\begin{cases} \{\varepsilon_v(L, t, h, \alpha, \beta, \gamma) = 0,25 \dots 0,30; \\ (P(L, t, h, \beta, \gamma, V, C, \rho) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (5.1)$$

Не всі фактори, що увійшли в цю систему, мають потребу в раціоналізації.

Так, глибина обробки h задається агротехнічними вимогами, більше того, для встановлених раціональних параметрів вона не впливає на пріріст пористості ґрунту. Раціональне значення кута заточування α було знайдено відповідно до (2.15), в цю формулу входять деякі з факторів, тому значення кута α слід задати в першому наближенні, а потім перерахувати, використовуючи метод послідовних наближень. Перерахунок виконується до тих пір, поки різниця між попереднім кутом і кутом, отриманим з урахуванням знайдених параметрів, не може бути менше 5%.

Теоретичне значення швидкості обробки V визначається з можливостей тягового трактора [25]:

$$V = \frac{N_T}{P} \quad (5.2)$$

де N_T – номінальна тягова потужність.

Хоча ми і можемо підібрати клас трактора, тяговий опір самого робочого органу залежить від обраних параметрів і поки є невідомим. Тому швидкість, так само як і кут заточування, ми приймаємо орієнтовно, а вона знаходиться методом послідовних наближень.

При визначенні раціональних параметрів робочого органу, крім системи (5.1), слід ще врахувати особливість його геометрії. Вона виключає можливість встановлювати дуже маленьку міжстовову відстань і великий кут нахилу в поперечній площині, оскільки це призводить до зменшення відстані між носками стовб L_n аж до їх повного змикання і неможливості реалізувати такі комбінації цих параметрів. Крім того, нижня частина стовб, є найвужчим місцем і необхідно виключити його забивання. Результати досліджень, показують, що забивання між парою стовб відбувається, якщо відношення товщини стовби l до міжстовової відстані L_n більше ніж 0,2 [35].

Звідси, нормальна працездатність знаряддя забезпечується при дотриманні умови: $L_n > 5 \cdot t$. Його слід додати до системи (5.1) при визначенні раціональних параметрів:

$$\begin{cases} \varepsilon_v(L, t, h, \alpha, \beta, \gamma) = 0,25 \dots 0,30; \\ P(L, t, h, \beta, \gamma, V, C, \rho) \rightarrow \min; \\ L_n > 5 \cdot t. \end{cases} \quad (5.3)$$

Характеристики стану ґрунту C і ρ не є незалежними обумовленими чинниками, а навпаки входять в вихідні дані. Таким чином, з поставленої компромісної задачі нам необхідно знайти чотири параметри: міжстовбну відстань L , товщину стовб t , кут їх нахилу в поперечній площині β і поздовжньо-вертикальній площині γ .

Система (5.3) вирішена для ґрунту, на якій проводилися польові дослідження, результати зведені в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1
Раціоналізація параметрів об'ємного глибокорозпушувача

Параметр	Значення
Вихідні дані	
Тип ґрунту	чорнозем
Глибина обробки $h, м$	0,35
Попередній кут заточки стовб $\alpha, ^\circ$	20
Використовуваний трактор, к.с.	150
Коефіцієнт зчеплення ґрунту $C, \kappaПа$	75
Щільність ґрунту $\rho, кг/м^3$	1300
Кут зовнішнього тертя $\varphi_1, ^\circ$	22
Кут внутрішнього тертя $\varphi_2, ^\circ$	30
Кількість оброблюваних смуг	4
Знайдені раціональні параметри робочого органу	
Міжстовбна відстань $L, м$	0,3
Товщина стовб $t, м$	0,016
Кут заточування стовб $\alpha, ^\circ$	24
Кут нахилу стовб в поперечному напрямку $\beta, ^\circ$	4
Кут нахилу стовб в поздовж.-вертик. площині $\gamma, ^\circ$	30
Швидкість обробки $V, м/с$	2,38
Значення функцій раціоналізації	
Індивідуальний пористості ε_v	0,25
Тяговий опір одного робочого органу $P, Н$	8372

5.2. Розрахунок стійкості ходу смугового глибокорозпушувача з робочими органами об'ємного типу

Одна з основних характеристик якості роботи ґрунтообробної машини - це стійкість її ходу по глибині. Тобто гарантована можливість проводити обробіток на зазначену в агротехнічних вимогах глибину. Оскільки на стійкість ходу, крім самого робочого органу, впливають ще й параметри всієї машини в цілому, не розглядаються в даній роботі, розрахунок стійкості слід використовувати в якості перевірного. Для його здійснення необхідно знати сили, що діють на розпушувач і компоновку машини. Оскільки кожна стійка працює в парі з симетричною їй стовбою, обжимаються сила R_x і моменти M_y, M_z (рис. 2.8), взаємно компенсуються. Як компоувальних параметрів використовувалися розміри прототипу ґрунтообробної машини створеного для проведення польових досліджень.

При стійкому ході машина знаходиться в стані рівноваги, причому всі діючі сили можна звести в одну площину, тому можна вирішити завдання (рис. 5.4). Використовуючи розрахункову схему для плоскої задачі, можна скласти три рівняння статки: сума проєкцій сил на дві осі і сума моментів відносно точки (в якості цієї точки візьмемо кріплення нижніх тяг задньої навіски трактора до рами машини).

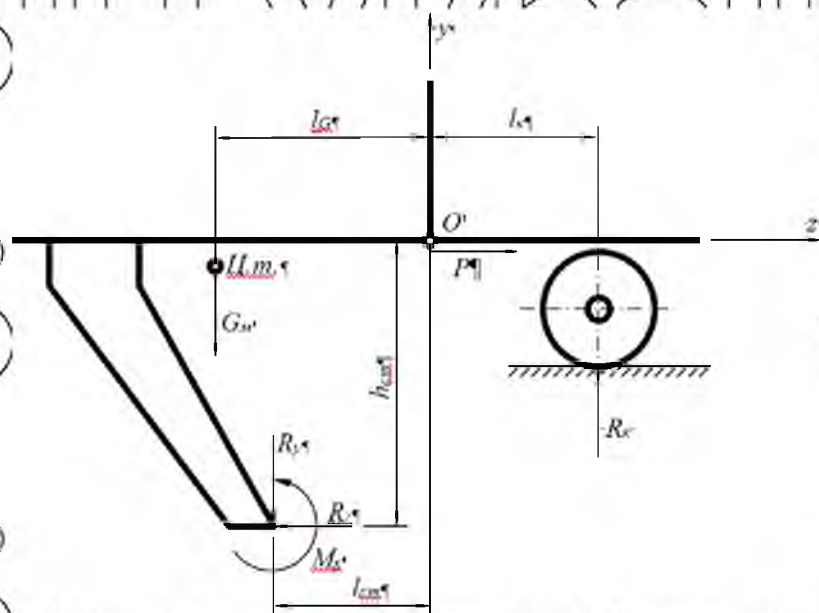


Рис. 5.4. Схема сил, що діють на глибокорозпушувач

$$\begin{cases} \sum Y = 0; & R_k - k \cdot R_y - G_m = 0; \\ \sum Z = 0; & P - k \cdot R_z = 0; \\ \sum M_O = 0; & G_m \cdot l_G + k \cdot R_y \cdot l_{cm} - k \cdot R_z \cdot h_{cm} + R_k \cdot l_k - k \cdot M_x = 0, \end{cases} \quad (5.4)$$

де R_k – реакція ґрунту на опорне колесо;

R_y, R_z – проєкції реакції ґрунту на стійку;

G_m – вага розпушувача;

P – загальне тягове зусилля, що діють з боку трактора на розпушувач;

M_x – момент приведення реакцій R_y і R_z момент приведення реакцій

l_G, l_{cm}, h_{cm}, l_k – плечі діючих сил;

k – коефіцієнт, що дорівнює відношенню кількості робочих органів в одному розпушувачі до кількості опорних коліс (в даному прототипі $k = 2$).

З першого рівняння системи (5.4) можна визначити реакцію на опорному

колесі R_k . Друге рівняння показує, що горизонтальна складова реакції ґрунту на

стійку R_z дорівнює тяговому зусиллю P , яке потрібно прикласти трактору для переміщення розпушувача. Вертикальне зусилля R_y і момент приведення сил до кінця стовби, що характеризує їх точку прикладання, складно визначити в ході

польових експериментів, тому ці величини знайдені з результатів моделювання

процесу об'ємного розпушування ґрунту. В кінцевому підсумку, для успішного

виконання умови рівноваги необхідно, щоб один з розмірів був вільним. В якості

такого розміру зручно використовувати плече у реакції на опорному колесі l_k

таким чином, задача зводиться до визначення положення опорних коліс:

$$\begin{cases} R_k = k \cdot R_y + G_m; \\ k \cdot R_z = P; \\ l_k = \frac{-G_m \cdot l_m - k \cdot R_y \cdot l_{cm} + k \cdot R_z \cdot h_{cm} - k \cdot M_x}{k \cdot R_y + G_m}. \end{cases} \quad (5.5)$$

Із системи рівнянь (5.5) видно, що для визначення положення опорних коліс необхідно знати вагу розпушувача і координату його центра ваги, сили, що діють на стійку і точку їх застосування, компонувальні розміри.

Для визначення загальної ваги розпушувача і точки його застосування, нами використовувалася його просторова модель, виконана в програмі

«Inventor». Вага розпушувача склала $G_M=8000\text{Н}$, а координата центра ваги $l_{cm}=0,87\text{м}$. Виходячи з параметрів прототипу розпушувача, плечі сил рівні: $l_{cm}=0,57\text{м}$, $h_{cm}=0,7\text{м}$.

З огляду на описані теоретичні передумови розрахунку положення опорного колеса l_K нами внесені додавання в розроблений програмний модуль, призначений для розрахунку основних параметрів смугового розпушувача об'ємного типу. В результаті отримана координата розташування опорного колеса розпушувача, рівна $l_K=0,4\text{м}$ (рис.5.1).

5.3. Економічна ефективність використання смугового глибокорозпушувача СГР-4

Економічна ефективність використання смугового глибокорозпушувача СГР-4 розрахована з умови напрацювання агрегату на один гектар. При цьому за базу для порівняння прийнятий чизельний плуг ПЧ-2.5, як аналог, котрий виконує глибокий безпліщевий обробіток, а також лемішно-пліщевий плуг ПЛН-5-35, як найбільш поширене знаряддя для основного обробітку ґрунту. Всі перераховані знаряддя агрегуються з трактором типу Т-150К, котрий при роботі з ними має номінальну тягову потужність.

Річний економічний ефект E_z становить:

$$E_z = V_p (П_б - П_н), \quad (5.6)$$

де $П_б$, $П_н$ – приведені витрати на одиницю напрацювання для базової і нової машини (таблиця 5.3), грн/га;

V_p – річне напрацювання нової машини, га/рік.

Приведені витрати $П$ на одиницю напрацювання становлять суму прямих експлуатаційних витрат і капітальних вкладень у розрахунку на один гектар:

$$П = C + K \cdot E, \quad (5.7)$$

де C – прямі експлуатаційні витрати на одиницю напрацювання, грн/га;

K – капітальні вкладення на одиницю напрацювання;

E – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Прямі експлуатаційні витрати на одиницю напрацювання визначені як сума витрат на оплату праці (Z), паливно-мастильні матеріали (M), технічне обслуговування, поточний та капітальний ремонт (P), а також на амортизацію (A) за формулою:

$$C = Z + M + P + A, \quad (5.8)$$

де кожна зі складових витрат визначена за формулою:

- витрати на оплату праці:

$$Z = \frac{\tau}{W_{zm}}, \quad (5.9)$$

де W_{zm} – продуктивність агрегату за 1 годину змінного часу (таблиця 4.2);

τ – годинна тарифна ставка оплати праці обслуговуючого персоналу, грн/люд.-год;

- витрати на паливно-мастильні матеріали:

$$M = q \cdot \Pi, \quad (5.10)$$

де q – витрата паливно-мастильних матеріалів [л/га], кг/га;

Π – ціна 1 кг палива (включаючи вартість мастильних матеріалів, що припадають на 1 кг основного палива), $\Pi = 55$ грн/кг;

- витрати на технічне обслуговування, поточний та капітальний ремонт визначені за нормативами відрахувань від балансової вартості машини:

$$P = \frac{B(r_T + r_K)}{W_{год} \cdot T_{ч}}, \quad (5.11)$$

де B – балансову вартість машини, грн;

$W_{год}$ – продуктивність агрегату за 1 годину експлуатаційного часу, га/год;

r_T – коефіцієнт відрахувань на поточний ремонт і технічне обслуговування;

r_K – коефіцієнт відрахувань на капітальний ремонт;

$T_{ч}$ – нормативне річне навантаження, год.;

- витрати на амортизацію машини:

$$A = \frac{B \cdot a}{W_{год} \cdot T_3}, \quad (5.12)$$

де a – коефіцієнт відрахувань на амортизацію машини, $a=0,1$ [34]

Капітальні вкладення на одиницю напрацювання (K) визначено за формулою:

$$K = \frac{B}{W_{год} \cdot T_3} \quad (5.13)$$

Для використання даної методики розрахунку стосовно смуговому глибокорозпушувача СТР-4 нами встановлені відповідні вихідні дані (таблиця 5.2) і на їх основі визначені всі необхідні економічні показники (таблиця 5.3).

Таблиця 5.2

Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності використання смугового глибокорозпушувача

Показники	Варіант		
	Т-150К + ПЧ-2.5	Т-150К + ПЛН-5-35	Т-150К+ СТР-4
Кількість обслуговуючого персоналу		1	1
Ширина захвату агрегату, м	2,50	1,75	2,80
Робоча швидкість, км/год	8,0	10,0	8,6
Продуктивність $W_{год}$, га/год	1,70	1,49	2,04
Балансова вартість B , грн			
трактора	240000	240000	240000
глибокорозпушувача	60090	40736	110000
Годинна ставка оплати тракториста τ , грн	56	104	56
Коефіцієнт відрахувань на амортизацію машини a , %			
трактора	10,00	10,00	10,00
глибокорозпушувача	10,00	10,00	10,00
Коефіцієнт відрахувань на капітальний ремонт r_k , %			
трактора	7,00	7,00	7,00
глибокорозпушувача			-
Норма відрахувань на поточний ремонт і технічне обслуговування r_r , %			
трактора	11,50	11,50	11,50
глибокорозпушувача	15,00	15,00	15,00
Витрата пального q , кг/га	16,98	19,40	14,15
Нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень E	0,15	0,15	0,15

Таблиця 5.3

Економічні показники роботи порівнюваних знарядь

Показники	Варіант		
	T-150K+ ПЧ-2.5	T-150K+ ПЛН-5-35	T-150K+ СГР-4
Витрати на амортизацію A , грн/га			
трактора	9,41	10,74	7,84
глибокорозпушувача	15,37	11,89	23,44
Витрати на технічне обслуговування, поточний та капітальний ремонт, грн/га			
трактора	20,71	23,62	17,25
глибокорозпушувача	33,81	26,15	51,58
Витрати на оплату праці тракториста $З$, грн/га	61,18	69,80	50,98
Вартість пального M , грн/га	933,90	1067	778,25
Прямі експлуатаційні витрати C , грн/га	1074,38	1209,20	929,34
Питомі капітальні вкладення K , грн/га	247,80	226,25	312,87
Приведені витрати на одиницю напрацювання Π , грн/га	111,55	1243,14	976,27
Зменшення приведених експлуатаційних затрат, грн/га	135,28	266,87	-
Річний економічний ефект, грн.	63472,97	125213,81	-
Термін окупності, рік	1,7	0,9	-

З отриманих результатів видно, що використання чизельного плуга в порівнянні з полицевим дозволяє підвищити глибину обробки, але в результаті різко зростає її енергоємність, а, отже, знижується швидкість і продуктивність агрегату. З іншого боку, використання смугового розпушувача дозволяє підвищити глибину обробки і ширину захвату, зберігаючи швидкість на рівні полицевої оранки. Таким чином, ми одночасно збільшуємо і продуктивність, і якість обробки, підвищуючи таким чином економічний ефект від його використання (5.5) по відношенню до полицевого плуга він склав майже 267 грн/га, а по відношенню до чизельних агрегатів - 135 грн/га. Річний економічний ефект від застосування смугового глибокорозпушувача по відношенню до чизеля склав майже 63473 грн., а по відношенню до полицевого плуга - 125214 гр. Відповідно термін окупності нового агрегату по відношенню до чизеля складає 1,7 роки, а по відношенню до полицевого плуга - 0,9 року.

Висновки розділу 5:

1. Для здійснення якісного об'ємного розпушування на глибину 0,35 м з мінімальними енерговитратами, робочий орган повинен мати такі параметри: міжстовбна відстань $L=0,3$ м, товщина стовб $t=0,016$ м, кут заточки стовб $\alpha=24^\circ$, кут нахилу стовб в поперечній площині $\beta=4^\circ$, кут нахилу стовб в поздовжньо-вертикальній площині $\gamma=30^\circ$.
2. Стійкість ходу ґрунтообробного знаряддя забезпечується положенням опорного колеса. Для знайдених раціональних параметрів воно має розташовуватися на відстані 0,4 м від точки підвіски знаряддя.
3. Річний економічний ефект від застосування смугового глибокого розпушувача по відношенню до чизеля склав майже 63473 грн., а по відношенню до полицевого плуга – 125214 грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Порівняльний аналіз розпушувачів показав, що найбільш прийнятним для проведення глибокого смугового обробітку є V-подібний робочий орган з розімкненим контуром, котрий здійснює об'ємне розпушення ґрунту.

2. При розпушенні чорнозему звичайного для забезпечення обробітку тільки в межах заданої смуги необхідно, щоб кут загострення α стовб складав $20 \dots 25^\circ$.

3. В результаті аналізу розробленої моделі процесу розпушення ґрунту похилими стовбами встановлено:

- зміна параметрів робочого органу в бік покращення якості обробітку призводить до підвищення енергоємності процесу;

- при обробітку ґрунту на глибину $0,2 \dots 0,4$ м якість розпушення не змінюється;

- основними факторами, що визначають енергоємність і якість процесу розпушення ґрунту є товщина стовб t і кут їх нахилу β у поперечній площині.

4. За результатами досліджень встановлено, що раціональний з позиції енергоємності кут нахилу β стовб у поперечній площині змінюється в межах від 8° до 14° та залежить від відстані L між стовбами, їх товщини t і не залежить від стану ґрунту.

5. Визначено, що для забезпечення потрібної якості обробітку на глибину $0,35$ м з мінімальною енергоємністю та швидкістю $V \approx 9$ км/ч робочий орган повинен мати наступні параметри: відстань між стовбами $L=0,3$ м, товщину стовб $t=0,016$ м,

кут їх загострення $\alpha=24^\circ$, кут нахилу у поперечній площині $\beta=4^\circ$, кут нахилу у поздовжньо-вертикальній площині $\gamma=30^\circ$. Для сталості ходу опорне колесо має бути розташованим на відстані $0,4$ м від точки підвісу знаряддя.

6. Річний економічний ефект від застосування смугового глибокорозпушувача по відношенню до чизеля склав майже 63473 грн., а по відношенню до полицевого плуга – 125214 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аніскевич Л.В., Войтюк Д.Г., Броварець О.О. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із дисципліни "Система точного землеробства" для студентів сільськогосподарських вузів. – К.: Центр інформаційних технологій, 2011. – 42 с.
2. Василенко П.М., Погорілий Л.В. Основи наукових досліджень. К.: Вища школа, 1985, 266 с.
3. Проектування сільськогосподарських машин. Навчальний посібник за редакцією І.М. Бендери, А.В. Рудя, Я.В. Козія. – Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О.В., 2011. – 640 с.
4. Василенко П.М. Введение в земледельческую механику. – Киев: Сільгоспосвіта, 1996. – 234 с.
5. Бабицький Л.Ф. Біонічні напрямки розробки ґрунтообробних машин. – К.: Урожай, 1998. – 164с.
6. Єрфорт Ю.О., Подтєсний С.В. Теоретична механіка. Краматорськ: ДДМА, 2007. Статика и кинематика. – 164 с.
7. Висоцький А.А. Динамометрування сільськогосподарських машин. – К.: Колос, 1998. – 290 с.
8. Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем. Моделювання, проектування, оптимізація. – Л.: Світ, 2001.
9. Костюченко М.М. Механіка ґрунтів: Навч. посібник – К.: Видавництво КНУ ім. Т. Шевченка, 2013. – 116 с.
10. Сільськогосподарські та меліоративні машини. Д.Г. Войтюк, В.О. Дубровін, Т.Д. Іщенко та ін., за редакцією Д.Г. Войтюка. – К.: Вища освіта, 2004. – 544с. (Підручник).
11. Горячкин В.П. Собрание сочинений: В3 т. Т.2. - М.: Колос, 1968 – 107 с.
12. Груздева Л.П., Яскін А.А., Тимофеев В.В. Почвоведение с основами геоботаники. – М.: Агропромиздат, 1961. – 448 с.
13. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин: В 3 т. – Харків: Еко, 2001. – Т.1. Ч.1.: Машини та знаряддя для обробітку ґрунту. – 444с.

14. Машини для земляних робіт. За ред. Хмари Л.В., Кравця С.В. – Рівне-Дніпропетровськ-Харків. Машиностроение, 2010. – 576с.

15. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: Підручник Д.Г. Войтюк, В.В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. – К.: Вища освіта, 2005. – 464 с.

16. Булгаков В. М. Теорія вібраційного викопування коренеплодів / В. М. Булгаков, І. В. Головач, Д. Г. Войтюк // Механізація с.-г. виробництва: зб. наук. праць Нац. аграр. ун-ту. – 2003. – Т. XV. – С. 45–85.

17. Ганженко О.М. Удосконалення технологічного процесу обробітку ґрунту перед садінням маточних коренеплодів / О.М. Ганженко // Збірник наукових праць НИЦ ІМЕСГ. «Механізація та електрифікація сільського господарства». – Том 83. – Глеваха, 2000. – С. 133-135.

18. Козаков В.С. Безтраншейний і вузькотраншейний дренаж. – К.: Вища школа, 1986. – 72 с.

19. Козаков В.С. Мазилукас А.І. Механізація глибокого меліоративного рихлення ґрунту // Землеробство. – 1998. – №2. – С.48–56.

20. Кант Г. Безплужне землеробство. – К.: Просвіта, 2010. – 254 с.

21. Каплун А.Б., Морозов Е.М., ANSYS в руках інженера: Посібник. – К.: Едиторіал, 2003. – 272 с.

22. Киричевский В.В., Сахаров А.С. Нелинейные задачи термомеханики конструкций из слабосжимаемых эластомеров. – К.: Будівельник, 1992. – 216 с.

23. Котков В.І. Обґрунтування процесу роботи та параметрів робочого органу для обробітку ґрунту в міжряддях Хмільників: Дис... канд. техн. наук: 05.20.01. – Житомир, 1998. – 168 с.

24. Кочетков В.С. Новый способ обработки почвы без оборота пласта // Актуальні проблеми сучасного землеробства (Матеріали міжнародної науково-практичної конференції). – Луганськ: Видавництво ЛНАУ. – 2003. – С. 239-244.

25. Краевский А.Н. Минимализация предпосевной обработки почвы // Актуальні проблеми сучасного землеробства (Матеріали міжнародної науково-практичної конференції). – Луганськ: Видавництво ЛНАУ. – 2003. – С.227-230.

26. Краевский А.Н., Карпенко А.А. О зяблевой обработке // Луганская правда. – 1998. – №2. – С. 3.

27. Краевский А.Н., Карпенко А.А. Основная обработка почвы в Луганской области // Наша газета. – 2003. – №4. – С.2.

28. Крилов О.В. Метод скінченних елементів і його застосування в інженерних розрахунках. Навч. посібник для ВНЗ – К.: Вища школа, 2002. – 104 с.

29. Кувшинов А.О. Розробка і обґрунтування параметрів віброударних розпушувачів ґрунту: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. /Тавр. держ. агротехн. акад. – Мелітополь, 2001. – 19 с.

30. Кушнарєв А.С. Механико-технологические основы процесса воздействия рабочих органов на почву: Автореф. дис. ... д-ра тех. наук. - Челябинск, 1981 – 50с.

31. Кушнарєв А.С., Кочев В.И. Механіко-технологічні основи обробітку ґрунту. Київ: Урожай, 1989. – 140 с.

32. Сільськогосподарські машини (Основи теорії та розрахунку) За ред. Войтюка Д.Г. – К.: Видавництво НУБІП України, 2018р. – 736 с.

33. Лінник М.К., Гуков Я.С. Проблеми енергозбереження за механізованого обробітку ґрунту // Вісник аграрної науки, січень 2000, С.47-49.

34. Сільськогосподарські та меліоративні машин. За ред. Войтюка Д.Г. – К.: Вища освіта, 2004р. – 544с.

35. Максютов Н.А. Коли ефективним є мінімальний обробіток ґрунту // Землеробство. – 1998. – №1.- С.15-18.

36. Теорія планування експериментів: Виконання розрахунково-графічної роботи [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності ІЗТ «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування» / С.М. Лапач ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 86 с.

37. Будівельна механіка: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра спеціальності 184 «Гірництво» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Г.В. Косенко, С.М. Стовпник, Л.В. Шайдецька. Електронні текстові дані. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 68 с.

38. Кравчук В. Технологія Strip-Till на вирощуванні сільськогосподарських культур / В. Кравчук, О. Броварець, М. Новохацький, Л. Шустік // Техніка і технології АПК. – 2014. – №4. – С. 7–12.

39. Вступ до планування оптимального експерименту: Навч. посібник. для студ. спец. 092502 – Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва / Уклад.: Г.О. Статюха, Д.М. Складанний, О.С. Бонаренко – К.: ІВЦ «Політехніка», 2011. – 117 с.

40. Нетрадиційна смугова ґрунтозахисна енергозберігаюча технологія вирощування кукурудзи і соняшника: Звіт про НДР (проміжний). / ЛДАУ. - №ДР 0199V003720.

Луганськ, 2001, € 20є.

41. Гренкосій В.Д. Проектування технологічних процесів у рослинництві: навчальний посібник / [Гренкосій В.Д., Войтюк В.Д., Шагров Р.В. та ін.] – Ніжин: Виконавець: ПП Лисенко М.М., 2014. – 392с.

42. Панченко А.Н., Штепа В.П. Аналитический метод определения тяговых сопротивлений почвообрабатывающих и землеройных машин и оценка их эффективности для энергосберегающих технологий. - Днепропетровск: ДГАУ, 1995 – 96 с.

43. Погорілий Л., Лінник М.К., Дубровін В., Нагорний М. Перспективні конструкції ґрунтообробних машин: тенденції розвитку та еволюція технологій // Сільськогосподарська техніка України. – 1998. - №2. – С. 6-12.

44. Гуків Я.С. Обробіток ґрунту: технологія і техніка. – К.: Нора-принт, 2011. – 279с.

45. Булгаков В.М., Шелудченко Б.А. Самоорганізація ґрунтових структур. – Київ: Видавництво НАУ, 1998. – 58с.

46. Система точного землеробства - новий індустріальний крок у сільському господарстві / Д. Войтюк, Л. Аніскевич, Г. Гаврилюк, М. Волянський // Сільськогосподарська техніка України. – 1998. - №2. – С. 32-33.

47. Відтворення родючості ґрунтів у ґрунтозахисному землеробстві. Наукова монографія / Національний аграрний університет. Під редакцією Н.К. Шикули. Київ, ПФ «Оранта», 1998 – 680с.

48. Стан родючості ґрунтів України та прогноз його змін за сучасного землеробства

// За редакцією академіка УААН В.В. Медведєва. – Харків: Штрих, – 2001. – 100с.

49.Гевко Р.Б., Гарькавий А.Д., Гладич Б.Б., Павух І., Павелцак О.Б. Оцінка ринкової вартості та конкурентоспроможності машин і технологій. Тернопіль: ГДПУ, 2004. – 199 с.

50.Шелудченко Б.А. Агротехніка ґрунтів. – Житомир: Полісся, 1992. – 249с

51.Хом'як П.В. Особливості обробітку ґрунту під соняшник при скорочених термінах повернення його на попереднє місце в сівозмінах південного степу України //Актуальні проблеми сучасного землеробства (Матеріали міжнародної науково-практичної конференції). – Луганськ: Видавництво ЛНАУ. – 2003. -

С.362-367.

52.Швець В.Б., Гінзбург Л.К., Гольдштейн В.М./ Довідник з механіки і динаміки ґрунтів / Під. ред. Швеця В.Б. – К.: Будівельник, 1987 – 232 с.

53.Шелудченко Б.А. Обґрунтування робочого процесу і параметрів глибокорозпушувальних органів об'ємного типу: Дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. - Глеваха, 1990. – 207 с.

54.Марченко В.В. Механізація технологічних процесів у рослинництві: Навчальний посібник. – Київ.: Кондор. – 2007. – 334с.

55.Типові норми виробітку і витрачання палива на механізовані польові роботи. – К.: Урожай, 2001. – 472с.

НУБІП України

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця результатів польового експерименту

(При $t = 0.02$ м, $\rho = 1300$ кг/м³, $C = 75$ кПа)

Таблиця 1

№ досвіду	фактори				Тяговий опір, Н
	L , м	h , м	β , °	V , Км / год	
1	2	3	4	5	6
1	0,30	0,15	7	4	5320
2	0,60	0,15	7	4	6335
3	0,30	0,35	7	4	9905
4	0,60	0,35	7	4	11220
5	0,45	0,25	0	2	10390
6	0,45	0,25	14	2	4185
7	0,45	0,25	0	10	14365
8	0,45	0,25	14	10	7800
9	0,45	0,25	7	4	6695
10	0,30	0,25	7	2	7395
11	0,60	0,25	7	2	7300
12	0,30	0,25	7	10	7350
13	0,60	0,25	7	10	10225
14	0,45	0,15	0	4	7650
15	0,45	0,35	0	4	14395
16	0,45	0,15	14	4	4050
17	0,45	0,35	14	4	9670
18	0,45	0,25	7	4	7415
19	0,30	0,25	0	4	12335
20	0,60	0,25	0	4	12685
21	0,30	0,25	14	4	5050
22	0,60	0,25	14	4	6850
23	0,45	0,15	7	2	3225
24	0,45	0,35	7	2	9200
25	0,45	0,15	7	10	6720
26	0,45	0,35	7	10	11970
27	0,45	0,25	7	4	7600

НУБІП України

Додаток Б

Таблиця 2

Результати моделювання процесу об'ємного розпушування ґрунту

№	Значення факторів						R _x , Н	R _y , Н	R _z , Н	M _x , Нм	M _y , Нм	M _z , Нм	ε
	L, м	t, м	h, м	γ, °	α, °	β, °							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0.5	0.03	0.3	30	20	7	29184	4980	-13437	-4197	12167	-5396	0,12
2	0.3	0.03	0.3	30	20	7	31281	4321	-15415	-2944	3466	-6414	0,39
3	0.5	0.01	0.3	30	20	7	24045	2521	-10187	-2945	11311	-2919	0,11
4	0.3	0.01	0.3	30	20	7	16140	2433	-6177	-1312	3047	-1951	0,12
5	0.5	0.03	0.3	10	20	7	31130	1936	-18910	-2700	2543	-4339	0,28
6	0.3	0.03	0.3	10	20	7	38330	1245	-22610	-3534	3162	-6215	0,43
7	0.5	0.01	0.3	10	20	7	19520	2153	-7198	-964	701	-2185	0,10
8	0.3	0.01	0.3	10	20	7	16730	1849	-6029	-1024	607	-2105	0,17
9	0.4	0.03	0.4	20	30	7	41620	5276	-26270	-6349	5003	-9936	0,36
10	0.4	0.01	0.4	20	30	7	20597	-1829	-7825	-23837	47798	-53622	0,04
11	0.4	0.03	0.2	20	30	7	21360	2685	-14200	-1873	1865	-2780	0,37
12	0.4	0.01	0.2	20	30	7	7988	1188	-3089	-371	357	-779	0,09
13	0.4	0.03	0.4	20	10	7	43690	4355	-19890	-4018	7648	-7161	0,14

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14	0,4	0,01	0,4	20	10	7	29350	3438	-11580	-2180	2797	-4566	0,08
15	0,4	0,03	0,2	20	10	7	24120	2127	-11010	-1276	3590	-2152	0,15
16	0,4	0,01	0,2	20	10	7	14570	1556	-5799	-558	1015	-1114	0,08
17	0,4	0,02	0,4	30	20	14	22920	6450	-10800	-2323	2573	-3363	0,15
18	0,4	0,02	0,2	30	20	14	13730	3568	-6545	-824	1168	-1092	0,13
19	0,4	0,02	0,4	10	20	14	30680	6555	-16500	-3256	1674	-5529	0,29
20	0,4	0,02	0,2	10	20	14	14970	2809	-8232	-811	759	-1326	0,20
21	0,4	0,02	0,4	30	20	0	44720	2106	-23790	-6240	8323	-10790	0,32
22	0,4	0,02	0,2	30	20	0	24690	693	-13400	-1796	3088	-3202	0,30
23	0,4	0,02	0,4	10	20	0	35450	-1149	-21340	-3701	2733	-6232	0,27
24	0,4	0,02	0,2	10	20	0	23590	-1484	-14210	-1534	1581	-2896	0,32
25	0,5	0,02	0,3	30	30	7	24380	4890	-12760	-6725	24480	-3213	0,22
26	0,3	0,02	0,3	30	30	7	23170	4498	-13960	-2715	2697	-3649	0,32
27	0,5	0,02	0,3	10	30	7	23413	2459	-15699	-2876	4266	-2986	0,23
28	0,3	0,02	0,3	10	30	7	26331	2074	-17927	-1893	-3949	-4254	0,33
29	0,5	0,02	0,3	30	10	7	28410	3376	-11750	-1895	4383	-3291	0,06

30	0,3	0,02	0,3	30	10	7	24800	2798	-10330	-1685	3806	-2962	0,11
----	-----	------	-----	----	----	---	-------	------	--------	-------	------	-------	------

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
31	0,5	0,02	0,3	10	10	7	30120	2572	-13300	-1803	2770	-3522	0,11
32	0,3	0,02	0,3	10	10	7	27310	2069	-12380	-1820	2565	-3573	0,20
33	0,4	0,03	0,3	20	30	14	25780	6218	-15780	-3055	2293	-4440	0,37
34	0,4	0,01	0,3	20	30	14	16650	2906	-8644	-1750	6343	-3525	0,14
35	0,4	0,03	0,3	20	10	14	25060	5454	-10420	-1913	3844	-2559	0,08
36	0,4	0,01	0,3	20	10	14	16860	3933	-6956	-1004	1235	-1742	0,09
37	0,4	0,03	0,3	20	30	0	43040	-139	-31050	-6352	5317	-8961	0,44
38	0,4	0,01	0,3	20	30	0	28561	498	-16246	-3092	4701	-2879	0,13
39	0,4	0,03	0,3	20	10	0	5404	-2322	-2538	-4165	9826	-9562	0,29
40	0,4	0,01	0,3	20	10	0	25590	-499	-9659	-1144	2322	-3184	0,09
41	0,5	0,02	0,4	20	20	14	29260	7234	-13820	-2685	2477	-4601	0,16
42	0,3	0,02	0,4	20	20	14	25460	6905	-13625	-1520	-2810	-4720	0,19
43	0,5	0,02	0,2	20	20	14	14334	4388	-6787	-555	1541	-1341	0,14
44	0,3	0,02	0,2	20	20	14	12350	2994	-6401	-738	795	-1060	0,22
45	0,5	0,02	0,4	20	20	0	44690	324	-24690	-4997	5426	-9118	0,24

46	0.3	0.02	0.4	20	20	0	41326	1047	-23325	-4327	664	-9476	0,31
47	0.5	0.02	0.2	20	20	0	24300	-43	-14010	-1447	2115	-2663	0,23

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
48	0.3	0.02	0.2	20	20	0	26940	-577	-14700	-2271	2443	-4342	0,43
49	0.4	0.02	0.3	20	20	7	25970	3440	-13600	-2164	2261	-3549	0,24
49	0.4	0.02	0.3	20	20	7	25970	3440	-13600	-2164	2261	-3549	0,24
49	0.4	0.02	0.3	20	20	7	25970	3440	-13600	-2164	2261	-3549	0,24

Рівняння регресії

$$R_x = 36 \cdot 10^3 - 97 \cdot 10^3 \cdot L + 43 \cdot 10^4 \cdot t - 15 \cdot 10^4 \cdot h - 159 \cdot \gamma + 1084 \cdot \alpha + 1202 \cdot \beta - 26 \cdot 10^5 \cdot L \cdot t + 88 \cdot 10^3 \cdot L \cdot h + 981 \cdot L \cdot \gamma - 1016 \cdot L \cdot \alpha + 948 \cdot L \cdot \beta + 20 \cdot 10^5 \cdot t \cdot h - 15 \cdot 10^5 \cdot t \cdot \gamma + 52 \cdot 10^3 \cdot t \cdot \alpha + 10 \cdot 10^4 \cdot t \cdot \beta - 652 \cdot h \cdot \alpha + 206 \cdot h \cdot \gamma - 1248 \cdot h \cdot \beta + 2 \cdot \gamma \cdot \alpha - 35 \cdot \gamma \cdot \beta - 131 \cdot \alpha \cdot \beta + 15 \cdot 10^4 \cdot L^2 - 19 \cdot 10^6 \cdot t^2 + 28 \cdot 10^4 \cdot h^2 + 4 \cdot \gamma^2 - 19 \cdot \alpha^2 - 58 \cdot \beta^2, \quad (4.1)$$

характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,919$; $F=0,18$; $p=5 \cdot 10^{-5}$.

$$R_y = -1799 + 6113 \cdot L - 12 \cdot 10^3 \cdot t - 1843 \cdot h + 30 \cdot \gamma - 63 \cdot \alpha + 263 \cdot \beta + 12 \cdot 10^4 \cdot L \cdot t - 24 \cdot 10^3 \cdot L \cdot h - 13 \cdot L \cdot \gamma - 38 \cdot L \cdot \alpha + 321 \cdot L \cdot \beta + 62 \cdot 10^3 \cdot t \cdot h + 6404 \cdot t \cdot \gamma + 3295 \cdot t \cdot \alpha + 13 \cdot 10^5 \cdot t \cdot \beta + 116 \cdot h \cdot \alpha + 27 \cdot h \cdot \gamma + 871 \cdot h \cdot \beta + 5 \cdot \gamma \cdot \alpha - 9 \cdot \gamma \cdot \beta - 6 \cdot \alpha \cdot \beta - 573 \cdot L^2 - 47 \cdot 10^5 \cdot t^2 + 20 \cdot 10^3 \cdot h^2 - 3 \cdot \gamma^2 - 1 \cdot \alpha^2 - 18 \cdot \beta^2; \quad (4.2)$$

характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,983$; $F=0,041$; $p=7,2 \cdot 10^{-14}$.

$$\begin{aligned}
 & 1500+5397 \cdot L-49 \cdot 10^4 \cdot t+50 \cdot 10^3 \cdot h-186 \cdot \gamma-340 \cdot \alpha-719 \cdot \beta+90 \cdot 10^4 \cdot L \cdot t-17 \cdot 10^3 \cdot L \cdot h-244 \cdot L \cdot \gamma+461 \cdot L \cdot \alpha+30 \cdot L \cdot \beta-7 \\
 & 7 \cdot 10^4 \cdot t \cdot h+13 \cdot 10^3 \cdot t \cdot \gamma+24 \cdot 10^3 \cdot t \cdot \alpha-23 \cdot 10^3 \cdot t \cdot \beta+26 \cdot h \cdot \alpha+60 \cdot h \cdot \gamma+571 \cdot h \cdot \beta+21 \cdot \gamma \cdot \alpha+10 \cdot \gamma \cdot \beta+52 \cdot \alpha \cdot \beta-27 \cdot 10^3 \cdot L^2+11 \cdot 1 \\
 & 0^5 \cdot t^2-90 \cdot 10^3 \cdot h^2-\gamma^2+4 \cdot \alpha^2+10 \cdot \beta^2;
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,88$; $F=5,7 \cdot 10^{-2}$; $p=6,2 \cdot 10^{-17}$.

$$\begin{aligned}
 M_x = & -11 \cdot 10^3+26 \cdot 10^3 \cdot L-75 \cdot 10^3 \cdot t+11 \cdot 10^3 \cdot h+314 \cdot \gamma+530 \cdot \alpha-235 \cdot \beta+16 \cdot 10^4 \cdot L \cdot t-32 \cdot 10^3 \cdot L \cdot h-449 \cdot L \cdot \gamma-600 \cdot L \cdot \alpha- \\
 & 198 \cdot L \cdot \beta-30 \cdot 10^4 \cdot t \cdot h+1515 \cdot t \cdot \gamma-1450 \cdot t \cdot \alpha+7725 \cdot t \cdot \beta-413 \cdot h \cdot \alpha-166 \cdot h \cdot \gamma+476 \cdot h \cdot \beta-6 \cdot \gamma \cdot \alpha+7 \cdot \gamma \cdot \beta+4 \cdot \alpha \cdot \beta-795 \cdot L^2-1 \\
 & 2 \cdot 10^5 \cdot t^2+5446 \cdot h^2-2 \cdot \gamma^2-3 \cdot \alpha^2-5 \cdot \beta^2;
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,95$; $F=0,12$; $p=8,4 \cdot 10^{-7}$.

$$\begin{aligned}
 M_y = & 59 \cdot 10^3-14 \cdot 10^4 \cdot L+23 \cdot 10^4 \cdot t-973 \cdot h-1673 \cdot \gamma-2491 \cdot \alpha+283 \cdot \beta+28 \cdot 10^3 \cdot L \cdot t+13 \cdot 10^4 \cdot L \cdot h+1933 \cdot L \cdot \gamma+3652 \cdot L \cdot \alpha+ \\
 & 262 \cdot L \cdot \beta+19 \cdot 10^3 \cdot t \cdot h+530 \cdot t \cdot \gamma-12 \cdot 10^3 \cdot t \cdot \alpha+17 \cdot 10^3 \cdot t \cdot \beta+320 \cdot h \cdot \alpha+572 \cdot h \cdot \gamma-726 \cdot h \cdot \beta+30 \cdot \gamma \cdot \alpha-10 \cdot \gamma \cdot \beta+10 \cdot \alpha \cdot \beta+10 \cdot 10 \\
 & ^3 \cdot L^2+71 \cdot 10^5 \cdot t^2-92 \cdot 10^3 \cdot h^2+14 \cdot \gamma^2+14 \cdot \alpha^2+\beta^2;
 \end{aligned} \quad (4.5)$$

характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,83$; $F=0,37$; $p=0,04$.

$$\begin{aligned}
 M_z = & -3621+7316 \cdot L-53 \cdot 10^3 \cdot t+20 \cdot 10^3 \cdot h+24 \cdot \gamma+58 \cdot \alpha-158 \cdot \beta+47 \cdot 10^4 \cdot L \cdot t-21 \cdot 10^4 \cdot L \cdot h-173 \cdot L \cdot \gamma+248 \cdot L \cdot \alpha-354 \cdot L \cdot \\
 & \beta-66 \cdot 10^4 \cdot t \cdot h-606 \cdot t \cdot \gamma-3033 \cdot t \cdot \alpha+19 \cdot 10^3 \cdot t \cdot \beta-266 \cdot h \cdot \alpha-290 \cdot h \cdot \gamma+795 \cdot h \cdot \beta-2 \cdot \gamma \cdot \alpha+13 \cdot \gamma \cdot \beta-8 \cdot \alpha \cdot \beta-9156 \cdot L^2-40 \cdot 10 \\
 & ^5 \cdot t^2-26 \cdot 10^3 \cdot h^2+2 \cdot \gamma^2+\alpha^2-14 \cdot \beta^2;
 \end{aligned} \quad (4.6)$$

характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,97$; $F=0,08$; $p=1,8 \cdot 10^{-8}$.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon \\
 F = & -0,16-5,25 \cdot L+33,88 \cdot t-0,11 \cdot h+3,65 \cdot 10^3 \cdot \gamma+8,95 \cdot \alpha-1,4 \cdot 10^3 \cdot \beta-41,44 \cdot L \cdot t+1,57 \cdot L \cdot h-1,3 \cdot 10^{-3} \cdot L \cdot \gamma-6,96 \cdot 10^{-3} \cdot L \cdot \alpha+1,9 \cdot 10^{-}
 \end{aligned}$$

характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,99$; $F=0,098$; $p=0,0004$.

$$\begin{aligned}
 & 4 \cdot \gamma \cdot \beta+2,64 \cdot \alpha \cdot \beta-0,17 \cdot L^2-189,9 \cdot t^2-0,99 \cdot h^2-2,51 \cdot 10^{-5} \cdot \gamma^2-3,48 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha^2+4,15 \cdot 10^{-4} \cdot \beta^2;
 \end{aligned} \quad (4.7)$$

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

п п п п п п п п

оо

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України